

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

*Материалы
IV Международной научно-практической
конференции*

Часть 1

*9 апреля 2004 года
г. Новочеркасск*

Новочеркасск 2004

УДК 519.688
ББК 22.18 в6
М 74

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки РФ;
Северо-Кавказский научный центр высшей школы;
Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт);
Технический университет Ильменау (ФРГ);
Редакция журнала «Известия вузов. Электромеханика»;
Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион.
Технические науки»;
Ростовский государственный медицинский университет

Оргкомитет конференции:

Н.И. Горбатенко (РФ), профессор – председатель;
Ю.А. Бахвалов (РФ), профессор;
Г. Вурмус (ФРГ), профессор;
Г. Йегер (ФРГ), профессор;
Е. Калленбах (ФРГ), профессор;
М.В. Ланкин (РФ), доцент – зам. председателя;
Н.Ф. Никитенко (РФ), профессор;
А.В. Павленко (РФ), профессор;
В.А. Плаксин (РФ), доцент;
В.Н. Чернов (РФ), профессор

Редакционная коллегия:

Н.И. Горбатенко, д-р техн. наук, профессор – ответственный редактор;
М.В. Ланкин, канд. техн. наук, доцент – зам. ответственного редактора;
В.А. Плаксин, канд. техн. наук, доцент

М 74 Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы IV Ме-
ждународ. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 9 апр. 2004 г.: В 4 ч. / Юж.-
Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – Ч. 1. – 59 с.

ISBN 5-88998-462-4

Сборник содержит материалы по нескольким научным направлениям. Первая часть содержит публикации о математических моделях в электротехнике и магнитной гидродинамике; математических моделях в теплотехнике и гидравлике; математическом моделировании социальных и экономических процессов; математических моделях в медицине, биологии и экологии.

УДК 519.688

ISBN 5-88998-462-4

© Южно-Российский государственный
технический университет (НПИ), 2004
© Авторы, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт) – крупнейший вуз на юге России, имеющий вековой опыт исследований в различных отраслях науки и техники и обширные научно-технические контакты, – выступил инициатором проведения ряда Международных дистанционных научно-практических конференций. Такая форма проведения конференций стала возможной в результате широкого развития телекоммуникационных технологий, в том числе Internet.

В апреле 2004 года на базе ЮРГТУ (НПИ) проходила IV Международная научно-практическая конференция «Моделирование. Теория, методы и средства». В работе конференции приняли участие ученые и специалисты – представители высших учебных заведений, НИИ, научно-производственных предприятий Москвы, Екатеринбурга, Новосибирска, Краснодара, Иркутска, Ростова-на-Дону, Казани, Томска, Тулы, Оренбурга, Владивостока, Орла, Ставрополя, Таганрога, Перми, Ижевска, Новочеркасска, Шахты и других городов.

На конференцию представлено 72 доклада, которые вошли в сборник, состоящий из четырех частей, в соответствии с научными направлениями.

Первая часть содержит публикации о математических моделях в электротехнике и магнитной гидродинамике; математических моделях в теплотехнике и гидравлике; математическом моделировании социальных и экономических процессов; математических моделях в медицине, биологии и экологии.

Вторая часть содержит материалы, посвященные математическому моделированию технологических процессов; математическим моделям в строительстве, математическим моделям в химии и металлургии.

В третьей части рассмотрены вопросы математических моделей в энергетике и электромашиностроении; математических моделей в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях.

В четвертую часть вошли материалы о математическом моделировании информационно-измерительных и вычислительных систем; физическом моделировании в науке и технике; учебно-методические вопросы преподавания основ моделирования в учебном процессе.

Организаторы выражают уверенность, что конференция послужит обобщению и распространению научных результатов, оказанию методической помощи молодым ученым и аспирантам, а также стимулированию контактов между учеными России и зарубежья, с благодарностью примут замечания и пожелания.

Оргкомитет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

М.В. Булатников, К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, С.С. Шевченко

Новосибирский государственный технический университет

Приводятся результаты численного моделирования электромагнитных полей, инициируемых линиями электропередачи (ЛЭП) надземного и подземного исполнения. На основе расчета поля в ЛЭП подземного исполнения определяются погонные первичные продольные параметры, необходимые для расчетов нормальных режимов и аномальных процессов в схемах, содержащих эти ЛЭП. На основе расчета электромагнитного поля под ЛЭП воздушного исполнения (ВЛ) определяется антропогенное влияние этих ВЛ на биосферу, в том числе и на ихтиофауну пересекаемых ВЛ водоемов. Производится сравнение результатов численного моделирования с результатами, полученными на основе разработанных аналитических методик.

Математическое моделирование квазистационарных электромагнитных полей в газоизолированных линиях электропередачи трехфазного исполнения (ГИЛ ТИ). При анализе условий эксплуатации ГИЛ ТИ встает задача определения ряда параметров, характеризующих как нормальный режим эксплуатации, так и кратковременные процессы, связанные с анализом грозоупорности таких конструкций и их стойкости к воздействию коммутационных перенапряжений. Для решения этих задач требуется определение первичных погонных параметров ГИЛ, в том числе и продольных, с учетом их зависимости от частоты исследуемых процессов. Эскиз конструкции ГИЛ трехфазного исполнения приведен на рис. 1.

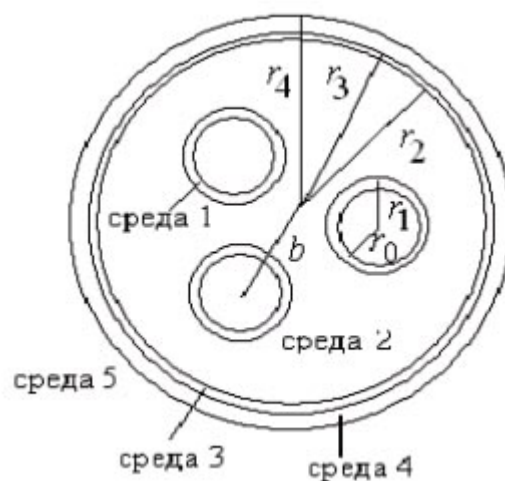


Рис. 1. ГИЛ трехфазного исполнения

На рис. 1 применены следующие обозначения сред: 1 – полые токопроводы из алюминия, 2 – диэлектрик (элегаз, SF_6), 3 – внутренняя оболочка из алюминия, 4 – внешняя оболочка из стали, 5 – диэлектрик.

Продольными параметрами являются собственное продольное сопротивление петли токопровод-оболочка ($Z_{kk} = R_{kk}(\omega) + j\omega L_{kk}(\omega)$) и вза-

имное продольное сопротивление между петлями, образованными k -м и i -м токопроводами и оболочкой ($Z_{kl} = R_{kl}(\omega) + j\omega L_{kl}(\omega)$).

Уравнения Максвелла в рассматриваемой конструкции в случае, если не учитывается влияние токов, текущих в среде, окружающей ГИЛ, а магнитная проницаемость оболочки, даже если она выполнена из стали, принята равной постоянной величине, отвечающей насыщенному состоянию металла, записываются в виде:

$$\nabla^2 \mathbf{J} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}, \quad \nabla^2 \mathbf{A} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \text{в средах 1, 3 и 4,} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{J} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad \text{в средах 2 и 5,} \quad (2)$$

где \mathbf{J} и \mathbf{A} – вектор плотности продольного тока и векторный магнитный потенциал, μ и σ – магнитные проницаемости и проводимости сред 1 и 3 (токопроводов и металлической оболочки).

При решении уравнений (1) и (2) был применен метод конечных элементов (МКЭ) на треугольных сетках с линейным финитным носителем, реализованный в пакете FEMLAB. Эти уравнения решались при условии непрерывности на границах раздела сред тангенциальной составляющей вектора напряженности и нормальной составляющей вектора магнитной индукции электромагнитного поля. Нормальная составляющая вектора напряженности магнитного поля на внешней границе рассматриваемой области принималась равной нулю. Собственные и взаимные продольные погонные сопротивления определялись на основе расчета продольных напряженностей электромагнитного поля и токов в токопроводах с помощью следующих соотношений:

$$\bar{Z}_{kk} = \frac{J_{\text{ст}}}{\sigma_k \bar{I}_k}, \quad \bar{I}_k = \int_{\Omega} \sigma_k \bar{E}_{z_{\Sigma}} d\Omega, \quad \bar{E}_{z_{\Sigma}} = \bar{E}_{z_{\text{ст}}} + \bar{E}_{z_{\text{нав}}}, \quad \bar{Z}_{kl} = -\bar{Z}_{kk} \frac{\bar{I}_k}{\bar{I}_l},$$

где \bar{I}_k – полный ток в k -ом токопроводе, являющийся геометрической суммой векторов стороннего тока и тока, наведенного в этом токопроводе

током, протекающим по металлической оболочке ГИЛ; \bar{I}_l – ток, индуктированный в l -ом токопроводе; $\bar{E}_{z_{\text{ст}}}$ и $\bar{E}_{z_{\text{нав}}}$ – векторы продольных напряженностей электрического поля, определяемые сторонним и наведенным токами в оболочке.

Очевидно, что погрешность расчетов продольных погонных сопротивлений численным методом возрастает с увеличением частоты, так как в этом случае как сторонний, так и наведенный токи протекают по весьма тонкому слою поверхности токопроводов и металлических оболочек. Это обстоятельство требует зачастую столь малого шага расчета, который не возможно реализовать на современных ПЭВМ из-за недостаточного объема их оперативной памяти и рабочей (тактовой) частоты. Оценка точности численного метода была проведена с помощью определения продольной погонной индуктивности в кабеле однофазного исполнения концентриче-

ской конструкции. Эта задача имеет точное аналитическое решение. На частоте 50 Гц результаты численных и аналитических расчетов совпали вплоть, по крайней мере, до четвертого знака. При частоте же 1 МГц большее расхождение наблюдается в величине погонного активного сопротивления (порядка 1,3 %), поскольку именно при определении активного сопротивления на такой высокой частоте, как 1 МГц, требуется существенное уменьшение шага расчета в областях, занятых проводящими средами. В конструкции трехфазного исполнения (рис. 1) в случае однородной оболочки аналитическая методика определения продольных погонных параметров основывалась на дополнительном допущении – токи в токопроводах текут в нитях, расположенных в их центрах, т.е. не учитывался эффект близости токопроводов. При этом допущении решение уравнений (1) и (2) при использовании аппроксимации модифицированных функций Бесселя первого и второго рода приводит к следующим выражениям для определения собственных и взаимных погонных продольных сопротивлений:

$$z_{kk} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{r_2}{r_1} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \right] + \frac{k \cdot cthz_0}{2\pi r_2 \sigma_{об}}, \quad (3)$$

$$z_{kl} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{r_1^2}{b_k^2 + b_l^2 - 2b_k b_l \cos \theta_{kl}} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left(\frac{b_l}{b_k} \right)^n \cos n\theta_{kl} \right] + \frac{k cthz_0}{2\pi r_2 \sigma_{об}}, \quad (4)$$

$$G_n = \frac{1}{n} \frac{b_k^{2n}}{r_2^{2n}} \left\{ 2\mu n \frac{z_3 cthz_0 + n(\mu + 1)}{[n^2(\mu^2 - 1) + z_2 z_3 + z_3(\mu - 1)] cthz_0} - 1 \right\}, \quad (5)$$

$$z_2 = k r_2, \quad z_3 = k r_3, \quad z_0 = z_3 - z_2, \quad \mu = \mu_{об} / \mu_0, \quad k = e^{j\pi/4} \sqrt{\omega \mu \sigma}.$$

Результаты сравнительных расчетов с помощью МКЭ и аналитического метода по выражениям (3-5), приведены в табл. 1 ($r_0 = 0,098$ м, $r_1 = 0,108$ м, $r_2 = 0,6$ м, $r_4 = 0,6095$ м, $\sigma_{алюм} = 3,6 \cdot 10^7$ 1/Ом·м, $\mu_{ст}/\mu_0 = 400$, $\sigma_{ст} = 3 \cdot 10^6$ 1/Ом·м).

Таблица 1

Сравнительные результаты расчетов продольных погонных параметров в ГИЛ ТИ при выполнении оболочки из стали

f , кГц	Re $[Z_{kk}]$		Im $[Z_{kk}]$		Re $[Z_{kl}]$		Im $[Z_{kl}]$	
	Анал.	МКЭ	Анал.	МКЭ	Анал.	МКЭ	Анал.	МКЭ
0.05	0,050	0,0545	0,1514	0,1523	0,0395	0,0412	0,052	0,053
0.50	0,200	0,2010	1,1000	1,1000	0,1112	0,1240	0,276	0,266
5	0,700	0,8000	9,7000	9,5000	0,3000	0,3000	2,100	1,800
50	2,200	2,6000	91,900	89,000	1,0000	1,0000	18,60	17,10

Сравнение величин собственных и взаимных продольных погонных сопротивлений, приведенных в табл. 1, показывает, что погрешность при определении продольных погонных сопротивлений различными методами находится в приемлемых пределах. Большие значения активной состав-

ляющей продольного сопротивления при использовании МКЭ обусловлены учетом реальных размеров и активных проводимостей полых токопроводов, определенных с учетом скин-эффекта и эффекта близости. Эти эффекты при определении взаимных продольных параметров численным методом проиллюстрированы на рис. 2, на котором приведены линии магнитной индукции в расчетной области внутри оболочки.

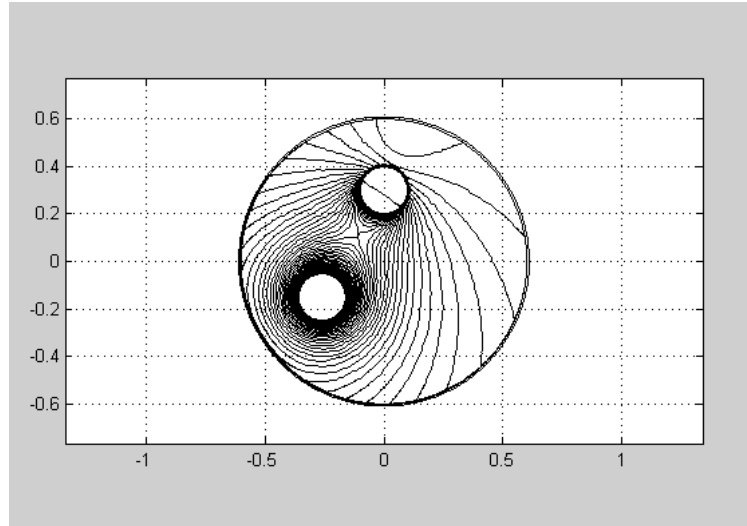


Рис. 2. Магнитное поле в диэлектрике при определении взаимного продольного сопротивления

При эксплуатации ГИЛ большое значение имеют дополнительные потери в оболочке в нормальном эксплуатационном режиме, обусловленные протеканием вихревых токов. Именно для снижения этих потерь оболочка выполняется двухслойной с внутренним слоем из немагнитного хорошо проводящего материала. При расчете электромагнитного поля в конструкции определялась плотность тока в комбинированной оболочке. Распределение плотности продольного тока по толщине комбинированной оболочки на частотах 50 Гц и 5 кГц проиллюстрировано на рис. 3 (размерность по оси абсцисс – м, по оси ординат – А/мм²).

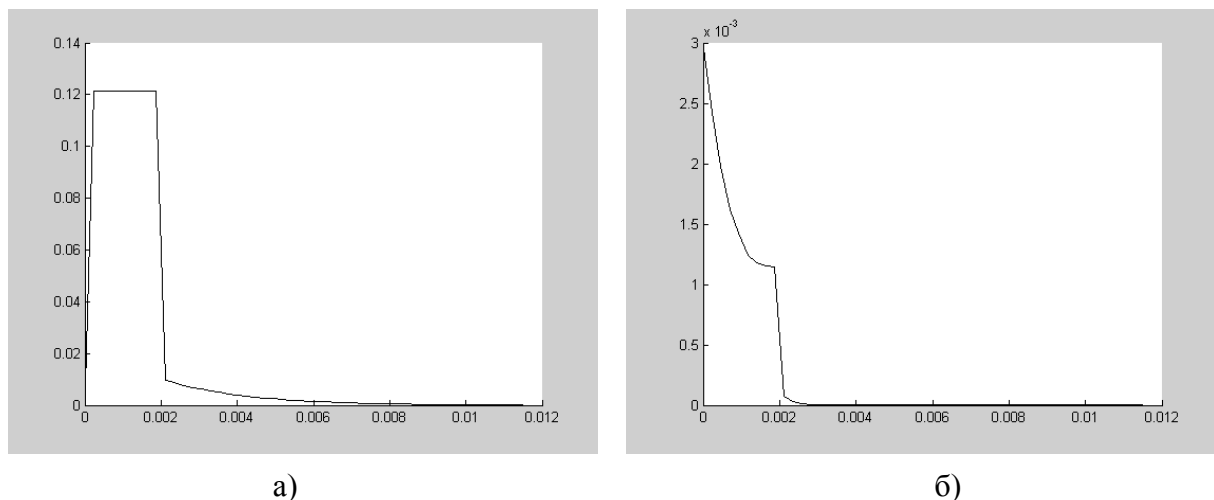


Рис. 3. Распределение плотности тока в радиальном направлении в случаях стальной (а) и комбинированной (б) оболочек

Из рисунка видно, что в случае комбинированной оболочки вихревые токи протекают практически по внутренней оболочке, выполненной из алюминия. Отношение плотностей вихревых токов на границе алюминиевой и стальной оболочек на частоте 50 Гц практически равно отношению удельных активных проводимостей этих оболочек. Мощность потерь в составных частях комбинированной оболочки определяется с помощью численного интегрирования:

$$P = \frac{1}{\sigma_{об}} \iint_{S_{об}} j^2 dS.$$

Аналогичные результаты были получены и при аналитическом решении этой задачи. Выражения для определения мощности потерь в комбинированной оболочке определяются с помощью следующих выражений (толщина стальной оболочки принята бесконечной, так как магнитное поле практически замыкается в области, ограниченной внешним радиусом стальной оболочки):

$$P_1 = \frac{9I_{эфф}^2 k_1 Q^2}{4\sqrt{2} \cdot \gamma_1 \pi r_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(b/r_2)^{2n}}{A_1^2 + B_1^2}, \quad P_2 = \frac{9I_{эфф}^2 k_2}{2\sqrt{2} \cdot \gamma_2 \pi r_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(b/r_2)^{2n}}{A_1^2 + B_1^2},$$

где

$$A_1 = \cos v(chv + \chi shv) + \frac{n}{\sqrt{2}r_2}(\eta_1 \cos v + \eta_2 \sin v),$$

$$B_1 = \sin v(shv + \chi chv) + \frac{n}{\sqrt{2}r_2}(\eta_2 \sin v - \eta_1 \cos v),$$

$$Q^2 = sh2v - \sin 2v + \chi^2 (sh2v + \sin 2v) + 4\chi sh^2 v, \quad \chi = \frac{\sigma_1 k_2}{\sigma_2 k_1} = \frac{\mu_2 k_1}{\mu_1 k_2},$$

$$\eta_1 = chv \frac{\mu_2}{k_2} + shv \frac{\mu_1}{k_1}, \quad \eta_2 = chv \frac{\mu_1}{k_1} + shv \frac{\mu_2}{k_2}, \quad v = \frac{k_1}{\sqrt{2}}(r_3 - r_2).$$

Результаты сравнительных расчетов мощности дополнительных потерь в оболочках ГИЛ ТИ ($I_{эфф} = 3$ кА) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность дополнительных потерь в оболочке ГИЛ ТИ в Вт/м

P , Вт/м	Метод расчета	Конструкция оболочки	
		сталь, $\Delta=9,5$ мм	алюминий, $\Delta=2,0$ мм, сталь, $\Delta=9,3$ мм
P_1	Аналит.	-	91,5
	МКЭ	-	-
P_2	Аналит.	200	4,5
	МКЭ	207	-
$P_{об} = P_1 + P_2$	Аналит.	200	96
	МКЭ	207	112

Из табл. 2 следует, что применение двухслойной оболочки в ГИЛ ТИ при выполнении внутренней оболочки из немагнитного хорошо проводящего материала приводит к существенному снижению мощности дополнительных потерь в оболочке.

Математическое моделирование электромагнитных полей по трассам воздушных линий электропередачи высокого напряжения. До последнего времени при проектировании ВЛ ВН оценивалась лишь интенсивность электростатического поля по трассам ВЛ. Величины напряженностей магнитного поля оказывались существенно меньше тех предельных значений, которые предполагались допустимыми. Однако в последние годы в мировой практике все большее внимание уделяется влиянию магнитных полей на здоровье населения. Определение допустимых значений затрудняется тем, что даже сильные магнитные поля находятся ниже зоны восприимчивости человеком. Однако отсутствие восприимчивости не исключает вредного влияния магнитных полей относительно небольшой напряженности, какими являются поля, инициируемые ВЛ ВН. Так, например, зарегистрирован повышенный процент раковых больных среди населения, проводящего значительную долю своего времени в непосредственной близости от электропередач высокого напряжения. Известно также, что пересечение ВЛ ВН водоемов влияет на жизнедеятельность представителей ихтиофауны, обитающих, нерестящихся и мигрирующих в этих водоемах. Поэтому при проектировании ВЛ ВН как надземного, так и надводного исполнения должны рассчитываться электромагнитные поля над землей и в водоеме с целью разработки мероприятий, если это необходимо, по снижению их интенсивности.

Напряженность магнитного поля на расстоянии z от поверхности земли, инициируемая системой проводов ВЛ одноцепного или многоцепного исполнения, может быть определена при использовании принципа наложения:

$$\mathbf{H}(y, z) = \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_i(y, z),$$

где координата y отсчитывается от оси ВЛ в перпендикулярной плоскости (рис. 4).

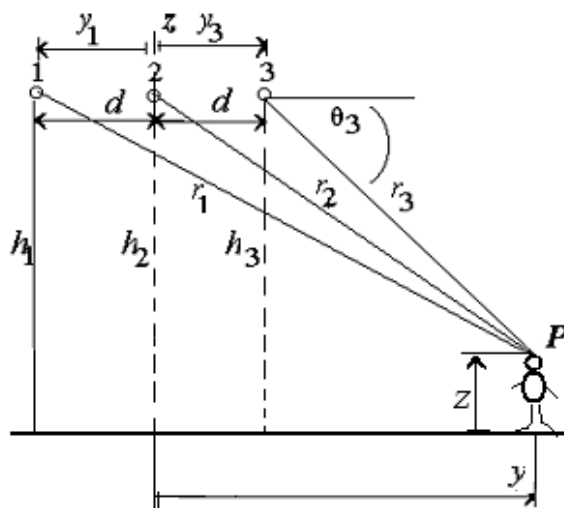


Рис. 4. Определение напряженности магнитного поля по трассе ВЛ ВН

При пренебрежении изменением тока в проводах по оси линии в случае определения напряженности магнитного поля в плоскости, перпендикулярной этой оси, векторы $H_i(y, z)$ определяются как:

$$\mathbf{H}_i(y, z) = \mathbf{k}_y H_{iy}(y, z) + \mathbf{k}_z H_{iz}(y, z),$$

Компьютерные исследования показали, что при определении напряженности магнитного поля в удалении от проводов, провода могут быть представлены в виде системы длинных нитей, т.е. в этом случае можно пренебречь эффектом близости и принять, что токи текут в центрах фазных проводников. При этом допущении составляющие вектора напряженности магнитного поля, инициируемого каждым проводом, могут быть определены с помощью следующих выражений, учитывающих поле, инициируемое токами, текущими в толще земли:

$$H_{iy}(y, z) \cong \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_{ix}}{\partial z} = \frac{j}{2\pi} I_i \left\{ \frac{h_i + z}{r_{2i}^2} - 2 \frac{r_{1i}}{r_{2i}} \left[\frac{h_i + z}{r_{1i} r_{2i}} - \frac{(h_i - z) r_{2i}}{r_{1i}^3} \right] - \frac{\sqrt{2}}{3} k(1 + j) \right\},$$

$$H_{iz}(y, z) \cong \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_{ix}}{\partial y} = \frac{j}{2\pi} I_i \left\{ \frac{y - y_i}{r_{2i}^2} - 2 \frac{r_{1i}}{r_{2i}} (y - y_i) \left[\frac{1}{r_{1i} r_{2i}} - \frac{r_{2i}}{r_{1i}^3} \right] \right\},$$

где $k = \sqrt{\omega \mu_0 \sigma_3}$ – модуль волнового числа, характеризующего проникновение магнитного поля в землю.

Поскольку электромагнитная обстановка по трассе ВЛ зависит от соотношения мгновенных значений токов в проводах, то напряженность магнитного поля в точке P (рис. 4) зависит не только от взаимного расположения проводов, но и от времени. На рис. 5 приведен результат компьютерного расчета напряженности магнитного поля под ВЛ 500 кВ при изменении фазы напряжения на проводах ВЛ в диапазоне $0 \dots 2\pi$ электрических градусов.

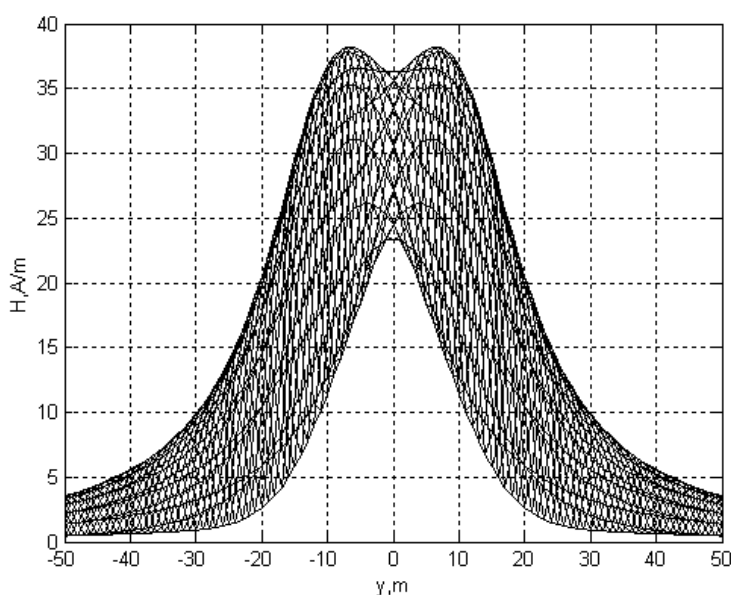


Рис. 5. Распределение напряженности магнитного поля под трехфазной ВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением проводов

При оценке экологической обстановки по трассе ВЛ следует использовать верхнюю огибающую мгновенных значений напряженности магнитного поля на рис. 5. Аналогичные результаты были получены и при непосредственном расчете электромагнитного поля в системе FEMLAB.

При пересечении ВЛ ВН водоема необходимо оценить определяющую характеристику электромагнитного поля с точки зрения обеспечения безопасной экологической обстановки для рыб, обитающих в пересекаемом водоеме. Такой характеристикой является плотность продольного (в направлении трассы ВЛ) тока в водоеме $\delta_{\text{прод}}$, для которой имеются предельные значения, зависящие от вида рыб, обитающих в водоеме. Различают пороги чувствительности и иммобилизации (паралича дыхания). На рис. 6 показаны эти пороговые значения.

Уравнения электромагнитного поля в проводящей водной среде, инициируемого токами в проводах фаз ВЛ, записываются в виде:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \delta, \text{rot} \delta = -i \omega \mu \gamma \mathbf{H}, \quad E = \delta / \gamma, \quad (6)$$

где \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; \mathbf{E} – вектор напряженности продольного электрического поля; δ – вектор плотности продольного тока; μ и σ – магнитная проницаемость и активная проводимость водной среды.

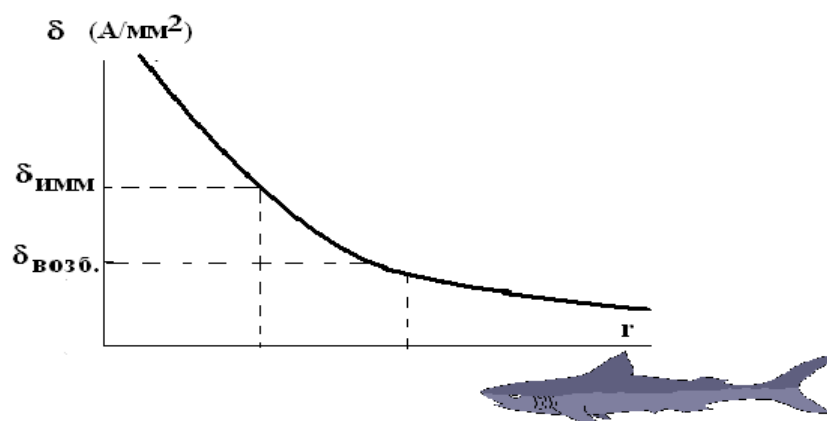


Рис. 6. Иллюстрация пороговых значений плотности продольного тока для рыб

При аналитическом и численном решении уравнений (6) были приняты следующие допущения:

- провода принимались подвешенными параллельно плоскости водоема,
- поле рассчитывалось на поверхности водоема, т.к. из-за большой глубины проникновения поля в водоем, поле на глубине миграции рыб практически совпадает с полем на поверхности.

При определении плотности продольного тока в водоеме применен принцип наложения:

$$\delta_x = \sum_i \delta_{ix},$$

где δ_{ix} – плотность продольного тока, инициируемого в водоеме током в i -ом проводе ВЛ.

Решение уравнений (6) при соответствующих граничных условиях на разделах сред воздух-вода и при аппроксимации специальных функций в полученном аналитическом решении для i -й составляющей плотности продольного тока можно привести к виду:

$$\delta_{ix} = S(-0,0772 - \ln(kr_i/2) + \frac{\sqrt{2}}{3}kh_i - j(\pi/4 - \frac{\sqrt{2}}{3}kh_i)),$$

где $k = \sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ – модуль волнового числа в водной среде;

$S = -j\frac{\omega\mu_0}{2\pi}\sigma I_{\phi} e^{j\phi_i}$, ϕ_i – фаза напряжения на i -ом проводе ВЛ.

Результаты расчета для трехфазной ВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением фазных проводов, пересекающих реку, приведены на рис. 7.

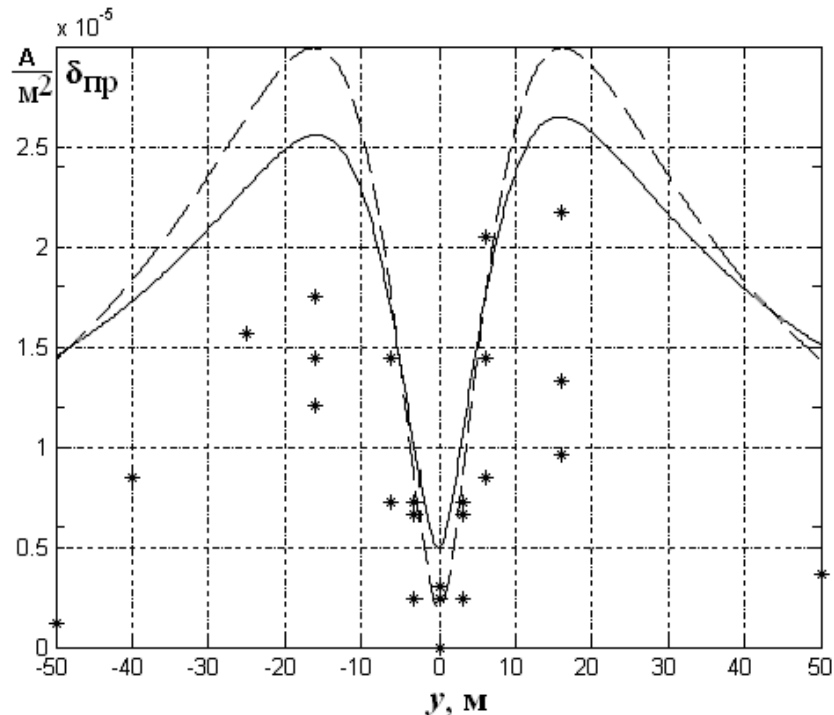


Рис. 7. Распределение плотности продольного тока в водной среде:

пунктирная линия – результат аналитического расчета;

сплошная линия – расчет численным методом;

звездочки – экспериментальные значения

Следует отметить, что во время эксперимента по ВЛ 500 кВ передавалась мощность, составляющая лишь $0,2P_{\text{нат}}$. Поэтому абсолютные значения плотности продольного тока были небольшими. На этом же рисунке нанесена кривая, полученная при численном решении уравнений (6) в среде FEMLAB. Результаты, полученные как аналитически, так и с помощью численного решения уравнений с помощью метода конечных элементов, достаточно близки. Наибольшее расхождение в результатах расчета и опыта наблюдается лишь при достаточном удалении от ВЛ. Это обстоятельство можно объяснить неучтенным влиянием как ВЛ 220 кВ, трасса которой проходит параллельно трассе ВЛ 500 кВ на небольшом удалении, так и токов, создаваемых в водоеме электрофицированной железной дорогой, находящейся достаточно близко от трассы ВЛ.

Выводы:

1. Разработанные математические модели квазистационарных электромагнитных полей и их методы решения могут быть использованы не только при решении рассмотренных в статье задач, но и при решении более широкого круга задач, связанного с вопросами передачи электрической энергии по надземным и подводным линиям электропередачи различного конструктивного исполнения.

2. В настоящее время аналитические методы решения могут иметь преимущества лишь при анализе характеристик тех или иных элементов ЛЭП в области высоких частот, так как учет поверхностного эффекта и эффекта близости в металлических элементах конструкций требует при высоких частотах большого объема памяти ЭВМ и ее высокой тактовой частоты.

3. Пакет FEMLAB, интегрированный в среду MATLAB, позволяет моделировать не только электромагнитные и электростатические поля в различном электроэнергетическом оборудовании, но одновременно решать и сопутствующие задачи (например, определять потери в элементах электропередачи, определять их погонные продольные и поперечные параметры и т.д.).

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кафедра Техники и электрофизики высоких напряжений, т. 46-11-79, e-mail: lavrov@mail.power.nstu.ru

УДК 629.439:517.968.2

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ЛЕВИТАЦИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА В ЗОНУ КОНЕЧНЫХ КРЕЙСЕРСКИХ СКОРОСТЕЙ

Я.А. Науменко, В.И. Астахов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Предлагается простая расчетная формула, позволяющая находить значения силы левитации электродинамического подвеса над рельсом конечной ширины в зоне конечных скоростей крейсерского режима. Для расчета необходимо знание лишь предельного значения силы левитации.

Рассмотрим силовое взаимодействие движущегося бесконечно длинного проводящего рельса и стационарного магнитного поля. Общее решение в случае бесконечной однородной полосы при произвольной скорости приведено в [1]. При условии $v\gamma \rightarrow \infty$ расчет вихревых токов в рельсе сводится к решению интегрального уравнения первого рода:

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{\bar{\sigma}(N)}{r_{NM}} dS_N = -\frac{\bar{A}^0(M)}{\mu} + \frac{\bar{C}(M)}{\mu}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}_n \bar{\sigma} = 0, M \in S, \bar{\sigma} \bar{v} = 0, M \in L,$$

где $\overline{A^0}(M)$ – потенциал невозмущенного магнитного поля внешних (заданных) источников; μ – магнитная проницаемость; $\overline{\sigma}$ – плотность поверхностных токов; r_{NM} – расстояние между точками N, M ; \overline{C} – некоторое потенциальное поле; L – край поверхности S ; \overline{v} – единичный вектор внешней нормали к L , лежащий с ней в одной плоскости.

Свойства уравнения (1) и метод его приближенного решения подробно рассмотрены в [2].

Опираясь на результаты [2] и [3], было создано программное обеспечение для приближенного решения уравнения (1). Используя теорию, построенную в [1], получим приближенное представление для силы левитации в зоне конечных скоростей:

$$F_L = F_L^\infty \left(1 - \frac{a_1}{2l\gamma^2 v^2} + \frac{a_2}{2l\gamma^4 v^4} - \frac{a_3}{2l\gamma^6 v^6} \right). \quad (2)$$

Здесь F_L^∞ – предельное значение силы левитации, которое получается при решении уравнения (1); v – модуль скорости рамки; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты экстраполяции.

На рисунке 1 изображен пример использования формулы (2). Здесь кривым 1, 2 и 3 соответствуют значения l , равные 0,5; 0,375 и 0,25 соответственно. Кривые с маркером a взяты из [1], кривые с маркером b рассчитаны по формуле (2). Коэффициенты a_1, a_2, a_3 приняты равными $2,623 \cdot 10^{19}$; $1,256 \cdot 10^{39}$; $2,201 \cdot 10^{58}$; $\gamma = 2,5 \cdot 10^7 (\hat{I} \hat{i} \cdot \hat{i})^{-1}$. Толщина рельса 0,0254 м.

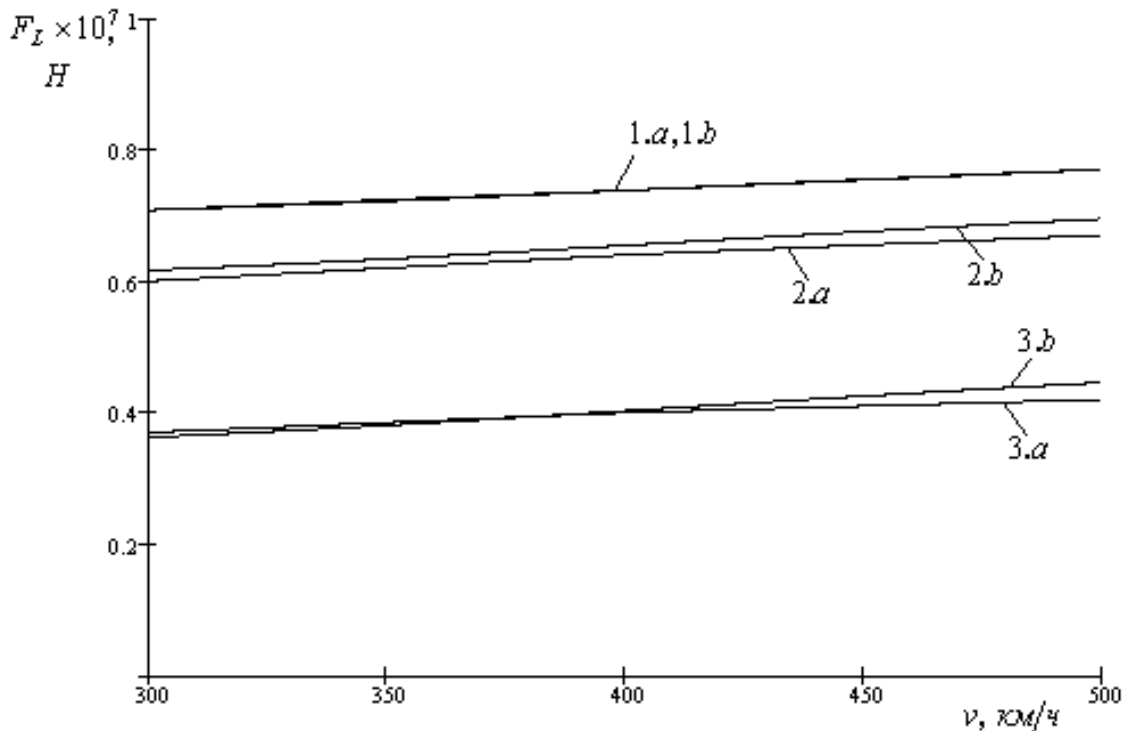


Рис. 1. Сила левитации в крейсерских режимах

Полученная экстраполяционная формула в сочетании с программным комплексом численного решения уравнения (1) позволяет упростить и ускорить инженерные расчеты, связанные с крейсерским режимом электродинамического подвеса ВСНТ.

Литература

1. Астахов В.И. Математическое моделирование инженерных задач в электротехнике. – Новочеркасск, 1994.
2. Науменко Я.А., Астахов В.И. Математическое моделирование магнитного поля в присутствии идеально проводящей пластины // Изв. вузов. Электромеханика. – 2003. – № 5. – С. 11-16.
3. Науменко Я.А., Астахов В.И. Ускорение формирования матрицы Грама энергетического пространства интегрального оператора // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 2003. – Спецвыпуск. – С. 116-117.

346421, г. Новочеркасск, ул. Буденновская, 183-29, т. 6-77-39, e-mail: jan@novoch.ru

УДК 539.2:535.343.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОПРОПУСКАНИЯ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА

Е.Г. Кисилёв, О.В. Кондаков, В.В. Токарев

Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

Предложен метод анализа результатов магнитооптического эксперимента, в котором наблюдаются межзонные и внутризонные переходы электронов между уровнями Ландау валентной зоны и зоны проводимости в точке L зоны Бриллюэна висмута и сплавов висмут-сурьма. Метод заключается в численном расчете зависимости интенсивности полезного сигнала от величины магнитного поля. Электромагнитное поле в рассматриваемом планарном волноводе рассматривается классически, а свойства вещества учитываются методами квантовой механики.

Наиболее правильным, хотя и наиболее сложным путем анализа результатов магнитооптического эксперимента является моделирование формы линии магнитооптического эксперимента, когда в результате применения той или иной модели удастся в деталях восстановить полевой ход экспериментальной кривой [1].

Задача описания взаимодействия лазерного электромагнитного излучения, распространяющегося в зазоре между двумя трансляционно-симметричными половинками монокристалла висмута, находящегося в квантующем магнитном поле (рис. 1), решается в два этапа. Электромагнитное излучение рассматривается классически, а вещество – средствами квантовой механики. Так как исследуемые материалы – полуметалл висмут и сплавы висмут-сурьма, вещества с резко анизотропными свойствами, то вещество учитывается тензором диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$, все девять компонент которого отличны от нуля [2].

Действуя, как предложено в работе [3], будем искать решение системы уравнений Максвелла для среды (1) в виде:

$$\vec{E} = \vec{E}^{(1)} \exp(-\alpha z) \exp(i(\omega t - q_y y)), \quad (1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля электромагнитной волны; α – поперечное волновое число; ω – циклическая частота электромагнитной волны; q_y – продольное волновое число, индекс (1) означает, что комплексная амплитуда относится к среде (1) (рис. 1).

Решение волнового уравнения для вакуума (0) (рис. 1) надо искать в виде, аналогичном выражению (1).

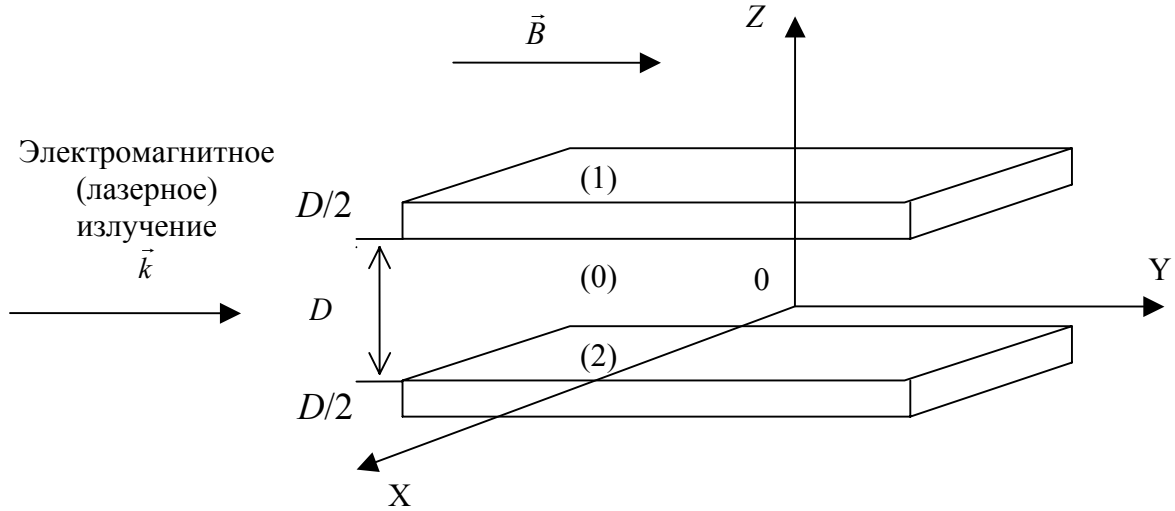


Рис. 1. Взаимное расположение вектора индукции магнитного поля, волнового вектора электромагнитного излучения и исследуемого монокристалла относительно выбранной системы координат: D – расстояние между стенками СПЛ; $Z = +D/2$ – координата поверхности верхнего образца; $Z = -D/2$ – координата поверхности нижнего образца

Легко показать, что между стенками СПЛ распространяется плоская неоднородная волна в направлении оси OY . В плоскости фронта волны $y = \text{const}$ распределение поля имеет вид стоячей волны [4].

Ось вращения второго порядка, направленная по оси OY , позволяет классифицировать компоненты амплитуд электрического поля волны, распространяющейся в симметричной полосковой линии, на четные и нечетные функции от z [5].

Дисперсионное уравнение для случая, когда E_y – нечетная (E_x , E_z – четные) функции от z [2]:

$$\begin{aligned} & C_2 \left(\alpha_2 + \alpha_0 \operatorname{th} \left(\frac{\alpha_0 D}{2} \right) \right) \left(\alpha_0 L_1 \operatorname{th} \left(\frac{\alpha_0 D}{2} \right) - k_0^2 B_1 \right) - \\ & - C_1 \left(\alpha_1 + \alpha_0 \operatorname{th} \left(\frac{\alpha_0 D}{2} \right) \right) \left(\alpha_0 L_2 \operatorname{th} \left(\frac{\alpha_0 D}{2} \right) - k_0^2 B_2 \right) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_i , L_i , B_i – некоторые функции компонент тензора диэлектрической проницаемости.

В расчетах удобно сравнивать энергию, переносимую волной при некотором значении магнитного поля B , с энергией, переносимой волной при $B=0$.

Можно получить:

$$T(B) = \frac{\left\{ \frac{\operatorname{sh}\{\alpha'_0(B)D\}}{\alpha'_0(B)} + \frac{\sin\{\alpha''_0(B)D\}}{\alpha''_0(B)} \right\}}{\left\{ \frac{\operatorname{sh}\{\alpha'_0(0)D\}}{\alpha'_0(0)} + \frac{\sin\{\alpha''_0(0)D\}}{\alpha''_0(0)} \right\}} \cdot 1,06 \cdot \exp\left\{2L[q''_y(B) - q''_y(0)]\right\}. \quad (3)$$

Первый сомножитель в выражении (3) для коэффициента пропускания полосковой линии во всей исследуемой области принимает значение $0,99985 \pm 0,00015$. Поэтому с точностью не менее 0,015 % – это константа равна 0,99985. Таким образом,

$$T(B) = 1,08 \cdot \exp\left\{2L[q''_y(B) - q''_y(0)]\right\}.$$

Таким образом, получено достаточно простое выражение для расчета коэффициента пропускания симметричной полосковой линии.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$ являются параметрами дисперсионного уравнения (2) и определяют коэффициент пропускания полосковой линии.

Тензор диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$:

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}_l + \frac{\hat{\sigma}}{i \cdot \omega \cdot \epsilon_0},$$

где ω – круговая частота, падающего электромагнитного излучения; ϵ_l – диэлектрическая проницаемость, обусловленная всеми процессами, за исключением межзонных и внутризонных переходов на уровнях Ландау; ϵ_0 – электрическая постоянная, $\hat{\sigma}$ – комплексная удельная электропроводность, связан с тензором комплексной удельной электропроводности $\hat{\sigma}$:

$$\hat{\sigma}_{\alpha\beta} = -e^2 \cdot \sum_{l,l'} \frac{(f_l - f_{l'}) \cdot \langle l | V_\alpha | l' \rangle \cdot \langle l' | V_\beta | l \rangle}{(E_l - E_{l'}) \cdot \left(\left(\frac{i}{h} \right) \cdot (E_l - E_{l'}) - i \cdot \omega + \frac{1}{\tau} \right)},$$

где α, β – индексы, означающие оси координат, $\alpha, \beta=1,2,3$; e – заряд электрона; l, l' – полные наборы квантовых чисел, характеризующие начальные l и конечные l' состояния; V_α и V_β – операторы скорости; τ – время релаксации; $f_l, f_{l'}$ – распределения Ферми для электронов, находящихся на уровнях Ландау с наборами квантовых чисел l, l' .

$$f_l = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_l - E_f}{k_0 \cdot T}\right)},$$

где E_f – энергия Ферми; k_0 – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, при которой находится исследуемый кристалл.

Полный набор квантовых чисел l, l' включает в себя: индекс зоны «+» – проводимости, «-» – валентной зоны; n – номер уровня Ландау; $s=\pm 1/2$ – спиновое квантовое число; $E_l, E_{l'}$ – энергии уровней Ландау начальных l' и конечных l состояний.

$\langle l | V_\alpha | l' \rangle$ – матричный элемент оператора скорости.

Расчет матричных элементов оператора скорости проводился в приближении тензора эффективных масс. В рамках модифицированной модели Бараффа рассчитаны матричные элементы оператора скорости для всех возможных межзонных и внутризонных разрешенных и запрещенных переходов электронов между уровнями Ландау валентной зоны и зоны проводимости.

Для запрещенных переходов матричные элементы оператора скорости линейно зависят от компоненты волнового вектора вдоль направления вектора индукции магнитного поля.

Таким образом, теоретическая модель, которая включает в себя процесс распространения электромагнитных волн в планарном волноводе, учитываемый классически, и взаимодействие электромагнитного излучения с носителями заряда, располагающимися на уровнях Ландау, учитываемое средствами квантовой механики, позволяет описать целый ряд явлений таких, как межзонные и внутризонные разрешенные и запрещенные переходы носителей заряда, наличие и характер взаимодействия нулевых уровней Ландау валентной зоны и зоны проводимости, электрон-фононное взаимодействие в присутствии магнитного поля.

Сравнение экспериментальных и расчетных спектров показало, что теоретический расчет позволяет детально описать все наблюдаемые экспериментально магнитооптические спектры.

Литература

1. Кондаков О.В., Иванов К.Г. Расчет формы линии магнитооптического эксперимента в геометрии Фарадея // Тезисы 5-й межвуз. конф. молодых ученых. – Липецк, ЛГПИ, 1991.
2. Субмиллиметровая полосковая линия из висмута в магнитном поле // ЖТФ / В.Г. Голубев, В.Н. Евсеев, К.Г. Иванов, В.И. Иванов-Омский. – 1980. – Т. 50. – С. 1992-1997.
3. Chiu K.W., Quinn J.J. Magneto-Plasma Surface Waves in Solids // Il Nuovo Cimento. – 1972. – V. 10. – № 1. – P. 1-20.
4. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа. – 1961. – 371 с.
5. Евсеев В.Н. Исследование диэлектрических свойств Bi и сплавов BiSb в магнитном поле в субмиллиметровой области спектра: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Л., 1981. – 15 с.

399770, г. Елец, ул. Королёва, 21, кв. 52, т. 8-07467-78196,

399770, г. Елец, ул. Разина, 21-а, кв. 24, т. 8-07467-49387,

e-mail: eloleg@gw-el.lipetsk.su

396813, село Гремяче, Хохольский район, Воронежская обл., ул. Чкалова, 18, т. 8-07371-91440.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

А.С. Ладанов

Липецкий государственный технический университет

Получены выражения для потоков воздействий различной структуры (качества электроэнергии, изменения технологического процесса), позволяющие оценить их влияние на элементы системы электроснабжения.

Различные многофакторные воздействия на технологическое и электрическое оборудование цехов промышленных предприятий возникают дискретно и при определенных условиях вызывают отказы объектов, т.е. появление пауз. В практике анализа надежности используются различные модели отказов при внешних воздействиях [1-4], к которым можно отнести и воздействие показателей качества электроэнергии и технологические. Представим выражения для показателей надежности конкретных моделей при стационарном пуассоновском потоке, которые можно определить на основе трансформации характеристик потоков воздействий в характеристики потоков пауз (отказов) с учетом условия $\bar{p} = \text{const}$.

Стационарный пуассоновский поток обладает свойствами ординарности и отсутствия последствия, т.е. представляет собой простейший поток. Основным его параметром является плотность (частота) событий $\bar{\mu}$ – среднее число событий за единицу времени. Через параметр $\bar{\mu}$ выражаются все основные характеристики потока. Математическое ожидание числа событий за время t равно

$$q = \bar{\mu} \cdot t.$$

Вероятность \bar{p}_m появления m событий за время t определяется по формуле Пуассона

$$\bar{p}_m = \frac{q^m}{m!} e^{-q}. \quad (1)$$

Установим показатели надежности объекта при простейшем потоке внешних воздействии. Значение функции надежности $P(t)$ определяется вероятностью безотказной работы в интервале $(0, t)$. При $t = 0$ воздействия отсутствуют и вероятность безотказной работы равна единице. При первом воздействии вероятность паузы (отказа) – $(1-p)$, при втором воздействии с учетом того обстоятельства, что объект отказал при первом, вероятность безотказной работы $(1-p)^2$ и т.д. В потоке Пуассона за время t может возникнуть произвольное число воздействий и поэтому значение надежности $\bar{P}(t)$ в момент t является дискретной случайной величиной

$$\bar{P}_m(t) = (1-p)^m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

Определив для времени t по формуле (1) вероятности отдельных значений случайной величины $\bar{P}_m(t)$, можно установить среднее значение функции надежности

$$\bar{P}(t) = \frac{\sum_{m=0}^{\infty} (1-p)^m q^m}{m!} e^{-q} = e^{-q \cdot \bar{p}} = e^{-\bar{p} \cdot \bar{\mu} \cdot t}.$$

Таким образом, время безотказной работы объекта при пуассоновском стационарном потоке внешних воздействий распределяется по экспоненциальному закону. Плотность распределения

$$\beta(t) = -\frac{d\bar{P}(t)}{dt} = \bar{p} \cdot \bar{\mu} \cdot e^{-\bar{p} \cdot \bar{\mu} \cdot t}.$$

Интенсивность пауз объекта

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t)}{\bar{P}(t)} = \bar{p} \cdot \bar{\mu}.$$

Среднее время безотказной работы

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} \bar{P}(t) dt = \frac{1}{\bar{p} \cdot \bar{\mu}}.$$

Из сравнения характеристик потока воздействий [2] и полученных характеристик потока пауз (показатель надежности – отказ оборудования) видно, что поток пауз также является стационарным пуассоновским потоком. При переходе от потока воздействий к потоку отказов произошло линейное преобразование, множителем которого является вероятность отказа \bar{p} .

Рассмотрим нестационарный пуассоновский поток. Этот вид потока также обладает свойствами ординарности и отсутствием последствия, но будет нестационарным при рассмотрении характеристик на некотором интервале времени, требует фиксации начала этого интервала момента t_0 . Основной характеристикой потока является плотность $\bar{\mu}(t)$. Вероятность появления m событий за время t , т.е. на участке от t_0 до $t_0 + t$, определяется аналогично простейшему потоку по формуле Пуассона (1), но среднее значение событий x на интервале $(t_0; t_0 + t)$ рассчитывается теперь по выражению

$$a = \int_{t_0}^{t_0+t} \bar{\mu}(t) dt.$$

Переходя к потоку пауз аналогично стационарному Пуассоновскому потоку получаем на интервале $(t_0; t_0 + t)$:

$$\bar{P}(t) = e^{-\bar{p} \cdot a} = e^{-\bar{p} \int_{t_0}^{t_0+t} \bar{\mu}(t) dt}; \quad (2)$$

$$\beta(t) = \bar{p} \cdot \bar{\mu} \cdot e^{-\bar{p} \int_{t_0}^{t_0+t} \bar{\mu}(t) dt}; \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \bar{p} \cdot \bar{\mu}(t_0 + t); \quad (4)$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{t}{\int_{t_0}^{t_0+t} \bar{\mu}(t) dt}. \quad (5)$$

Следовательно, для нестационарного Пуассоновского потока воздействий показатели надежности работы объекта в интервале времени

$(t_0; t_0 + t)$, определяемые выражениями (2)-(5) зависят от значения вероятности \bar{p} , момента t_0 и вида функции $\bar{\mu}(t)$. Например, при линейной функции

$$\bar{\mu}(t) = k \cdot t + b.$$

Выражение для плотности распределения безотказности работы объекта приобретает вид

$$\beta(t) = \bar{p} \cdot \bar{\mu}(t_0 + t) \cdot e^{-\bar{p} \cdot (b \cdot t + k \cdot t_0 t + k \cdot t^2 / 2)}.$$

Возможность определения показателей надежности при различных выражениях $\bar{\mu}(t)$ делает нестационарный пуассоновский поток универсальным в отношении замещения различных нестационарных потоков внешних воздействий.

Далее рассмотрим регулярный поток. В этом потоке события удалены друг от друга на равные интервалы T . Он является ординарным стационарным потоком с сильно выраженным последствием, поскольку моменты появления последующих друг за другом событий связаны жесткой функциональной зависимостью. Плотность событий потока равна

$$\bar{\mu} = 1/T = \text{const.}$$

При i -ом воздействии, т.е. за время $t_i = i \cdot T$, вероятность безотказной работы равна

$$\bar{P}(t_i) = (1 - p)^i = (1 - p)^{t_i / T} = (1 - p)^{\bar{\mu} t_i}.$$

Для объекта, подвергающегося регулярным внешним воздействиям, показатели надежности имеют вид:

$$\bar{P}(t) = (1 - p)^{\bar{\mu} t};$$

$$\beta(t) = -\bar{\mu} \cdot (1 - p)^{\bar{\mu} t} \cdot \ln(1 - p).$$

$$\lambda(t) = -\bar{\mu} \cdot \ln(1 - p);$$

$$T_{\text{ср}}(t) = -(\bar{\mu} \cdot \ln(1 - p))^{-1}.$$

В заключение можно заметить, что простейший поток, предоставляя удобные для анализа простые зависимости, является в то же время универсальным. Часто при потоках воздействий, отличающихся от простейших потоков, можно получить удовлетворительные по точности результаты, заменив поток любой структуры простейшим с той же плотностью.

В работе использованы результаты исследований, проведенных при финансовой поддержке в форме гранта Минобразования РФ (А03-3.14-487).

Литература

1. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Огарков Н.М. Случайные потоки в решениях вероятностных задач: Учеб. пособие. Ч. 1 и Ч. 2. – Липецк: ЛГТУ, 1999. – 160 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 250 с.
3. Гнеденко Б.В. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
4. Тихонов В.И. Статическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 678 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ТОКА ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ, ИСКАЖАЮЩИХ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.С. Ладанов

Липецкий государственный технический университет

Предложена и исследована общая математическая модель для определения тока и напряжения ν -й гармоники в электрической сети от нескольких источников гармоник. Модель основывается на теории случайных процессов. Установлено, что распределение вектора результирующего тока (напряжения) ν -й гармоники при числе источников $n \geq 5$ подчиняется двумерному нормальному закону, а распределение его модуля – нормальному.

В системах электроснабжения современных металлургических предприятий получают питание от шин подстанции, как правило, сразу несколько источников высших гармонических составляющих (ВГС) [1-2]. Напряжение питающей сети при этом изменяется во времени случайным образом. Поэтому формирование результирующих спектров тока и напряжения в системе электроснабжения происходит в соответствии с вероятностными законами. Физическая картина этого явления представляется достаточно четко. Известно, сколько и каких источников высших гармоник имеется в каждом узле электрической сети, их мощность, закон управления, диапазон и характер изменения нагрузки.

Экспериментальное определение статистических функций распределения токов и напряжений высших гармоник в электрических сетях, питающих нелинейные нагрузки, в широком диапазоне частот с помощью применяемых в настоящее время анализаторов гармоник, измерительных фильтров или непосредственно осциллографирования несинусоидальных кривых с последующем разложением их в ряд Фурье представляет собой слишком трудоемкую операцию.

Также возможные значения вещественной и мнимой составляющих тока ν -й гармоники каждого источника, подключенного в рассматриваемом узле системы электроснабжения, ограничены некоторым конечным интервалом. При увеличении числа источников есть основание считать, что закон распределения суммарного вектора $\dot{I}_{\nu\Sigma}$ с ростом n асимптотически приближается к двумерному распределению в силу центральной предельной теоремы для многомерных случайных величин [3].

На основании вышеизложенного предлагается общая математическая модель случайной величины тока (напряжения) ν -й гармоники в электрической сети предприятия при наличии в узле нескольких, практически одинаковых по мощности источников ВГС. Случайная векторная величина тока ν -й гармоники $\dot{I}_{\nu i}$ каждого i -го источника характеризуется двумерным законом распределения (модулем и фазой, или вещественной и мнимой со-

ставляющей), вид которого зависит от закона управления и характера изменения нагрузки источника ВГС. Двумерный нормальный закон распределения результирующего тока v -й гармоники $I_{v\Sigma}$ выражается формулой [4]:

$$F(I_{a\Sigma}, I_{p\Sigma}) = \frac{e^{-\frac{1}{2(1-r_{ap}^2)}}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{I_{a\Sigma}} \cdot \sigma_{I_{p\Sigma}} - \sqrt{1-r_{ap}^2}} \times$$

$$\times \left[\frac{(I_{a\Sigma} - M_{I_{a\Sigma}})^2}{\sigma_{I_{a\Sigma}}^2} - \frac{2 \cdot r_{ap} \cdot (I_{a\Sigma} - M_{I_{a\Sigma}}) \cdot (I_{p\Sigma} - M_{I_{p\Sigma}})}{\sigma_{I_{a\Sigma}} \cdot \sigma_{I_{p\Sigma}}} + \frac{(I_{p\Sigma} - M_{I_{p\Sigma}})^2}{\sigma_{I_{p\Sigma}}^2} \right], \quad (1)$$

где $M_{I_{a\Sigma}}$, $M_{I_{p\Sigma}}$ – математические ожидания соответственно вещественной и мнимой составляющих вектора тока $\dot{I}_{v\Sigma}$; $\sigma_{I_{a\Sigma}}$, $\sigma_{I_{p\Sigma}}$ – среднеквадратические отклонения вектора тока $\dot{I}_{v\Sigma}$; r_{ap} – коэффициент корреляции величин $I_{av\Sigma}$ и $I_{pv\Sigma}$.

Для определения закона распределения модуля и фазы вектора $\dot{I}_{v\Sigma}$ следует перейти от декартовой системы координат к полярной. Якобиан преобразования от переменных $I_{a\Sigma}$ и $I_{p\Sigma}$ к переменным I , φ равен

$$\frac{\partial(I_{av\Sigma}, I_{pv\Sigma})}{\partial(I, \varphi)} = \begin{vmatrix} \cos \varphi - I \cdot \sin \varphi \\ \sin \varphi - I \cos \varphi \end{vmatrix} = I.$$

Двумерный закон распределения (1) в полярных координатах примет вид

$$F(I, \varphi) = \frac{I \cdot e^{-\frac{1}{2(1-r_{ap}^2)}}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{I_{a\Sigma}} \cdot \sigma_{I_{p\Sigma}} - \sqrt{1-r_{ap}^2}} \times$$

$$\times \left[\frac{(I \cdot \cos \varphi - M_{I_{a\Sigma}})^2}{\sigma_{I_{a\Sigma}}^2} - \frac{2 \cdot r_{ap} \cdot (I \cdot \cos \varphi - M_{I_{a\Sigma}}) \cdot (I \cdot \sin \varphi - M_{I_{p\Sigma}})}{\sigma_{I_{a\Sigma}} \cdot \sigma_{I_{p\Sigma}}} + \frac{(I \cdot \sin \varphi - M_{I_{p\Sigma}})^2}{\sigma_{I_{p\Sigma}}^2} \right]. \quad (2)$$

Определим из выражения (2) одномерную плотность распределения амплитуды огибающей, проинтегрировав его по φ в интервале возможных значений $0 \leq \varphi \leq 2 \cdot \pi$. Для нахождения одномерного распределения фазы надо проинтегрировать выражение (2) по I в пределах от 0 до ∞ .

В самом простом случае, когда вещественная и мнимая составляющие результирующего вектора $\dot{I}_{v\Sigma}$ независимыми и распределены нормально с одинаковыми отклонениям, т.е.

$$\begin{aligned}\sigma_{I_{a\Sigma}} &= \sigma_{I_{p\Sigma}} = \sigma, \\ r_{ap} &= 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Из (2) интегрируем по φ , получаем одномерную плотность распределения огибающей тока [4]:

$$F(I) = \frac{I}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{I^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{I\alpha}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где $\alpha = \sqrt{M_{I_{a\Sigma}}^2 + M_{I_{p\Sigma}}^2}$; $I_0\left(\frac{I\alpha}{\sigma^2}\right)$ – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента.

Выражение (4) при $M_{I_{a\Sigma}} = M_{I_{p\Sigma}} = 0$ представляет собой распределение Релея

$$F(I) = \frac{I}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{I^2}{2\sigma^2}}.$$

Практически при $\alpha/\sigma \geq 2$ закон распределения аргумента (модуля) тока (4) почти нормальный. В [5] получены приближенные выражения для определения математического ожидания и дисперсии модуля вектора, справедливые при $\alpha \gg \sigma$

$$\left. \begin{aligned} M_I &\approx \alpha \cdot \left(1 + \frac{\sigma^2}{2 \cdot \alpha^2}\right); \\ D_I &\approx \sigma^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma^2}{4 \cdot \alpha^2}\right). \end{aligned} \right\}$$

Одномерное распределение фазы вектора при выполнении условий (3) определяется выражением

$$F(\varphi) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} + \frac{\alpha \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} F\left[\frac{\alpha}{\sigma} \cos(\varphi - \varphi_0)\right] e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \sin^2(\varphi - \varphi_0)}, \quad (5)$$

где $\varphi_0 = \arctg \frac{M_{I_{p\Sigma}}}{M_{I_{a\Sigma}}}$, $|\varphi - \varphi_0| \leq \pi$; F – функция Лапласа.

Математические ожидания и дисперсии определяются как [4]:

$$\left. \begin{aligned} M_\varphi &= \varphi_0 = \arctg \frac{M_{I_{p\Sigma}}}{M_{I_{a\Sigma}}}; \\ D_\varphi &= \frac{\pi^2}{3} + 4 \cdot \pi \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a_n}{n^2}, \end{aligned} \right\}$$

где $a_n = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{n}{2}\right) \left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)^n}{\pi n! \sqrt{2^n}} {}_1F_1\left(\frac{n}{2}, n+1, -\frac{\alpha^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$; Γ – гамма-функция; ${}_1F_1$ – вырожденная гипергеометрическая функция.

Практически при $\alpha/\sigma \geq 2$ закон распределения фазы тока (5) почти нормальный. При условии $\sigma_{I_{a\Sigma}} \neq \sigma_{I_{p\Sigma}}$, $r_{ap} = 0$ интегрированием (2) по φ получим формулу для плотности вероятности распределения аргумента огибающей тока:

$$F(I) = \frac{I}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} e^{-\frac{I^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} \right)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m_1^2}{\sigma_1} + \frac{m_2^2}{\sigma_2} \right)} \left\{ I_0 \left[-\frac{I^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \right] \times \right. \\ \times I_0 \left[I \sqrt{\frac{m_1^2}{\sigma_1} + \frac{m_2^2}{\sigma_2}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n I_n \left[\frac{I^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \right] \right] \times \\ \left. \times I_n \left[\sqrt{\frac{m_1^2}{\sigma_1} + \frac{m_2^2}{\sigma_2}} \right] \cdot \cos \left(2n \arctg \frac{m_2 \cdot \sigma_1^2}{m_1 \cdot \sigma_2^2} \right) \right\}, \quad (6)$$

где $m_1 = M_{I_{a\Sigma}}$, $m_2 = M_{I_{p\Sigma}}$, $\sigma_1 = \sigma_{I_{a\Sigma}}$, $\sigma_2 = \sigma_{I_{p\Sigma}}$; I_n – функция Бесселя n -го порядка от мнимого аргумента.

В частном случае при $M_{I_{p\Sigma}} = M_{I_{a\Sigma}}$ из (6) получается формула

$$F(I) = \frac{I}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot e^{-\frac{I^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} \right)} \cdot I_0 \left[\frac{I^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \right].$$

Для наиболее общего случая выражение закона распределения модуля тока \dot{I}_{Σ} определяется по (6). Предварительно используем приведение вектора тока к некоррелированным составляющим известным методом поворота осей координат на угол α с перерасчетом математических ожиданий и среднеквадратических отклонений по формулам, приведенным в [3].

Результаты расчетов показали, что кривая плотности распределения тока имеет положительную асимметрию и близка по виду к принятым кривым [5]. Предельный вид закона распределения модуля вектора \dot{I}_{Σ} – одномерный нормальный закон. Из числа канонических гармоник этот закон может иметь место только для некомпенсированных гармоник 5, 7, 17 и т.д.

В работе использованы результаты исследований, проведенных при финансовой поддержке в форме гранта Минобразования РФ (А03-3.14-487).

Литература

1. Жежеленко И.В. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
2. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 260 с.
3. Тихонов В.И. Статическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966. – 678 с.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 250 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М: Советское радио, 1969. – 752 с.

398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, ауд. 209, кафедра «Электрооборудования»,
ЛГТУ, т. 8-(0742)-328-049, e-mail: cupt@lipetsk.ru

УДК 532.13.08

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОВОДНОСТИ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Б.А. Соломин, А.М. Ходаков

Ульяновское отделение института радиотехники и электроники РАН

Рассматривается обратная задача определения зависимости коэффициента температуропроводности жидкости от температуры (T), при $T < 0$.

Решение обратных задач по определению зависимости теплофизических характеристик жидкости от температуры, является одной из основных частей расчетных математических моделей температурного эксперимента. Формулировка обратных задач состоит из двух составляющих [1]:

- 1) модель исследуемого процесса;
- 2) модель получения с помощью эксперимента дополнительной информации о функции состояния.

Геометрия схемы установки для определения температуры жидкости от времени $T_D(t)$ представлена на рис. 1. Датчик температуры D помещен на расстоянии z_0 в цилиндрическую кювету K , заполненную жидкостью.

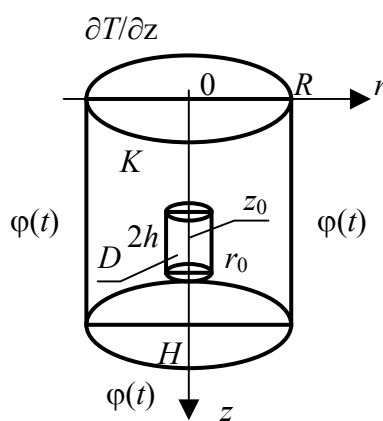


Рис. 1. Геометрия системы

Ко дну кюветы прикладывается тепловой поток, который обеспечивает заданное распределение температуры кюветы

$$T_k(t) = T_0 + \varphi(t),$$

где T_0 – температура окружающей среды.

Краевая задача теплопроводности будет:

уравнение
$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\text{grad}T); \quad (1)$$

где c , ρ , λ – удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность жидкости; $T=T_D - T_0$; $a(T)=c\rho/\lambda$ – коэффициент температуропроводности.

Начальное условие $T(r, z, t) = 0$; (2)

граничные условия $T(R, z, t) = \varphi(t)$; $T(r, H, t) = \varphi(t)$; $\partial T / \partial z|_{z=0} = 0$, (3)

где $\varphi(t) = -pt$ ($p \geq 0$ – темп спада температуры), а $T(0, z, t) \neq \infty$.

На первом этапе решения задачи (1)-(3) предполагаем, что $a=a_0$, постоянному начальному значению. Тогда средняя температура по датчику

$$\begin{aligned} \bar{T}(t) = -pt + \frac{8HRp}{\pi^2 r_0 h} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{J_1\left(\mu_k \frac{r_0}{R}\right)}{\mu_k^2 \left(n - \frac{1}{2}\right)^2 J_1(\mu_k)} \times \\ \times \sin\left[\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi h}{H}\right] \cos\left[\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi z_0}{H}\right] \frac{[1 - \exp(-aFt)]}{aF}, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_k – корни уравнения $J_0(\mu)=0$; J_0 и J_1 – функции Бесселя 0-го и 1-го порядков; $F=(\mu_k^2/R^2)+[(n-1/2)\pi/H]^2$.

Расчеты показали, что основной вклад в сумму ряда дает первый член ($k=1, n=1$), поэтому можно воспользоваться приближением регулярного теплового режима второго рода [2]. На рис. 2 представлены линейные участки экспериментальных температурных зависимостей для кюветы и датчика (кривые 1 и 2), полученные для дизельного топлива. Из различия темпов спада этих кривых видно, что режим является квазирегулярным, так как $a=f(T)$. Необходимо решать задачу (1)-(3) на отдельных временных интервалах, внутри которых a считается постоянным. Температура в конце каждого расчетного промежутка является начальной для следующего и служит основанием для задания нового a . Само его значение определяется из численного решения нелинейного уравнения (4) при указанном приближении, с экспериментально найденной температурой датчика T_D в левой части. На рис. 3 представлена расчетная зависимость $a(T)$ для ранее рассмотренного дизельного топлива.

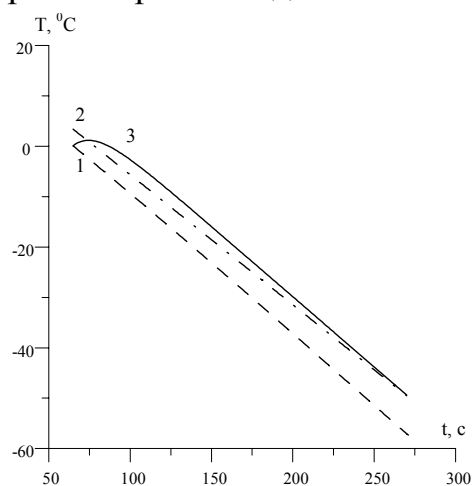


Рис. 2. Температурные режимы:
1 – кюветы; 2 – датчика; 3 – расчет

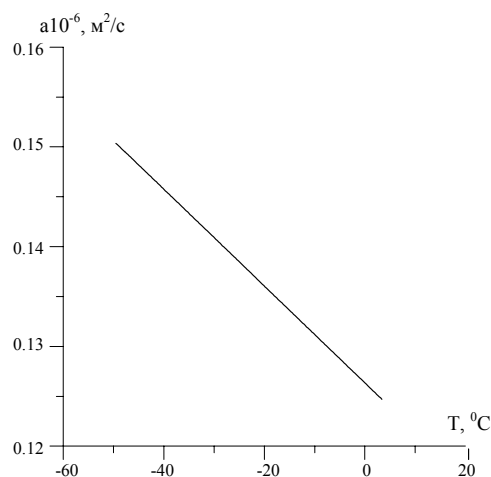


Рис. 3. Зависимость температуропроводности от температуры

Работа выполнена при поддержке программы «Интеграция», проект Б0107.

Литература

1. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
2. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 408 с.

432011, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48, т. 44-29-96, e-mail: ufire@mv.ru

УДК 621.18.001.24:519.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ КОЛЛЕКТОРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ГРАФОВ

А.А. Белов, А.Б. Баранников

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Для коллекторного теплообменника рассмотрены различные расчетные схемы. Собирающий и раздающий коллекторы в этих схемах представлены в виде многополюсников. Предложены два варианта таких многополюсников с соответствующими математическими моделями.

Гидравлическую систему котлов можно представить как систему теплообменников, подавляющее большинство которых имеют собирающие и раздающие коллекторы (рис. 1), которые могут быть расположены в пространстве различным образом (горизонтальные, вертикальные, наклонные).

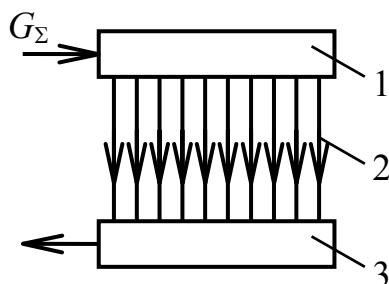


Рис. 1. Схема коллекторного теплообменника:

1 – раздающий коллектор; 2 – собирающий;
3 – теплообменные трубы (N штук); G_{Σ} – суммарный расход среды через теплообменник, кг/с

Кроме котельных агрегатов, теплообменные аппараты коллекторного типа широко применяются в технических устройствах теплоэнергетики, тепло- и газоснабжении, атомной энергетике и т.д. Адекватное описание таких аппаратов необходимо для определения их надежности и экономической эффективности.

При математическом моделировании гидродинамики необходимо перейти от реальной схемы к расчетной. Из множества расчетных схем можно выделить три схемы, которые наиболее часто встречаются на практике (рис. 2).

В изображенной на рис. 2,а расчетной схеме N различных по геометрии, коллекторному эффекту и тепловосприятию теплообменных труб заменены на N абсолютно одинаковых каналов, т.е. при переходе от реальной схемы рис. 1 произошло осреднение N труб ($G_{\Sigma} = \bar{G}$).

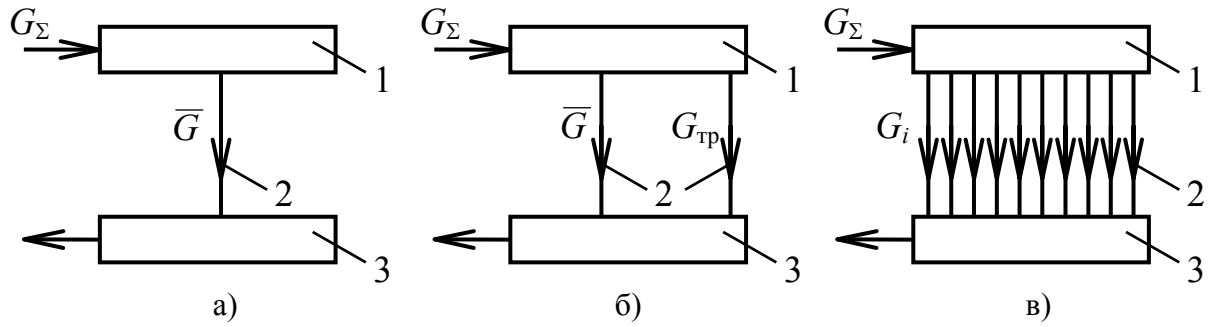


Рис. 2. Расчетные схемы коллекторного теплообменника:

1, 2, 3 соответствуют элементам рис. 1

В расчетной схеме, представленной на рис. 2,б, N исходных труб заменены $(N - 1)$ осредненными трубами с общим расходом \bar{G} и одной развернутой трубой с расходом $G_{тр}$.

Представленная на рис. 2,в расчетная схема полностью повторяет реальную схему коллекторного теплообменника, без каких-либо усреднений (G_i – массовый расход в i -й трубе).

При переходе к графовой схеме необходимо расчетные элементы коллекторного теплообменника (рис. 2) заменить на дуги графа (рис. 3).

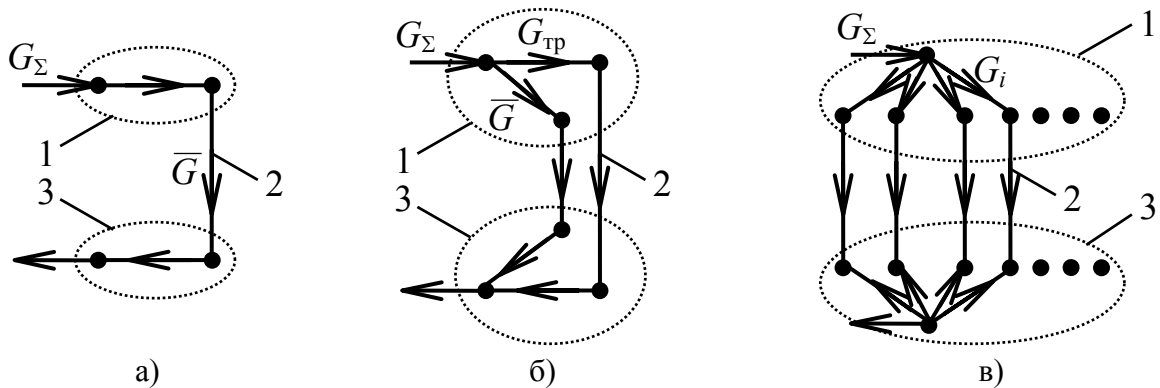


Рис. 3. Графовые расчетные схемы коллекторного теплообменника:

1, 2, 3 соответствуют элементам рис. 1

Отобразить коллекторы для расчетных схем, изображенных на рис. 2,б и 2,в с помощью независимых дуг графа, не удастся. Поэтому пришлось использовать многополюсники, которые на рис. 3 отмечены пунктирной линией. Одиночные дуги (рис. 2,а) можно рассматривать как частный случай многополюсников.

Все многополюсники, показанные на рис. 3, следующей системой уравнений для поперечной G и продольной ΔP переменной:

$$\left. \begin{aligned} G_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^N G_i \\ \Delta P_i &= B_i \cdot \frac{G_{\Sigma}^2}{2 \cdot \rho \cdot F^2} + \Delta P_i^H \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где ΔP_i – изменение давления от входа (выхода) коллектора до места присоединения к нему i -й трубы, Па; B_i – коэффициент, отражающий выше-

указанное изменение давления из-за ускорения среды и вязкости [1, 2]; ΔP_i^H – нивелирная составляющая перепада давления ΔP_i , Па; ρ – плотность среды, кг/м³; F – площадь проходного сечения коллектора, м².

Плотность среды определяется по параметрам потока на входе для раздающего коллектора и по параметрам на выходе – для собирающего.

$$\Delta P_i^H = \rho \cdot g \cdot h_i,$$

где h_i – высота между входом для собирающего коллектора (выходом для раздающего) и местом подсоединения к нему i -й трубы; $h_i < 0$ для опускного движения и $h_i > 0$ – для подъемного.

Заметим, что B_i также, как и h_i , может быть положительным и отрицательным: $B_i < 0$, если коллектор раздающий и $B_i > 0$, если он собирающий.

Представление коллектора-многополюсника в виде N -лучевой звезды, использованное на рис. 3, не является единственно возможным. На рис. 4 показан другой вариант графового представления коллекторного теплообменника, изображенного на рис. 3, в.

Математическая модель для коллекторов-многополюсников из рис. 4 имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} G_i &= G_\Sigma - \sum_{k=1}^{i-1} G_k \\ \Delta P_i &= (B_i - B_{i-1}) \cdot \frac{G_\Sigma^2}{2 \cdot \rho \cdot F^2} + \rho \cdot g \cdot (h_i - h_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Графовая модель коллектора (2), по сравнению с (1), имеет то преимущество, что модель (2) практически буквально отражает реальную схему движения среды (сравним рис. 1 и рис. 4). Однако в модели (2) необходимо строго соблюдать последовательность расположения дуг, а в многополюснике модели (1) это совершенно необязательно. Поэтому модель (1) более проста в обращении и именно она была принята для программной реализации.

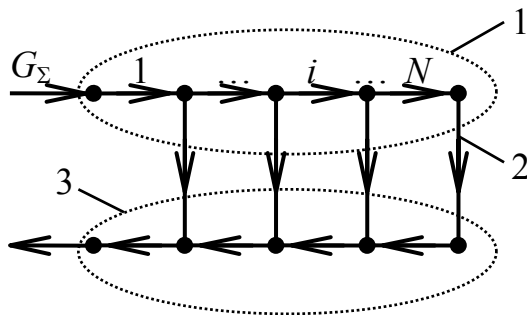


Рис. 4. Графовая расчетная схема коллекторного теплообменника (вариант с многополюсниками из последовательно соединенных дуг):

1, 2, 3 соответствуют элементам рис. 1;
1 ... i ... N – номера дуг в многополюснике

Литература

1. Гидравлический расчет котельных агрегатов: (Нормативный метод) / О.М. Балдина, В.А. Локшин, Д.Ф. Петерсон и др. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.
2. Расчет гидравлических и тепловых разверок в пароперегревателях (дополнение к Нормативному методу гидравлического расчета котельных агрегатов). Руководящие указания. Вып. 58. – Л.: НПО ЦКТИ, 1990. – 47 с.

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНУТРИКОТЛОВОЙ СХЕМЫ БАРАБАННОГО КОТЛА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.Ю. Воловиков

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Найдено выражение для определения кремнесодержания питательной воды первой ступени испарения, более адекватно отражающее солевой баланс внутрикотловой схемы котла при подаче 50 % расхода питательной воды на паропромывочное устройство.

Внутрикотловая схема предназначена для получения необходимого качества пара и обеспечения надежной работы поверхностей нагрева при возможно меньшей величине непрерывной продувки.

В [1] приводится математическая модель внутрикотловой схемы котла, предназначенная для расчета производительности ступеней испарения. В этой модели находится раздел, в котором определяется кремнесодержание питательной воды, вот его и опишем подробно.

Рассмотрим математическую модель двухступенчатой схемы испарения со следующими допущениями, взятыми из РТМ:

Допущение № 1 – Выбор производительности ступеней испарения производим только по условию уноса кремниевой кислоты.

Допущение № 2 – При сведении солевых балансов не учитываются отложения солей на внутренних поверхностях труб.

Значение кремнесодержания питательной воды первой ступени испарения $Si_{п.с}$ определяется в зависимости от способа подачи питательной воды в барабан. При подаче 50 % от общего расхода питательной воды на паропромывочное устройство $Si_{п.с}$ найдем из следующих рассуждений: выделим контрольный объем внутри барабана котла, включающий в себя паропромывочное устройство:

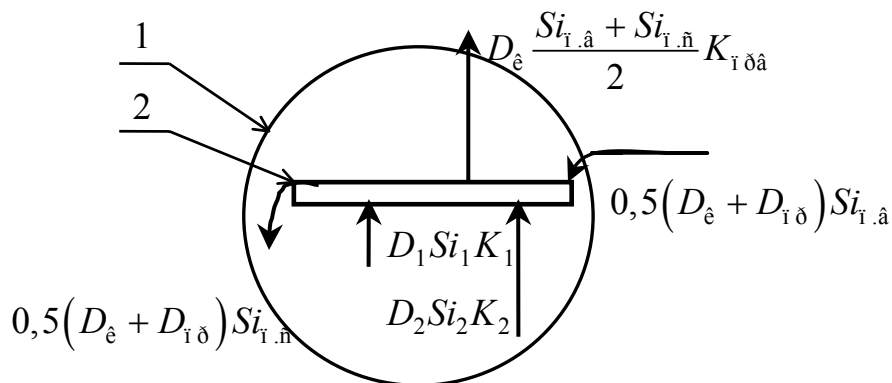


Рис. 1. Расчетная схема для определения солевого баланса паропромывочного устройства при подаче на него 50 % питательной воды:

1 – барабан котла; 2 – паропромывочное устройство

Теперь сведем материальный баланс для контрольного объема:

$$0,5(D_k + D_{пр}) + D_1 + D_2 = 0,5(D_k + D_{пр}) + D_k,$$

где $D_k = D_1 + D_2$ – паропроизводительность котла, равная сумме производительностей ступеней испарения, т/ч; $D_{пр}$ – расход воды, идущий на продувку, т/ч.

Солевой баланс – соответственно:

$$Si_{п.в} (0,5 + 0,5P - 0,5K_{прв}) + Si_1 K_1 n_1 + Si_2 K_2 n_2 = Si_{п.с} (0,5 + 0,5P + 0,5K_{прв}),$$

упрощаем:

$$0,5Si_{п.в} (1 + P - K_{прв}) + Si_1 K_1 n_1 + Si_2 K_2 n_2 = 0,5Si_{п.с} (1 + P + K_{прв}),$$

где $Si_{п.в}$ – кремнесодержание питательной воды, мг/кг; Si_1, Si_2 – кремнесодержание воды первой и второй ступеней испарения соответственно, мг/кг; $K_1, K_2, K_{прв}$ – коэффициенты уноса паром кремниевой кислоты в первой, второй ступенях испарения и в паропромывочном устройстве; n_1, n_2 – относительная паропроизводительность первой и второй ступеней испарения; P – относительный расход воды на продувку.

Выражаем из последнего уравнения кремнесодержание питательной воды первой ступени испарения:

$$Si_{п.с} = \frac{0,5(1 + P - K_{прв})Si_{п.в} + Si_1 K_1 n_1 + Si_2 K_2 n_2}{0,5(1 + P + K_{прв})}.$$

Полученное выражение не совпадает с приведенной в РТМ для этого случая формулой:

$$Si_{п.с} = \frac{(1 + P)Si_{п.в} + Si_1 K_1 n_1 + Si_2 K_2 n_2}{1 + P + K_{прв}}.$$

Первая из представленных зависимостей более адекватно отражает солевой баланс и поэтому рекомендуется к применению.

При расчете по обеим формулам получаем значения кремнесодержания первой ступени испарения, при этом $Si_{п.в}$, определенное по первой зависимости, меньше определенного по второй зависимости на величину около 5 % при одинаковых исходных данных.

Литература

1. Расчет и проектирование внутрикотловых схем и сепарационных устройств барабанных котлов высокого давления. (РТМ 108.030.05–75). – Л., 1975. – 65 с.

346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
энергетический институт, кафедра «Парогенераторостроение и гидравлика», т. 55-6-44.

МОДЕЛЬ ВЫБРОСА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫЙ КЛАПАН В ПАРОВЫХ КОТЛАХ МАЛОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.Х. Поландов, С.А. Власенко

Орловский государственный технический университет

Предложенная модель с достаточной точностью для практических целей позволяет рассчитать объем выбрасываемой воды из парового котла малого давления при срабатывании предохранительного клапана в зависимости от его пропускной способности, размеров парового пространства котла и темпа снижения температуры воды.

В большинстве работ [1, 2], посвященных моделированию процесса выброса кипящей воды из сосудов под давлением при их внезапной разгерметизации, темп снижения температуры по высоте сосуда, который играет важную роль в исследуемом процессе, считается постоянным по всему объему жидкости или вовсе не учитывается. Это может быть связано с тем, что авторы производят исследования в сосудах высокого давления, где вода нагрета до температур свыше 100 °С. Но при моделировании процессов, происходящих в сосудах малого давления, к которым можно отнести паровые котлы марок КВ-300 М, ВКВ-300 Л, темп снижения температуры воды существенно влияет на точность модели, поскольку в реальных условиях при срабатывании предохранительного клапана он значительно изменяется по высоте котла.

Предлагаемая математическая модель описывает процесс, происходящий в сосуде произвольной формы с учетом изменения темпа падения температуры воды и скорости подъема паровых пузырей, зависящей от паросодержания пароводяной смеси.

Известно, что нагрев воды в сосуде связан с перераспределением энергии в системе «вода-пар». В соответствии с законом сохранения энергии запишем выражение, характеризующее затраты энергии на парообразование, происходящее в сосуде произвольной формы:

$$\begin{aligned}
 & -F(h) \cdot (1-f) \cdot \rho_1 \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} + \frac{q}{h} = \\
 & = r \cdot \rho_2 \cdot f \cdot w(f) \cdot \frac{dF}{dh} + r \cdot \rho_2 \cdot \left(F(h) \cdot w(f) \cdot + F(h) \cdot f \cdot \frac{dw}{df} \right) \cdot \frac{df}{dh}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где h – высота слоя воды, м; $F(h)$ – площадь горизонтального сечения водяного объема сосуда, м²; f – паросодержание; ρ_i – плотность воды ($i=1$) и пара ($i=2$), кг/м³; c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); T – температура воды, К; t – время, с; q – тепловая мощность топki, Дж/с; r – теплота парообразования, Дж/кг; $w(f)$ – скорость подъема паровых пузырей в зависимости от паросодержания смеси, м/с.

Левая часть выражения (1) характеризует затраты энергии на нагрев воды и на подвод тепла от топki. Правая часть формулы описывает изменение параметров пароводяной смеси на участке парообразования.

Решая (1) относительно паросодержания, получим выражение:

$$\frac{df}{dh} = \frac{-F(h) \cdot (1-f) \cdot \rho_1 \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} + \frac{q}{h} - r \cdot \rho_2 \cdot f \cdot w(f) \cdot \frac{dF}{dh}}{r \cdot \rho_2 \cdot F(h) \cdot \left(w(f) + f \cdot \frac{dw}{df} \right)}. \quad (2)$$

Скорость подъема пузырей определим, учитывая их групповое взаимодействие, способствующее циркуляции воды в сосуде. При этом рост паросодержания смеси увеличивает скорость пузырей. Эту зависимость можно представить показательной функцией и аппроксимировать выражением $w(f) = 1,05 - e^{-5 \cdot f}$.

В ходе опытов, проведенных на паровых котлах марок ВКВ-300Л и КВ-300М, установлено, что температура пароводяной смеси изменяется не только по времени, но и по высоте котла (по слоям смеси). Темп снижения температуры по высоте котла ($\Delta T / \Delta t$) за время работы клапана, может быть описан функцией, полученной аппроксимацией экспериментальных данных:

$$\frac{\Delta T(h)}{\Delta t} = \frac{\Delta T_k}{\Delta t} \cdot e^{-4 \cdot (h-h_0)^8} = \frac{dp}{dt} \cdot \frac{d\Delta T_k}{dp} \cdot \varphi(h) \approx \frac{dp}{dt} \cdot \frac{dT_k}{dp} \cdot \varphi(h),$$

где ΔT_k – изменение температуры в верхнем слое воды, К; h_0 – уровень нагретой воды в барабане, м; p – давление пара, Па.

Параметры T_k и p жестко связаны между собой линией насыщения, и в рамках решаемой задачи эту связь можно аппроксимировать как $dT_k / dp = L$. Для определения коэффициента L необходимо знать значения температур, при которых происходит открывание и закрывание клапана, а затем по линии насыщения определить соответствующие давления.

Для определения параметра dp/dt воспользуемся уравнением расхода пара через предохранительный клапан, которое с достаточной точностью для диапазонов расходов, характерных для паровых котлов малого давления, определяется зависимостью, описывающей истечение пара со звуковой скоростью:

$$m_n = \mu \cdot F_k \cdot \frac{p}{B}, \quad (3)$$

где m_n – расход пара через клапан, кг/с; μ – коэффициент расхода предохранительного клапана; F_k – площадь сечения входного патрубка клапана, м²; B – коэффициент, характеризующий свойства истекающего пара, м/с.

Примем, что количества пара, выбрасываемого через предохранительный клапан и образующегося в котле в единицу времени (m_u), равны: $m_n = m_u$. Используя уравнение теплового баланса, можно определить m_u :

$$\begin{aligned} m_u &= -\frac{d(M_B \cdot c \cdot T)}{r \cdot dt} = -\frac{c \cdot \rho_1}{r} \cdot \frac{d\left(\int_0^l F(h) \cdot \Delta T(h) dh\right)}{dt} = \\ &= -\frac{c \cdot \rho_1 \cdot L}{r} \cdot \frac{dp}{dt} \cdot \int_0^l F(h) \cdot \varphi(h) dh, \end{aligned} \quad (4)$$

где M_b – масса кипящей воды, кг; l – уровень объема воды, расширившегося в результате нагрева, м.

Примем $B=\text{const}$ ($B=700$ (м/с) [3]) и $p=\text{const}=p_0$, поскольку попадание пароводяной смеси в клапан происходит в первые секунды процесса истечения жидкости из котла, когда изменение параметров смеси минимально.

Совместно решая выражения (3), (4) относительно dp/dt с учетом допущений, получим выражение, определяющее скорость падения давления при открывании клапана в начальный момент времени:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{-p_0 \cdot F_k \cdot r \cdot \mu}{L \cdot c \cdot \rho_1 \cdot B \cdot \int_0^l F(h) \cdot \varphi(h) dh}.$$

Все искомые составляющие формулы (2) найдены, после чего можно записать выражение, характеризующее изменение паросодержания жидкости в паровом котле при срабатывании предохранительного клапана:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dh} = & \frac{(1-f) \cdot p_0 \cdot F_k \cdot \mu \cdot e^{-4 \cdot (h-h_0)^8}}{\rho_2 \cdot \left[(1,05 - e^{-5 \cdot f}) + 5 \cdot e^{-5 \cdot f} \cdot f \right] \cdot B \cdot \int_0^l F(h) \cdot e^{-4 \cdot (h-h_0)^8} dh} + \\ & + \frac{q/h - r \cdot \rho_2 \cdot f \cdot (1,05 - e^{-5 \cdot f}) \cdot dF/dh}{r \cdot \rho_2 \cdot F(h) \cdot \left[(1,05 - e^{-5 \cdot f}) + 5 \cdot e^{-5 \cdot f} \cdot f \right]}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение уравнения (5) возможно численным методом при заданных $F(h)$, F_k и $p_0=0,08$ МПа.

Реализация предложенной модели произведена с помощью программного продукта «Mathcad 2000 Professional» для котла ВКВ-300Л и предохранительного клапана КПС-0,7-550. На рисунке 1 показаны поле экспериментальных точек и график, полученный с помощью представленной модели.

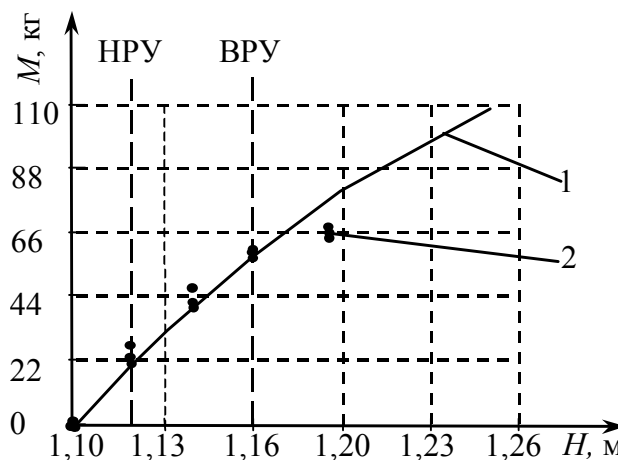


Рис. 1. Зависимость массы воды, выбрасываемой через клапан от исходного уровня воды: 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальные значения; НРУ, ВРУ – нижний и верхний рабочие уровни жидкости в паровом котле соответственно

Представленная модель с достаточной точностью для практических целей позволяет решить три задачи:

- 1) расчет количества выбрасываемой воды из парового котла при срабатывании предохранительного клапана;
- 2) расчет минимально потребной величины свободного парового объема для исключения выброса кипящей воды через клапан;
- 3) расчет максимально допустимого размера проходного сечения предохранительного клапана, при котором исключен выброс воды из котла при срабатывании клапана.

Литература

1. Авдеев А.А., Авдеева А.А. Кипение жидкости при сбросе давления // Теплоэнергетика. – 1980. – № 8. – С.83-85.
2. Крашенинников В.В., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л. Вскипание воды при разгерметизации сосуда низкого давления // Динамика тепловых процессов. – Киев.: Наукова думка, 1980. – С. 77.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.А. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, т. (0862) 41-3295, e-mail: fotina77@list.ru

УДК 65.012.123

ПОНЯТИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

А.Ю. Бочаров

Центральный научно-исследовательский институт экономики
и управления в строительстве Госстроя России, г. Москва

Рассматриваются ключевые моменты, связанные с расчетами оптимальной модели действующих предприятий, планированием нового бизнеса, а также реконструированием и перепрофилированием существующих.

Общий и особенно экономический результат решения любой проблемы зависит, прежде всего, оттого, какие факторы и условия, как и в какой мере учтены при ее решении, какая и насколько достоверная информация заложена в условие, какие показатели использованы в качестве критерия оптимальности.

Еще ведутся дискуссии вокруг основных понятий оптимизации, таких как критерий оптимальности плана, согласование глобального и локального оптимумов, динамический аспект плана и др.

В оптимизации любой проблемы большое значение имеет выбор критерия (критериев) оптимальности решений и выбора наилучшего из них.

При решении разных проблем и задач в качестве критерия оптимальности используются различные экономические, технико-экономичес-

кие и другие показатели: действующие оптовые цены, производственные затраты, прибыль, хозрасчетный доход, приведенные затраты, грузовая работа и др.

Под критерием оптимальности понимается показатель, выражающий меру экономического эффекта принимаемого хозяйственного решения для сравнительной оценки возможных решений и выбора наилучшего из них.

Целый ряд экономических задач без существенного ущерба может решаться с одним, наиболее подходящим, для данных условий критерием. Однако каждый показатель в конкретном случае использования имеет как свои преимущества, так и недостатки. Кроме того, оптимум, найденный по одному критерию, находится на пике множества, тем самым ставит условия реализации оптимального решения в жесткие рамки. Чтобы сгладить влияние на результат решения проблемы какого-то одного показателя, целесообразно решать ее как многокритериальную задачу. Как правило, при решении данных задач, приходится моделировать различные ситуации.

Модель – это такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект – оригинал так, что его непосредственное изучение дает новые знания об объекте – оригинале.

Под моделированием понимается процесс построения, изучения и применения моделей. Оно тесно связано с такими категориями, как абстракция, аналогия, гипотеза и др. Процесс моделирования обязательно включает и построение абстракций, и умозаключения по аналогии, и конструирование научных гипотез.

Главная особенность моделирования в том, что это метод опосредованного познания с помощью объектов-заместителей. Модель выступает как своеобразный инструмент познания, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает интересующий его объект. Именно эта особенность метода моделирования определяет специфические формы использования абстракций, аналогий, гипотез, других категорий и методов познания.

Необходимость использования метода моделирования определяется тем, что многие объекты (или проблемы, относящиеся к этим объектам) непосредственно исследовать или вовсе невозможно, или же это исследование требует много времени и средств.

Процесс моделирования включает три элемента:

- 1) субъект (исследователь),
- 2) объект исследования,
- 3) модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Моделирование – циклический процесс. Это означает, что за первым циклом может последовать второй, третий и т.д. При этом знания об исследуемом объекте расширяются и уточняются, а исходная модель по-

степенно совершенствуется. Недостатки, обнаруженные после первого цикла моделирования, обусловленные малым знанием объекта и ошибками в построении модели, можно исправить в последующих циклах.

В процессе подготовки информации широко используются методы теории вероятностей, теоретической и математической статистики. При системном экономико-математическом моделировании исходная информация, используемая в одних моделях, является результатом функционирования других моделей.

Существуют различные подходы к реализации многокритериального решения:

- оптимизация по одному критерию; остальные при этом играют роль дополнительных ограничений;
- упорядочение множества критериев и последовательная оптимизация по каждому из них, затем выбирают компромиссное решение;
- сведение многих критериев к одному комплексному с помощью балльных оценок, ранжирования и других способов сопоставления.

Минимизация суммарных отклонений от тех значений целевых функций по отдельным критериям (в заключительном варианте решения проблемы) осуществляется на \min функции:

$$W = \sum_k \left(\alpha_k \frac{\bar{G}_k - F_k(x_{ji})}{\bar{G}_k} \right),$$

где \bar{G}_k – максимальное значение (или минимальное в других постановках) целевой функции по соответствующему критерию оптимальности k .

$$\bar{G}_k = \max F_k(x_{ji}),$$

где $F_k(x_{ji})$ – значение целевой функции по критерию k , при решении задач на максимум смежного критерия; α_k – весовой коэффициент того или иного критерия оптимизации.

Величина весового коэффициента (α_k) может быть одинаковой для разных критериев и разной в зависимости от значимости тех или иных показателей для данных производственных условий.

В то же время, для всех вариантов принимаемых решений должно соблюдаться условие:

$$\sum_k \alpha_k = 1.$$

Сфера практического применения метода моделирования ограничивается возможностями и эффективностью формализации экономических проблем и ситуаций, а также состоянием информационного, математического, технического обеспечения используемых моделей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

А.В. Медведев

Кемеровский государственный университет

Предлагается подход к моделированию динамических процессов в экономике на основе решения дискретной задачи оптимального управления, учитывающий баланс между уровнем экономической подробности и объемом используемой экономической информации.

При моделировании экономических процессов возникает необходимость решения сложных задач измерения экономически разнородных процессов (инвестирование, начисление прибыли, кредитование, игра на фондовой бирже, оценка стоимости бизнеса, предприятия, имущества, банкротства, реструктуризации компаний и т.п.). Их существенными особенностями являются динамический характер, наличие временных лагов, технико-экономических ограничений, различие интересов участников и т.п. Решение и взаимоувязка этих задач в динамике невозможны без использования адекватного математического аппарата, а также единого экономического измерителя, в качестве которого удобно выбирать денежные потоки (ДП), возникающие от различных видов деятельности хозяйствующих субъектов – производственной, инвестиционной и финансовой. ДП рассматривается как измеренное в единой (денежной) единице сальдо платежей (оттоков) и поступлений (притоков), связанных с некоторым экономическим процессом или деятельностью экономического агента.

В работе предлагается подход к моделированию экономической динамики, с помощью которого возможно проведение экспресс-анализа деятельности производственного предприятия, оценка бизнеса, инвестиционных проектов на основе классической дискретной задачи оптимального управления [1]:

$$x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) - s(t); \quad x(0) = a, \quad (1)$$

$$C(t)x(t) + D(t)u(t) \leq h(t); \quad u(t) \geq 0 \quad (t = 0, \dots, T^0 - 1), \quad (2)$$

$$\sum_{t=0}^{T^0-1} [(a(t), x(t)) + (b(t), u(t))] + (a(T^0), x(T^0)) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $x(t)$ – вектор неуправляемых параметров (фазовый); $u(t)$ – вектор управляемых параметров (управляющий); $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ – матрицы коэффициентов уравнений движения и ограничений проекта; $a(t)$, $b(t)$, $s(t)$, $h(t)$ – векторы коэффициентов целевой функции, ограничений и уравнений движения; T^0 – горизонт планирования инвестиционного проекта.

Среди уравнений движения (1) ключевым является уравнение движения денежных потоков, так как их максимизация чаще всего выступает основным критерием эффективности деятельности экономического агента. В этой связи приведем структуру уравнения движения ДП:

$$ДС(t+1) = ДС(t) + ДП_о(t) + ДП_и(t) + ДП_ф(t),$$

где $ДС(t+1)$ – текущий эквивалент денежных средств в момент $t+1$; $ДС(t)$ – текущий эквивалент денежных средств в момент t ; $ДП_о$, $ДП_и$, $ДП_ф$ – сальдо поступлений и платежей за период $(t; t+1)$ по производственной, инвестиционной и финансовой деятельности соответственно. Отметим, что содержательно в слагаемом $ДП_о$ учитываются основные технико-экономические характеристики производственных активов (количество, стоимость, производительность и срок службы производственного оборудования, объектов недвижимости и т.п.), а также цена продажи произведенной на них продукции. Кроме того, учитываются полные затраты на осуществление производственной деятельности с учетом амортизации активов, основных видов налогов, оплаты труда и т.п. Уравнения (2) имеют смысл основных экономических ограничений проекта (безубыточность, платежеспособность, ограничения на объем инвестиций, спрос на продукцию и т.п.). В целевой функции (3) инвестиционного проекта или деятельности предприятия, как правило, учитываются особенности проекта (например, максимизация дохода, оценка бизнеса с учетом интересов его участников).

Задачи (1)-(3) являются многошаговой задачей линейного программирования и решаются методом последовательных приближений с помощью декомпозиции исходной задачи на пары двойственных задач линейного программирования [2].

Предлагаемый подход позволяет производить оценку бизнеса и экспресс-анализ деятельности производственного предприятия с использованием относительно небольшой входной информации, структурированной по видам деятельности и доступной из бухгалтерского баланса. В настоящее время он реализован в виде пакета прикладных программ в двух моделях экономической динамики:

- 1) модели расширяющейся, не ограниченной спросом экономики;
- 2) модели венчурного инвестирования малого предприятия.

Причем расчеты по второй модели сравниваются с данными, полученными с помощью пакета Project Expert для реального инвестиционного проекта.

Литература

1. Пропой А.И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. – М., 1973. – 256 с.
2. Медведев А.В., Победаш П.Н. Алгоритм решения задачи оптимизации реальных инвестиций на основе метода последовательных приближений // Вестник Кемеровского госуниверситета. – 2003. – Вып. 3(15). – С. 46-52.

НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА. СУЩЕСТВОВАНИЕ И ЕДИНСТВЕННОСТЬ НЕОТРИЦАТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Т.И. Денисенко

Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

Рассматривается нелинейная модель Леонтьева межотраслевого баланса вида

$$x = F(x) + c$$

с нелинейным оператором $F(x)$. Это уравнение в основном изучается в конечномерном пространстве, что, как правило, представляет интерес для экономико-математических моделей. Здесь x – валовый выпуск (неизвестный элемент); c – чистый выпуск.

Нелинейная модель Леонтьева. Данная тема посвящена изучению экономико-математических моделей вида

$$\bar{x} = F(\bar{x}) + \bar{b}, \quad (1)$$

где $\bar{x} \in R^n$ – неизвестный вектор; $\bar{b} \in R^n$ – заданный неотрицательный вектор; $F(\bar{x})$ – заданный оператор, определенный по крайней мере на множестве неотрицательных векторов R_+^n пространства R^n и со значениями в пространстве R^n .

Модель (1) является естественным развитием и обобщением известной классической модели Леонтьева межотраслевого баланса

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

Здесь $x_i (i = \overline{1, n})$ – расчетные объемы валовых выпусков в отрасли i . При этом предполагается, что вся экономика состоит из n отраслей, причем:

1. Каждая отрасль производит один и только один продукт, поэтому все отрасли и производимые ими продукты могут быть занумерованы одними и теми же числами $(1, 2, \dots, n)$.

2. В процессе производства каждая из отраслей использует (затрачивает) продукты других (а также возможно и своей отрасли) в некоторых количествах. При этом не исключено, что некоторые продукты используются в нулевых количествах.

3. Объем, используемый в j -й отрасли продукта i -й отрасли, зависит от объема валового выпуска x_j продукции j -й отрасли и **прямо пропорционален объему этого выпуска**. Тем самым величина используемой продукции i -й отрасли при валовом выпуске x_j в j -й отрасли будет равна $a_{ij} x_j (j = 1, 2, \dots, n)$, а суммарные затраты продукции i -й отрасли всеми отраслями будут равны

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Следовательно, «остаток» продукции i -й отрасли будет равен

$$x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j. \quad (3)$$

Этот остаток (3) – это часть производимой продукции i -й отрасли, предназначенной к непосредственному распределению, т.е. это величина продукции i -й отрасли за минусом затрат в процессе производства. Эту разность обозначают через b_i и называют чистым выпуском i -й отрасли:

$$x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Понятно, что система уравнений (4) эквивалентна системе уравнений (2).

Модель (2) называется моделью Леонтьева межотраслевого баланса.

При такой постановке задачи величины b_i (называемые «чистыми» выпусками, т.е. выпусками за минусом затрат в процессе производства) следует рассматривать как заданные (плановым органом) величины, а x_1, x_2, \dots, x_n – как неизвестные и поэтому подлежащие расчету величины. Тем самым величины x_1, x_2, \dots, x_n – подлежат определению из системы уравнений (4) с n неизвестными.

Из самого способа вывода уравнений системы (4) следует, что величины x_1, x_2, \dots, x_n не могут быть отрицательными. А это значит, что экономический смысл имеют при заданных неотрицательных значениях компонент b_1, b_2, \dots, b_n вектора \bar{b} лишь такие решения \bar{x} системы

$$\bar{x} = A\bar{x} + \bar{b}, \quad (5)$$

компоненты которых неотрицательные. Поэтому нас могут интересовать лишь неотрицательные решения модели (5) («отрицательные» решения этой модели экономического смысла не имеют!).

Выясним, а могут ли у модели (4) появиться решения с отрицательными компонентами. Возьмем простой случай: $n = 1$, т.е. экономика состоит из одной отрасли, тогда $a_{ij} = a$ – затраты первого продукта на производство первого продукта и система (4) – это одно уравнение с одним неизвестным:

$$x = ax + b, \quad (6)$$

откуда, если $a \neq 1$,

$$x = \frac{b}{1-a},$$

и при $a > 1$ решение x при заданном положительном $b > 0$ будет отрицательным, т.е. лишено экономического смысла.

То, что модель (6) при $a > 1$ не может иметь неотрицательных решений понятно, исходя из здравого смысла: при $a > 1$ для производства одной единицы продукции отрасли затрачивается a (т.е. больше единицы) продукции этой отрасли, так что на «выходе» из отрасли ни о каком остатке ее продукции речи быть не может!

Однако, если $n > 1$, ситуация может быть более сложной. Пусть, например,

$$A = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,7 \\ 0,6 & 0,6 \end{pmatrix}, \quad I - A = \begin{pmatrix} 0,4 & -0,7 \\ -0,6 & 0,4 \end{pmatrix}.$$

Тогда $\Delta = \det(I - A) = 0,16 - 0,42 = -0,26$, а матрица $(I - A)^{-1}$ имеет вид

$$(I - A)^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} \\ A_{12} & A_{22} \end{pmatrix},$$

где A_{ij} – алгебраические дополнения элементов a_{ij} матрицы A , т.е. $A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$; M_{ij} – минор элемента a_{ij} матрицы A . Отсюда следует, что $(I - A)^{-1}$ – матрица с отрицательными элементами!

$$(I - A)^{-1} = -\frac{1}{0,26} \begin{pmatrix} 0,4 & 0,6 \\ 0,7 & 0,4 \end{pmatrix}$$

и поэтому решение системы уравнений $x = Ax + b$ при неотрицательном векторе \bar{b} является вектором с отрицательными компонентами.

Подчеркнем, что по виду матрицы A , этого сразу (в отличие от уравнения (6)) сказать нельзя.

Модель Леонтьева (2), для которой при любом векторе $\bar{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ с неотрицательными компонентами существует единственное неотрицательное решение $\bar{x} = \bar{x}^* \geq 0$ этой модели, называется **продуктивной**. Мы видим, что только по экономико-математической модели сразу, без дополнительного анализа, невозможно определить, какие «чистые» выпуски продукции возможны в этой модели, а какие нет, т.е. какие модели являются продуктивными.

Литература

1. Радченко В.В., Стеценко В.Я. Применение метода Ньютона-Канторовича для расчета нелинейного межотраслевого баланса // В сб. Модели и методы экономических целенаправленных систем. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 160-166.
2. Стеценко В.Я., Есаян А.Р. К вопросу о разрешимости уравнений второго рода // Известия АН Таджикской ССР. – 1964. – Т. 2 (15). – С. 13-35.
3. Стеценко В.Я. О неподвижных точках нелинейных отображений // Сибирский математический журнал. – 1969. – Т. 10. – № 3. – С. 642-652.
4. Стеценко В.Я. Критерии неразложимости линейных операторов // Успехи математических наук. – 1966. – № 21. – Вып. 5. – С. 265-267.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ БОКСА И ДЖЕНКИНСА ДЛЯ ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

В.А. Сивелькин

Оренбургский областной комитет государственной статистики

В современных условиях функционирования региональной экономики повышается интерес к прогнозированию экономических индикаторов и, в частности, инвестиций в основной капитал. Моделирование инвестиционных процессов, как среднесрочное прогнозирование, наиболее востребованное у руководителей различных уровней и направлено на научно обоснованное принятие управленческих решений.

Анализ временных рядов определяет, что данные содержат систематическую составляющую, которая включает несколько компонент, и случайный шум (ошибку), затрудняющий обнаружение регулярных компонент. Существуют несколько методов исследования временных рядов. В данной работе рассмотрен метод Бокса и Дженкинса.

С целью прогнозирования фактора инвестиций в основной капитал построена модель Бокса и Дженкинса или Авторегрессионное Проинтегрированное Скользящее Среднее (АРПСС). Модель включает параметры авторегрессии и скользящего среднего. Рассмотрим параметры АРПСС: параметр авторегрессии (p), порядок разности (d), параметры – скользящего среднего (q), сезонной авторегрессии (P_s), сезонной разности (d_s), сезонно-скользящего среднего (Q_s).

Идентификация модели АРПСС заключается в определении числа оцениваемых параметров. Основными инструментами идентификации этой модели являются графики автокорреляционной функции (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ). Среднесрочное прогнозирование индекса физического объема инвестиций в основной капитал (в % к предыдущему году) в Оренбургской области проводилось по годовой динамике. В нашем примере для индекса инвестиций в основной капитал области АКФ экспоненциально убывает, ЧАКФ имеет выброс для лага один и два, и нет корреляций для других лагов. Построенная модель АРПСС для инвестиций в основной капитал имеет следующий вид АРПСС (1,1,1) (0,0,1). Качество модели подтверждается графиком остатков (нормальности, плотности распределения), а также остатков АКФ и ЧАКФ. Оценка параметров, включенных в модель, приведена в таблице.

Таблица

**Статистические критерии оценки параметров
модели АРПСС (1,1,1) (0,0,1)**

Параметр	Параметр	Асимптотическая стандартная ошибка	p	Нижняя 95 % доверия	Верхняя 95 % доверия
$p(1)$	0,93	0,08	0,00	0,77	1,10
$Q_s(1)$	0,93	0,07	0,00	0,78	1,07

Приведенные в таблице оценки свидетельствуют о статистической значимости включенных параметров в модель АРПСС (1,1,1) (0,0,1). Графически модель АРПСС (1,1,1) (0,0,1) индекса физического объема инвестиций в основной капитал Оренбургской области представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Модель Бокса и Дженкинса инвестиций в основной капитал Оренбургской области

Из рисунка 1 следует, что в эмпирических данных прослеживается высокая флуктуация признака. На основании тренда следует, что незначительное снижение объемов инвестиций отмечается за период 1959 – 1961 гг., существенное – 1976 – 1979 гг., резкое – 1988 – 1994 гг.; заметное повышение анализируемых объемов наблюдается за период 1962 – 1975 гг., незначительное – 1980 – 1987 гг. и высокое – 1995 – 2002 гг. В последующие годы будет наблюдаться снижение объемов инвестиций в основной капитал области.

В 2003 г. индекс физического объема инвестиций в основной капитал в процентах к предыдущему году будет составлять 120 %, нижняя граница 114 %, верхняя – 125 %; в 2004 г. соответственно – 118 %, нижняя граница будет составлять 109 %, верхняя – 126 %.

Преимущество метода Бокса и Дженкинса для среднесрочного прогнозирования определяется верхними и нижними границами полученных прогнозных результатов, что в целом позволяет принимать более гибкие и обоснованные управленческие решения в сфере объемов и направлений инвестиционных потоков, представленных капиталобразующими инвестициями на региональном уровне.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ КОРРЕКТИРОВКИ РЯДА ЧИСЛЕННОСТИ ЗАНЯТЫХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ППП STATISTICA

В.Е. Кузнецова

Оренбургский областной комитет государственной статистики

Эффективность регионального управления экономикой во многом определяется адекватным пониманием сущности регулируемого объекта. Противоречивые и сложные процессы, происходящие в экономике России, региона вызывают потребность в исследовании тенденции ее развития, перспективы экономической динамики, природы и факторов, оказывающих влияние на анализируемые процессы.

При рассмотрении природы динамического ряда, представленного экономическими индикаторами, можно сделать вывод о том, что на эти временные ряды чаще всего оказывают значительное влияние регулярные внутригодовые (сезонные) изменения. Сезонные факторы могут быть вызваны природно-климатическими условиями, отпускной системой, праздниками и прочее. Оценка временного ряда будет более точной, если изолированы и устранены влияния внутригодовых повторяющихся изменений. Следует отметить, что между годами существуют различия в периодичности регулярных сезонных изменений. В природе экономических временных рядов прослеживается наложение на свойственные рядам снижения (увеличения) активности и циклические изменения рядов (циклы – тенденции), случайные отклонения, что в целом затрудняет точно определить периодичность изменений.

Таким образом, формирование значений элементов временного ряда происходит под воздействием некоторых факторов, среди которых в основном выделяют четыре типа, то есть, временной ряд можно разложить в виде факторов (составляющих):

$$x(t) = T_{\text{тр}}(t) + S(t) + C(t) + N(t), \quad t = \overline{1, P},$$

где $T_{\text{тр}}(t)$ – трендовая (неслучайная) составляющая; $S(t)$ – сезонная составляющая; $C(t)$ – циклическая и $N(t)$ – нерегулярная (случайная) составляющая.

В исследуемых процессах встречается несколько вариантов сочетания этих факторов. Однако следует отметить, что во всех вариантах предполагается обязательное участие случайных факторов.

Сезонная корректировка является процессом, направленным на оценку ряда компонентов, не подлежащих прямому измерению (сезонных, циклов – тенденций, нерегулярных), относящимся к измеряемым данным. Преимущество данного метода обусловлено тем, что экстраполированные данные помогают снизить влияние, свойственное методике скользящего среднего значения, недостатков на концах рядов, способствует дальнейшей минимизации пересмотра факторов за последние периоды.

Расчеты при разложении динамического ряда очень однообразны и трудоемки. Сократить время и трудоемкость расчетов позволяют современные пакеты прикладных программ (ППП), в которых реализованы многомерные статистические методы анализа временных рядов. Моделирование проводилось с использованием метода месячной сезонной корректировки X11 (Census II) модуля временные ряды и прогнозирование (Time Series/Forecasting) ППП Statistica.

В Оренбургской области прослеживается ярко выраженная сельскохозяйственная специализация в основном с растениеводческой ориентацией, что обусловлено потенциальными возможностями в области. Вследствие этого достаточно актуально исследование численности занятых в сельскохозяйственном секторе области. Проведена сезонная корректировка численности занятых в сельском хозяйстве Оренбургской области. Рассмотрена помесечная динамика с 1999-го по 2003 гг. (60 наблюдений). Исходные данные и результаты сезонной корректировки ряда приведены на рисунке 1.

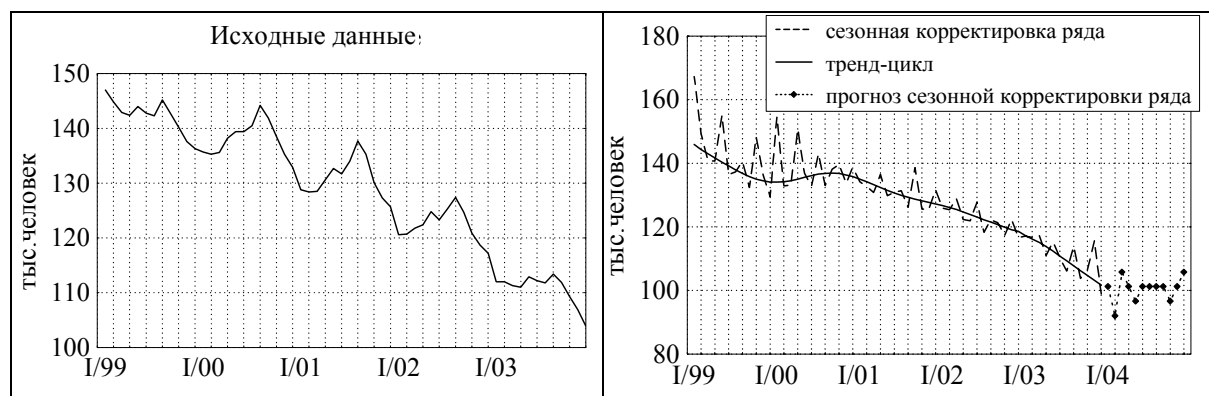


Рис. 1. Сезонная корректировка численности занятых в сельском хозяйстве Оренбургской области

Визуальный анализ рисунка 1 позволяет сделать вывод о том, что в исходных данных численности занятых в сельском хозяйстве области прослеживаются типичные сезонные колебания, наслаивающиеся на тренд. Сезонный эффект расшифровывается резким пиком занятых в сельском хозяйстве в сентябре и самым низким его уровнем в декабре. Это в основном обусловлено сезонными работами в сельском хозяйстве, а именно в растениеводстве, в период уборки урожая. Построенный тренд-цикл с использованием кривой Хендерсона (23-членной скользящей средней) определил тенденцию к сокращению численности занятых в сельском хозяйстве области. Дополнительно получены прогнозные данные сезонного фактора на 12 месяцев вперед.

Проведенное моделирование ориентировано на формирование оптимальной структуры занятости в сельской местности и направлено на обеспечение устойчивого материального благосостояния населения, повышение уровня жизни.

MODELING OF THE EXTRACTION OF NONRENEWABLE RESOURCES WITH THE USE OF A VARIATIONAL PRINCIPLE

A.V. Bazhanov

Far Eastern National University

Предлагается модель зависимости количества оставшихся невозобновляемых ресурсов от времени и параметров, характеризующих экономическую ситуацию, построенная в предположении выполнения вариационного принципа.

Let's assume that:

1) changes in quantity of resource can be completely described by its amount Q_1 and a rate of depletion \dot{Q}_1 at some instant t_1 (it'll be true if the model of changes is a differential equation of non-greater than second order);

2) there is such a function $L(Q, \dot{Q}, t)$ that changes in Q during the time $t \in [t_1, t_2]$ happen in such a way that functional $I = \int_{t_1}^{t_2} L(Q, \dot{Q}, t) dt$ takes its minimal value. Then L satisfy Euler necessary condition

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{Q}} - \frac{\partial L}{\partial Q} = 0,$$

which is a second order differential equation.

If there are no reasons for changes in process of resource extraction then general form of L doesn't depend on t, Q , and sign of the \dot{Q} (uniformity and isotropy of time and space). Then $L = a\dot{Q}^2$, where $a = \text{const} > 0$. Besides, in more common case it can be proved that (1) will be the same if L is defined up to the addition of the total derivation of any function of Q and t . Therefore the general form of L in common case is $L = a\dot{Q}^2 - U(Q, t)$. Since the extraction of resources can go on round-the-clock and essential reasons which can really affect the nature of the extraction process take place not very often, it can be assumed that there are such instants t_1, t_2, \dots, t_n that $\partial L / \partial t = 0$ and $U(Q, t)$ can be considered as linear for any $t \in [t_i, t_{i+1})$ so that $a\dot{Q}^2 + \tilde{A}_i Q = E = \text{const}$. Then it can be shown that the dependence $Q(t)$ is

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q^i(t), \quad \text{where} \quad Q^i(t) = \begin{cases} \frac{\alpha_i t^2}{2} + \beta_i t + \gamma_i, & t \in [t_i, t_{i+1}], \\ 0, & t \notin [t_i, t_{i+1}], \end{cases}$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ depend on Q_i, \dot{Q}_i , and $A_i = \tilde{A}_i / a$, which can be called a *state of the resource market index*, because $\text{sign}(\partial \dot{Q} / \partial t) = \text{sign} A_i$. A_i also depend on Q_i, \dot{Q}_i .

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АССОЦИАЦИЙ В НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Е.В. Мешкова, В.Е. Мешков

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты

Описывается принцип графического представления ассоциации в нейронной сети и последующая классификация их как графических объектов.

Одним из базовых положений нейрокибернетики является то, что любое «мыслящее» устройство должно каким-либо образом воспроизводить структуру человеческого мозга, так как он является единственным объектом, способным мыслить [1]. На реализацию этого принципа ориентировано программно-аппаратное моделирование мозгоподобных структур, а также создание элементов, аналогичных нервным клеткам (нейронам). На современном этапе существуют аппаратные реализации нейросетей, моделирующие иерархическую структуру человеческого мозга.

Описываемый подход основан на имитации процесса запоминания мозговых структур с помощью ассоциативных нейронных сетей.

Процесс запоминания связан с образованием следа (узора, энграммы) в мозговых структурах [2]. С точки зрения эзотерических концепций [3], мыслительный процесс человека осуществляется с помощью ментального тела (ментала). Мысль представляет собой объект, имеющий определенную структуру, а ментальное тело – средство для восприятия и упорядочения таких структур. Различные понятия формируют сложные конструкции, где знания представляет собой сумму структурированных объектов, связанных между собой. Частично этот подход осуществлен в семантической сети, где каждый элемент имеет собственное значение, и посредством установленных отношений, связан с другими объектами, образующими общую структуру. Схожим образом исследователи описывают и механизм запоминания информации мозгом – нервные импульсы, проходя через нейронные сети, формируют нейронный след [2].

Другой частный аналог описанного процесса запоминания применяется, например, при анализе биржевых сводок, когда сопоставляется внешний вид фрагментов тренда (фигуры, возникающие в процессе представления колебания курса акций) ранее известным, и на основе такого сопоставления делается вывод о ситуации.

В ментальном теле [3] блоки-мыслеформы имеют схожие структуры, чему бы они не были посвящены и какие бы ключевые слова и ассоциации не использовались. Продолжая аналогию с нейронной сетью, возможно предположить, что при распознавании имеют значение не конкретные задействованные узлы, а форма связей между ними.

Представим себе эти структуры, т.е. множество точек, связанных между собой и образующих различные узоры. Графически память можно представить себе как полотно узоров (аналогично «менталу»), а схемати-

чески – как граф (например, любую нейронную сеть можно представить графом).

Так как процесс запоминания связан с образованием следа-узора, то легко представить его графически как некий фрагмент сети, т.е. подграф, представленный на полотне узоров (графе). Тогда нейронная сеть является связным графом, где точки (образы, понятия) соединяются друг с другом в процессе обучения сети, а ассоциация между объектами образует подграф, или фрагмент узора.

Таким образом, подграф является графическим отображением «ассоциации как абстрактной структуры взаимосвязей (отношений)» [2]. Графическое представление может быть различным: плоским или объемным, когда ассоциация-фрагмент является некой фигурой [4].

Представив ассоциации графически, их можно классифицировать как графические объекты. Исходя из того, что однотипные объекты имеют схожее строение, возможно распознавание и классификация образов, понятий на основе анализа ассоциации, представленной графически, то есть при распознавании или классификации образов анализируются не конкретные нейроны и связи между ними как таковые, а форма (рисунок) этих связей.

Тогда отнесение объекта к определенному классу осуществляется на основе графического анализа рисунка связей между нейронами, когда схожие по форме (или по каким-либо другим критериям) рисунки будут относиться к одному классу. Критерии общности определяются в процессе обучения нейронной сети.

Литература

1. Кузнецов О.П., Марковский А.В., Шипилин Л.Б. Методы распределенной обработки образной информации. – М.: Физматлит, 2001. – 280 с.
2. Гаврилова Г.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
3. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия, 2002. – 220 с.
4. Жикаренцев В.В. Путь к свободе. Взгляд в себя. – СПб.: Диамант-Золотой Век, 1997. – 96 с.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147, т. 234-032, e-mail: [Namy @rambler.ru](mailto:Namy@rambler.ru)

УДК 681.3.016

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОСОБЕЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МУТАЦИЙ В БАЗОВОМ ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ

В.Е. Мешков, Е.В. Мешкова

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты

Описывается усовершенствование базового генетического алгоритма за счет передачи удачной мутации ближайшим родственникам особи, которая в результате выполнения над ней данной мутации существенно улучшила свою оценку.

Для получения эффективной реализации генетического алгоритма (ГА), каждый шаг ГА должен в максимальной степени учитывать особенности предметной области, для которой он выполнен.

С нашей точки зрения, инвариантным по отношению к предметной области средством повышения эффективности является обоснованный для каждой предметной области способ выбора особей для выполнения над ними мутаций. Речь идет о передаче удачной мутации ближайшим родственникам особи, которая в результате выполнения над ней данной мутации существенно улучшила свою оценку.

Рассмотрим общие различия между родительскими особями и дочерними. Родительские особи в общем случае сходств не имеют. Но сходства есть между родительской особью и дочерней – часть генетического материала родительской особи перешла к дочерней. Тем не менее, это разные особи. Аналогично, есть сходства между дочерними особями, хотя в общем случае степень сходства между двумя дочерними особями может колебаться от нулевой до максимальной.

Эффект от передачи мутации ближайшим родственникам заключается в том, что в результате такой же мутации весьма вероятно аналогичное улучшение оценки у ближайших родственников, притом, что это разные особи. В обычном случае, когда передача результативных мутаций не используется, в популяции появляется единственная улучшенная особь. Доля мутаций и скрещиваний, выполняемых по таким правилам, в общем числе мутаций и скрещиваний есть параметр, который можно задавать исходя из каких-то конкретных соображений, учитывающих особенности предметной области.

Для реализации описанного механизма передачи мутаций необходима возможность быстрого определения родителей особи и ее сестер в любом поколении. Очевидно, что в данной ситуации необходимо добавить к представлению каждой особи дополнительные поля, в которых будут находиться собственные идентификаторы и идентификаторы родителей. Кроме того, необходим признак существенного улучшения оценки в результате последней мутации, при наличии которого будет выполнена передача мутации, а также – поле, в котором бы запоминалась последняя мутация и ее параметры.

Данная идея может быть реализована неоднозначно. Отличия между реализациями главным образом будут заключаться в следующем:

- способе определения особей, которым можно передавать мутации;
- способе отбора родительских особей для удаления, каждая из которых фактически ожидает и потенциально может получить полезную мутацию, переданную ей от одной из дочерних особей, то есть потребуются переменная для каждой особи, показывающая, на каком поколении в последний раз данная особь скрещивалась. Эта переменная позволит задать временную границу ожидания, по достижении которой особь может быть удалена из популяции в соответствии с обычными правилами. В дополнение к этой переменной можно вычислять число потомков конкрет-

ной родительской особи, и если таковых нет, то применять к ней обычные правила удаления.

Рассмотрим пример алгоритма с простейшей реализацией механизма передачи мутаций в базовом ГА. Учитываем только передачу мутаций родительской паре. Передачу мутации от мутантов дочерних особей (т.е. уже второй мутации подряд) выполнять не будем. Удалять родительские особи в соответствии с обычными правилами можно будет только по достижении ожидания мутации, равного, например, двум поколениям, т.е. не раньше, чем через два поколения после скрещивания.

1. //Создание исходной популяции.

1. Для каждой вновь создаваемой особи:

1. Присвоить уникальный порядковый номер (начиная с единицы).
2. Остальным полям присвоить нулевые начальные значения.

2. //Оценка особей в популяции.

1. Для каждой особи в популяции:

1. Вычислить оценку.
2. Если оценка улучшилась достаточно сильно и особь не принадлежит исходной популяции, то:
 1. Установить признак существенного улучшения оценки.

3. //Проверка условий остановки алгоритма.

1. Если хоть одна особь получила оценку не хуже требуемой, то:

1. Остановка алгоритма с текущими результатами.

4. //Отбор.

1. Для каждой особи в популяции:

1. Если особь не является родителем, ждущим менее двух поколений, то:
 1. Применить к ней обычные правила отбора.

5. //Мутации.

1. Для каждой особи популяции:

1. Если у особи выставлен признак существенного улучшения оценки, то:
 1. Поиск родителей данной особи.
 2. Выполнение над родительскими особями мутаций, которые записаны в поле последней мутации данной особи.
 3. Присвоить новым особям-мутантам идентификаторы, остальные поля заполнить нулями.
2. Выполнение мутации особи по обычным правилам.

6. //Скрещивание

1. Отбор особей для скрещивания.
2. Для каждой отобранной особи:

1. Записать номер текущего поколения в поле поколения скрещивания.
2. Выполнение скрещивания с сохранением идентификаторов родителей в соответствующих полях новой особи.

7. Повтор с пункта 2.

В заключение отметим, что нами было предложено инвариантное к предметной области усовершенствование базового генетического алгоритма. Усовершенствование основывается на фиксации и передаче достаточно удачных мутаций.

Предложенный механизм передачи мутаций открыт для дальнейшего развития, в частности, определения глубины родственных связей, в соответствии с которыми выбираются особи для передачи мутаций и управления удалением особей из популяции. Отметим также, что реализация механизма передачи мутаций требует дополнительных затрат машинного времени и памяти. Эффект от его применения будет зависеть от соотношения соответствующих затрат на остальные шаги реализации базового генетического алгоритма. Чем меньше доля затрат на механизм передачи мутаций, тем выше его эффективность.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147, т. 234-032, e-mail: vm@sssu.ru

УДК 001.891.571; 577.118; 616.233-002.66; 616-036.12

УПРОЩЕННЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ БОЛЬНЫХ С БРОНХООБСТРУКТИВНЫМ СИНДРОМОМ

Л.И. Каменев, А.А. Хадарцев, Е.Н. Наумова, Н.М. Карташова, И.В. Маленко
МУЗ МСЧ № 5, ГУП НИИ НМТ объединенный с НИЦ
медицинского факультета ТулГУ, г. Тула

Доказана эффективность дисперсионного анализа в оценке эффективности реабилитации больных с хроническим обструктивным бронхитом, в том числе профессиональным полевым бронхитом, по изменению концентрации микроэлементов в моче.

Целью работы явилось изучение влияния дыхательного тренинга под контролем текущей ЧСС по методу биологической обратной связи (БОС) на бронхиальную проходимость, на изменения концентрации микроэлементов в моче у лиц с бронхообструктивным синдромом различной этиологии.

Было обследовано 30 пациентов – лиц мужского пола (средний возраст 54,3 года), прошедших десять 20-минутных сеансов БОС-тренинга, с диагнозами хронический пылевой бронхит (ХПБ) профессиональной этиологии и хронический обструктивный бронхит (ХОБ) непрофессиональной этиологии, по 15 человек в каждой группе. Контрольную группу составили

лица с теми же диагнозами, получавшие общепринятый лечебный комплекс в количестве 24 и 20 человек соответственно.

Для выявления зависимости между эффективностью лечения заболеваний органов дыхания и изменениями концентрации МЭ ($K_{МЭ}$) в моче проведен анализ изменений $K_{МЭ}$ в различные стадии болезни: в стадию обострения (1-2 день болезни), на 7-8 день болезни, стадию ремиссии (12-13 день болезни). $K_{МЭ}$ в моче определялись методом атомно-абсорбционной (пламенной) спектроскопии на установке «Сатурн-3П-1», функция внешнего дыхания (ФВД) – на аппарате КСП-1 (Россия).

Оценка эффективности нового способа лечения проводилась методом однофакторного дисперсионного анализа с использованием пакета прикладных программ SPSS for Windows v6.10 [1, 2].

Дисперсионным анализом проверялась гипотеза H_0 о равенстве средних групповых значений количественного показателя. Критерием для проверки этой гипотезы является соотношение факторной дисперсии и остаточной дисперсии:

$$F_H = \frac{\sigma_F^2}{\sigma_{ост}^2},$$

где $\sigma_F^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{Y})^2 n_i$, \bar{y}_i – среднее значение переменной Y на i -м

уровне $\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$, \bar{Y} – среднее значение переменной Y по всем значени-

ям $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}$,

$$\sigma_F^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2.$$

Критическое значение по таблицам квантилей F -распределения при уровне значимости $\alpha = 0,05$ соответствовало квантилю порядка 0,95.

$$F_{KP} = F(0,95;1;37) = 4,15.$$

При $F_H > F_{KP}$ гипотеза H_0 отвергалась и применялась конкурирующая гипотеза H_1 о влиянии способа лечения на концентрацию МЭ.

В результате математической обработки установлено, что дыхательный тренинг БОС на первой стадии болезни почти не влияет на изменение концентрации МЭ ($\alpha = 0,6-0,7$), на второй и третьей стадии влияет очень сильно ($\alpha = 0,001$).

У больных с диагнозом ХПБ выявлена корреляционная связь между МЭ: Cu на 1-й стадии, Fe и Cu – на 2-й и Mn, Cu, Ni, Zn на 3-й стадии болезни; с диагнозом ХОБ – между Cu, Ni, Zn; Mn, Cu, Ni, Zn, Cr и Cu соответственно (таблица).

Выявлено достоверное приближение к уровню ПДК указанных МЭ на 2 и 3 стадиях болезни. У всех больных с диагнозом ХПБ и ХОБ отмеча-

лось улучшение показателей ФВД на 7-8 день болезни (75 и 79 % соответственно), снижалась ЧСС на 7-8 сеансе.

Таблица

Уровни значимости изменений $K_{MЭ}$ в моче

Ста- дия	Fe		Mn		Cu		Ni		Zn		Cr	
	ХПБ	ХОБ	ХПБ	ХОБ	ХПБ	ХОБ	ХПБ	ХОБ	ХПБ	ХОБ	ХПБ	ХОБ
1*	0,623	0,056	0,071	0,048	0,0001	0,0001	0,071	0,0001	0,227	0,0001	0,041	0,039
2*	0,0001	0,246	0,6	0,0001	0,0001	0,0001	0,022	0,005	0,997	0,0001	0,491	0,0001
3*	0,021	0,599	0,101	0,003	0,0001	0,0001	0,023	0,001	0,823	0,0001	0,113	0,108

Примечание: 1* – стадия обострения; 2* – 7-8 день болезни; 3* – стадия ремиссии

Полученные данные позволяют говорить:

– об эффективности применения БОС-тренинга с обратной связью по текущей ЧСС при лечении обструктивного синдрома больных ХОБ, в том числе профессиональной этиологии;

– о возможности оценки эффективности применения БОС-тренинга по изменениям концентрации МЭ в моче.

Таким образом, упрощенный математический анализ позволяет проводить оценку эффективности реабилитационного лечения с использованием БОС-тренинга с обратной связью по текущей ЧСС.

Литература

1. Гвоздев Е.В. Возможности метода биологической обратной связи (БОС) в лечении больных бронхиальной астмой: Сб. материалов 13 Национального конгресса по болезням органов дыхания. – СПб., 2003. – С. 1423.
2. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

УДК 621.89:504.06(1-21):33

ОЦЕНОЧНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА РВ-ЗУМ

П.В. Калинин, О.А. Суржско

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Предложена оценочная модель экологической эффективности использования смазочного материала РВ-ЗУМ. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая определить экономический эффект, получаемый от сокращения ущерба, наносимого окружающей среде.

Для оценки экологической эффективности использования смазочного материала РВ-ЗУМ определяли полный годовой экономический ущерб [1] от загрязнений окружающей среды смазочным материалом ЭТ-2, который используется в современном машиностроении, в сравнении с разработанным в ЮРГТУ смазочным материалом РВ-ЗУМ, не оказывающим отрицательного воздействия на окружающую среду.

Полный годовой экономический ущерб Y (руб.) от загрязнений смазочными материалами РВ-ЗУМ и ЭТ-2 определяется по объемам производства:

$$Y = Y_3 \cdot Q_M,$$

где Y_3 – удельный ущерб от загрязнений окружающей среды на единицу выбросов, руб./т; Q_M – годовое использование смазочных материалов на производстве, т.

Экономическая оценка удельного ущерба Y_B (руб./год) от сброса 1 т смазочных материалов РВ-ЗУМ и ЭТ-2 в водоем определяли по формуле

$$Y_B = \gamma \cdot \sigma_K \cdot M,$$

где γ – константа, численное значение которой рекомендуется принимать 400 руб./усл.т для сброса в водоем после 1985 г.; σ_K – константа, зависящая от категории водоема (для р. Дон: 1,62 – 3,75); M – приведенная масса годового выброса смазочных материалов, загрязняющих окружающую среду. Показатель M рассчитывали по формуле

$$M = \sum_{i=1}^N A'_i \cdot m'_i,$$

где A'_i – показатель относительной опасности сброса; m'_i – масса i -го выброса на 1 т продукции в год, (0,1 т). Показатель определяли по формуле:

$$A'_i = \frac{a_i}{\text{ПДК}_{P/X_i}},$$

где a_i – фактический выброс i -го загрязняющего вещества, ЭТ-2; $\text{ПДК}_{P/X_i}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества в воде водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей, г/м³, ЭТ-2.

Удельный ущерб, причиняемый народному хозяйству вследствие нарушения земельных ресурсов [2] при попадании в почву смазочных материалов РВ-ЗУМ и ЭТ-2, определяли по формуле

$$Y_{\text{ЗСМ}} = H_C \cdot S \cdot K_{\text{Э}} \cdot K_C \cdot K_{\text{П}} + S \cdot K_B, \text{ тыс. руб.},$$

где H_C – норматив стоимости земель, 1,664 тыс. руб./га; S – площадь деградированных почв и земель, га (1 га); $K_{\text{Э}}$ – коэффициент экологической ситуации территории $K_{\text{Э}}=1,9$; K_C – коэффициент пересчета в зависимости от изменений степени деградации почв и земель, $K_{\text{СЭТ-2}}=2,3$; $K_{\text{СРВ-ЗУМ}}=0,1$; $K_{\text{П}}$ – коэффициент для особо охраняемых территорий, повышающий коэффициент к нормативам стоимости $K_{\text{П}}=1$; K_B – коэффициент пересчета в зависимости от периода времени по восстановлению деградированных почв и земель, $K_{\text{ВЭТ-2}}=3,8$ (продолжительность периода биodeградации почвы при попадании ЭТ-2 – 5 лет), $K_{\text{ВРВ-ЗУМ}}=1,7$ (при попадании РВ-ЗУМ – 1,5 года).

Экономический ущерб от массы всех видов загрязнений, поступающих в окружающую среду от отдельного источника или предприятия в целом, $Y_{\text{ВЫБ}}$ (руб./год) рассчитывали по формуле

$$Y_{\text{ВЫБ}} = Y_B + Y_{\text{ЗЕМ}},$$

где $У_{\text{В}}$ – удельный экономический ущерб, причиняемый сбросом загрязненных примесей в водные источники, руб./год; $У_{\text{ЗЕМ}}$ – удельный экономический ущерб, причиняемый от нарушения земельных ресурсов, руб./год.

Экономический эффект, получаемый от сокращения ущерба $\Delta У$ и увеличения прибыли предприятия $\Delta П$, определяли по формуле

$$\Xi = \Delta У + \Delta П.$$

Плату за сброс загрязняющих смазочных материалов в размерах, не превышающих установленные природопользователю предельно-допустимые нормативы сбросов, определяли умножением и суммированием полученных произведений по видам загрязняющих веществ:

$$П_{\text{Н.В}} = \sum_i^n C_{\text{Н.В}} (M_{\text{Н.В}} - M_{\text{иВ}}),$$

где $П_{\text{Н.В}}$ – плата за сбросы загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно-допустимые нормативы сбросов, руб.; $C_{\text{Н.В}}$ – ставка платы за выброс i -го загрязняющего вещества в пределах допустимых нормативов выбросов, руб.; $M_{\text{Н.В}}$ – предельно-допустимый выброс i -го загрязняющего вещества, т; $M_{\text{иВ}}$ – фактический выброс i -го загрязняющего вещества, i – вид загрязняющего вещества.

$$C_{\text{Н.В}} = H_{\text{БН.В}} K_{\text{ЭВ}},$$

где $H_{\text{БН.В}}$ – базовый норматив платы за сброс 1 тонны i -го загрязняющего вещества в размерах, не превышающих предельно-допустимые нормативы сбросов, руб., (для РВ-ЗУМ $H_{\text{БН.В}} = 2$ руб./т, для ЭТ-2 $H_{\text{БН.В}} = 4$ руб./т); $K_{\text{ЭВ}}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической зависимости состояния объектов, ($K_{\text{Э.ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ}} = 1,2 - 1,85$; $K_{\text{Э.ПОЧВЫ}} = 1,6$).

Сравнительная характеристика экономической оценки удельного ущерба от сброса 1 т смазочных материалов РВ-ЗУМ и ЭТ-2 приведена в таблице.

Таблица

Сравнительная характеристика экономической оценки экологического ущерба от сброса 1 т смазочных материалов РВ-ЗУМ и ЭТ-2

Смазочный материал, его концентрация, %		Экономические ущербы, руб./год			Сокращение ущерба $\Delta У$, руб./год	Оплата за сбросы загрязняющих веществ, руб.			Прибыль предприятия, $\Delta П$, руб.
		$У_{\text{В}}$	$У_{\text{ЗЕМ}}$	$У_{\text{ВЫБ}}$		$П_{\text{В}}$	$П_{\text{ЗЕМ}}$	$П_{\text{ЗАГР}}$	
РВ-ЗУМ	1	246,24	317,86	566,85	8850,06	420	560	980	8002
	2	492,48		810,34					
	3	738,72		1064,77					
ЭТ-2	2,5	1192,5	7275,4	8476,9		3532	5450	8982	
	5	2385		9660,4					
	7,5	3577,5		10852,4					

На рис. 1 приведена диаграмма экономической оценки экологического ущерба от сброса 1 т смазочных материалов РВ-ЗУМ.

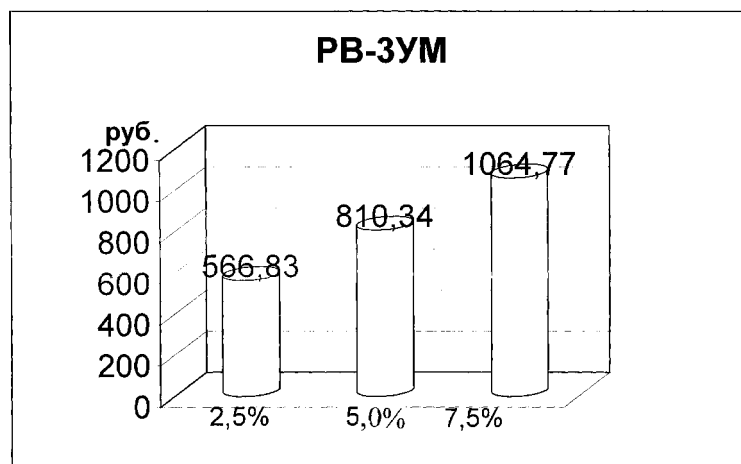


Рис. 1. Диаграмма экономической оценки экологического ущерба от сброса 1 т смазочных материалов РВ-ЗУМ

Экономический эффект, получаемый от сокращения ущерба и увеличения прибыли предприятия за счет снижения оплаты за загрязнение окружающей среды и использование смазочного материала РВ-ЗУМ, составляет 16852,06 руб./год на 1 т используемого материала.

Литература

1. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 672 с.
2. Шептухов В.Н., Решетина Т.В., Платонов И.Г. Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель (Управление охраны почв и земельных ресурсов Минприроды России) / Жиров А. А., Беликов А. Б., Лыков М.Г. (Управление мониторинга земель и охраны почв Роскомзема), 1994. – 19 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Булатников М.В., Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Шевченко С.С. Математическое моделирование квазистационарных электромагнитных полей линий электропередач высокого напряжения	4
Науменко Я.А., Астахов В.И. Экстраполяция предельного значения силы левитации электродинамического подвеса в зону конечных крейсерских скоростей	13
Кисилёв Е.Г., Кондаков О.В., Токарев В.В. Моделирование магнитопротекания планарного волновода	15
Ладанов А.С. Математическая модель случайных воздействий возмущающих факторов	19
Ладанов А.С. Математическая модель результирующего тока высших гармонических составляющих от нескольких источников, искажающих параметры электрической сети	22
Соломин Б.А., Ходаков А.М. Обратная задача по определению коэффициента температуропроводности охлаждаемой жидкости	26
Белов А.А., Баранников А.Б. Моделирование гидродинамики коллекторного теплообменника с помощью теории графов	28
Воловиков В.Ю. Уточнение математической модели внутрикотловой схемы барабанного котла высокого давления	31
Поландов Ю.Х., Власенко С.А. Модель выброса воды через предохранительный клапан в паровых котлах малого давления	33
Бочаров А.Ю. Понятие критерия оптимальности при выборе эффективного решения экономических задач	36
Медведев А.В. Моделирование оптимальной экономической динамики	39
Денисенко Т.И. Нелинейные модели межотраслевого баланса. Существование и единственность неотрицательного решения	41
Сивелькин В.А. Особенности построения модели Бокса и Дженкинса для инвестиций в основной капитал на региональном уровне	44
Кузнецова В.Е. Моделирование сезонной корректировки ряда численности занятых в сельском хозяйстве с использованием ППП Statistica	46
Bazhanov A.V. Modeling of the extraction of nonrenewable resources with the use of a variational principle	48
Мешкова Е.В., Мешков В.Е. Графическое представление ассоциаций в нейронной сети	49
Мешков В.Е., Мешкова Е.В. Обоснование выбора особей для проведения мутаций в базовом генетическом алгоритме	50
Каменев Л.И., Хадарцев А.А., Наумова Е.Н., Карташова Н.М., Маленко И.В. Упрощенный математический анализ оценки эффективности реабилитации больных с бронхообструктивным синдромом	53
Калинин П.В., Суржко О.А. Оценочная модель экономической эффективности использования смазочного материала РВ-ЗУМ	55

Научное издание

Моделирование. Теория, методы и средства

Материалы IV Международной научно-практической конференции
Часть 1

Редактор: Е.В. Кулыгина
Компьютерная верстка: М.К. Аверьянова

Подписано в печать 25.05.04 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Печ. л. 3,93. Уч.-изд. л. 4,46. Тираж 100 экз. Заказ 47-1737.

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)
Адрес университета и центра оперативной полиграфии:
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. 55-222

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

*Материалы
IV Международной научно-практической
конференции*

Часть 2

*9 апреля 2004 года
г. Новочеркасск*

Новочеркасск 2004

УДК 519.688
ББК 22.18 в6
М 74

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки РФ;
Северо-Кавказский научный центр высшей школы;
Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт);
Технический университет Ильменау (ФРГ);
Редакция журнала «Известия вузов. Электромеханика»;
Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион.
Технические науки»;
Ростовский государственный медицинский университет

Оргкомитет конференции:

Н.И. Горбатенко (РФ), профессор – председатель;
Ю.А. Бахвалов (РФ), профессор;
Г. Вурмус (ФРГ), профессор;
Г. Йегер (ФРГ), профессор;
Е. Калленбах (ФРГ), профессор;
М.В. Ланкин (РФ), доцент – зам. председателя;
Н.Ф. Никитенко (РФ), профессор;
А.В. Павленко (РФ), профессор;
В.А. Плаксин (РФ), доцент;
В.Н. Чернов (РФ), профессор

Редакционная коллегия:

Н.И. Горбатенко, д-р техн. наук, профессор – ответственный редактор;
М.В. Ланкин, канд. техн. наук, доцент – зам. ответственного редактора;
В.А. Плаксин, канд. техн. наук, доцент

М 74 Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы IV Ме-
ждународ. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 9 апр. 2004 г.: В 4 ч. / Юж.-
Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – Ч. 2. – 63 с.

ISBN 5-88998-462-4

Сборник содержит материалы по нескольким научным направлениям. Вторая часть содержит материалы, посвященные математическому моделированию технологических процессов; математическим моделям в строительстве, математическим моделям в химии и металлургии.

УДК 519.688

ISBN 5-88998-462-4

© Южно-Российский государственный
технический университет (НПИ), 2004
© Авторы, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт) – крупнейший вуз на юге России, имеющий вековой опыт исследований в различных отраслях науки и техники и обширные научно-технические контакты, – выступил инициатором проведения ряда Международных дистанционных научно-практических конференций. Такая форма проведения конференций стала возможной в результате широкого развития телекоммуникационных технологий, в том числе Internet.

В апреле 2004 года на базе ЮРГТУ (НПИ) проходила IV Международная научно-практическая конференция «Моделирование. Теория, методы и средства». В работе конференции приняли участие ученые и специалисты – представители высших учебных заведений, НИИ, научно-производственных предприятий Москвы, Екатеринбурга, Новосибирска, Краснодара, Иркутска, Ростова-на-Дону, Казани, Томска, Тулы, Оренбурга, Владивостока, Орла, Ставрополя, Таганрога, Перми, Ижевска, Новочеркаска, Шахты и других городов.

На конференцию представлено 72 доклада, которые вошли в сборник, состоящий из четырех частей, в соответствии с научными направлениями.

Первая часть содержит публикации о математических моделях в электротехнике и магнитной гидродинамике; математических моделях в теплотехнике и гидравлике; математическом моделировании социальных и экономических процессов; математических моделях в медицине, биологии и экологии.

Вторая часть содержит материалы, посвященные математическому моделированию технологических процессов; математическим моделям в строительстве, математическим моделям в химии и металлургии.

В третьей части рассмотрены вопросы математических моделей в энергетике и электромашиностроении; математических моделей в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях.

В четвертую часть вошли материалы о математическом моделировании информационно-измерительных и вычислительных систем; физическом моделировании в науке и технике; учебно-методические вопросы преподавания основ моделирования в учебном процессе.

Организаторы выражают уверенность, что конференция послужит обобщению и распространению научных результатов, оказанию методической помощи молодым ученым и аспирантам, а также стимулированию контактов между учеными России и зарубежья, с благодарностью примут замечания и пожелания.

Оргкомитет

О СТРУКТУРЕ, ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ МАСШТАБЕ, ДИНАМИКЕ И МЕХАНИЗМЕ ПРОБОЯ КОНТАКТНЫХ ВИХРЕВЫХ ПОЛЕЙ

А.В. Бородай, С.В. Салтыков

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

На основе развития представлений о контактных вихревых полях, как особом индуцированном объекте, конкретизированы вопросы структуры, пространственно-временного масштаба, динамики и механизма пробоя указанных полей.

Вихревые поля являются исключительно широко распространенным и повсеместно присутствующим природным объектом. Можно считать, что все материальные объекты – тела и процессы – являются формой существования вихревых полей [1, 2]. Особая роль из всех их форм и видов принадлежит контактным вихревым полям, сосредоточенным между поверхностями контактирующих тел или расположенным вблизи свободных поверхностей и являющимся неотъемлемой частью поверхности. Важнейшей особенностью контактных вихревых полей является то, что эти поля представляют собой фактор преобразования внутренней энергии в механическую, обеспечения движения микро- и макроскопических объектов вдоль поверхности и формирования самих этих объектов и систем движения. Указанные свойства полей позволяют предположить наличие их особой структуры и особых закономерностей, которым подчиняются эти поля, рассмотрению которых посвящены, в частности, работы [3, 4]. В данной работе дополняются и уточняются представления об указанных полях.

При рассмотрении вопроса о контактных вихревых полях необходимо прежде всего отметить принципиальность и важность присутствия и действия полей поверхностных и потенциальных сил и второстепенность или во все незначимость фактора относительного движения тел и объектов в формировании первичных вихрей поля. Тем самым, следует подчеркнуть факт возникновения и существования вихрей полей как следствие (статических) индукционных явлений, обусловленных присутствием полей поверхностных сил и потенциальных полей. Исключительная роль указанных полей в их действии на зону контакта или свободную поверхность обусловлена, с одной стороны, чрезвычайно высокой удельной мощностью поверхностного силового поля, а с другой – высокими значениями градиента плотности вещества и сил в указанной зоне, обеспечивающими протекание ее интенсивной структурной перестройки [3]. Результатом такой перестройки является формирование уплотненных упрочненных объектов – вихрей, ориентированных вдоль линии действия поля и ограниченных периферией, представляющей собой тонкую нерастяжимую пленку. Пространство, занимаемое вихрями, сосредоточивает в себе основную массу вещества зоны контакта.

Вследствие обратной зависимости угла отклонения индуцированных элементов периферии от плотности элементарных слоев зоны контак-

та [3] в условиях тождественности (равенства) свойств контактирующих поверхностей (канонический случай) вихри тела приобретают округлую форму. Идеальная структура элементарного вихря представлена на рис. 1.

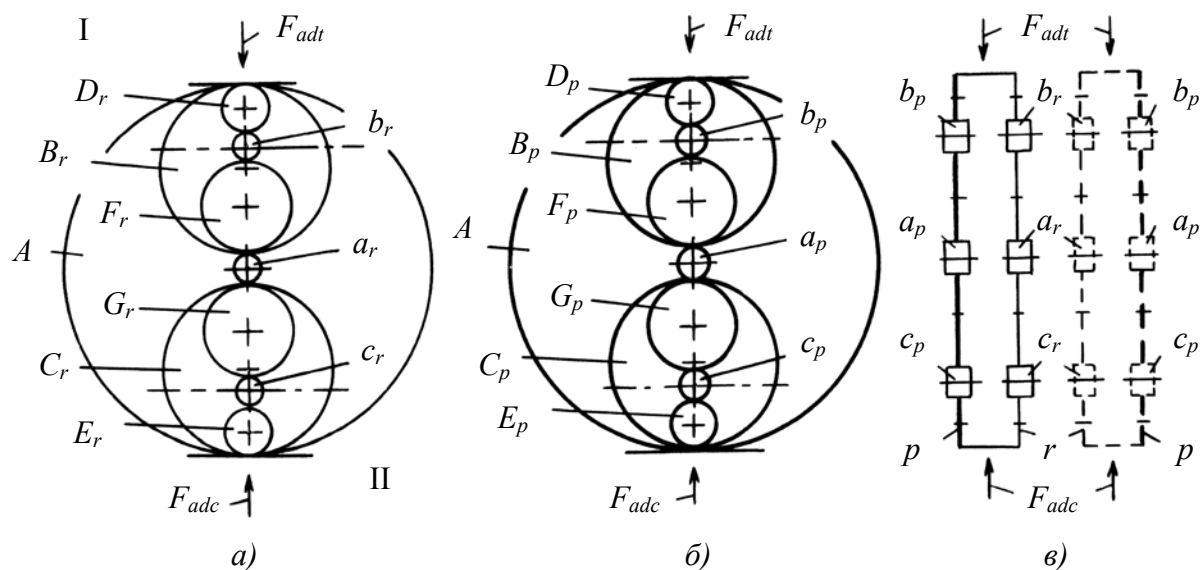


Рис. 1. Схема взаимодействий периферии суммарного и составляющих вихрей поля:
I – тело, II – контртело; *a*, *б* – продольный, *в* – поперечный разрез системы

Из приведенной схемы следует, что суммарный вихрь *A* сосредоточен в двух параллельных (активной *p* и пассивной *r*) ветвях системы и характеризуется наличием двух основных составляющих *B* и *C*, обусловленных присутствием в системе тела, контртела и третьего тела, а также вихрей подслоя *D* и *E* и вихрей поверхности *F* и *G*, входящих в состав вихрей *B* и *C*. Все вихри являются круговыми [4]. Следует отметить присутствие в составе суммарного вихря разделительных округлых частиц *a*, *в* и *с*, располагающихся в зонах изменения знака градиента (потенциальных ямах) [2, 4], причем указанные частицы могут совершать как сложное поступательное и вращательное, так и простое поступательное движение. Последнее имеет место в период нахождения в зоне частиц первичной вихревой складки (первичного трибоимпульса), совершающей циклические нормальные перемещения в зоне контакта [3]. Из этого следует, что разделительные частицы подслоя и поверхности не могут одновременно осуществлять поступательное движение; если частицы поверхности *a* движутся поступательно, частицы подслоя *в* и *с* совершают сложное поступательное и вращательное движение и, наоборот, в период поступательного движения частиц *в* и *с* движение частиц *a* является сложным, поступательным и одновременно вращательным. Наличие указанных частиц показывает, что точка контакта периферии двух соседних вихрей или точка контакта периферии вихрей с подслоем тел фактически представляет собой протяженный материальный объект, движение которого в общем случае характеризуется различными скоростями, обеспечивая подсистеме «разделительная частица – смежный вихрь» возможность поступательного движения со скоростью V_3 (рис. 2). V_t , V_c и V_3 – соответственно скорости движения тела,

контртела и третьего тела. Несмотря на часто малый, точечный пространственно-временной масштаб, указанные частицы могут иметь различный порядок малости и, в частности, являться макроскопическими (частицы a).

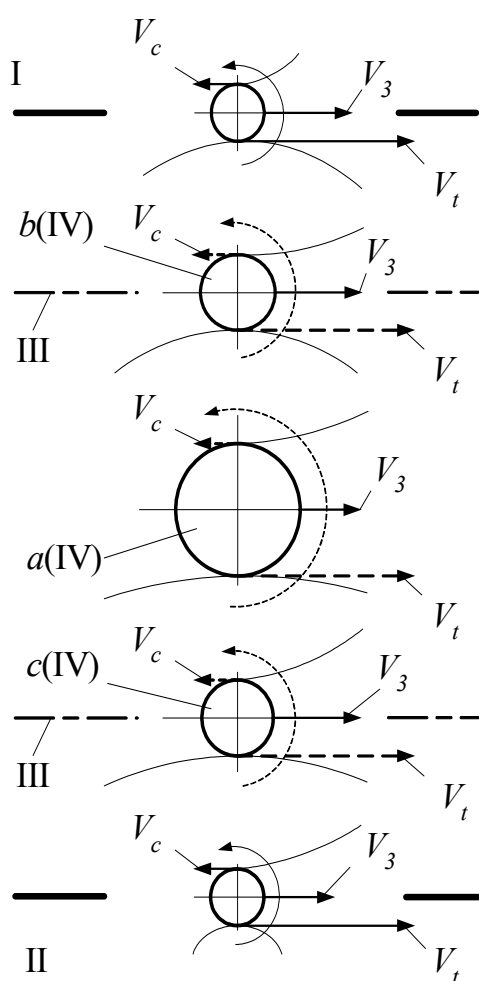


Рис. 2. Схема распределения линейных скоростей частиц зон взаимодействий вихрей и соотношения размеров частиц: III – поверхность трения, IV – составляющие структуры канонического третьего тела

Анализ вопроса о структуре и динамике контактных вихревых полей свидетельствует о чрезвычайной важности и многоплановости свойств и функций разделительных частиц и зон их расположения в структуре поля. Прежде всего можно полагать, что зоны присутствия частиц являются зонами туннелирования поля поверхностных и потенциальных сил через вещество вихрей и, соответственно, зонами, обеспечивающими присутствие туннелированной, остронаправленной составляющей силового поля. Последнее обуславливает формирование внутри вихрей особых индуцированных стержневых систем – фрикционных связей [3], жесткость и ориентация которых являются существенно более выраженными в сравнении с периферией вихрей. Одним из результатов формирования фрикционных связей является неизбежная деформированность, некруглость составляющих реального вихревого поля (рис. 3), обуславливающая наличие режимов предварительного смещения и страгивания тел (пробоя вихревых полей).

Данные работы [4] совместно с приведенными выше позволяют заключить, что процесс предварительного смещения обусловлен процессами тангенциального индукционного упрочнения зон расположения разделительных частиц и зон стержней, смежных с ними. Конкретно – взаимным лавинообразным (лавинным) упрочнением вещества зон стержней 3 и 5, 4 и 6, смежных с зонами расположения частиц b и c , возникающим при приложении к телам сдвигающих сил. Сущность процесса упрочнения состоит в нагромождении вещества элементарных слоев указанных зон и перемещении вследствие этого указанных частиц в поле потенциальных и поверхностных сил в сторону подслоя тел нормально поверхности. Процесс пробоя полей наступает в момент исчерпания возможностей упрочнения зон расположения частиц, степень которого находится в прямой зависимо-

сти от значения угла контактной деформации α_f (предельного угла отклонения стержней 3 и 4 от нормали к поверхности трения, рис. 3).

Следовательно, уменьшение величины предварительного смещения и ускорение пробоя полей достигается уменьшением угла α_f , обеспечиваемым при скольжении увеличением градиента плотности вещества поверхностных слоев, а при качении – повышением жесткости и обеспечением округлости формы тел при возможно большем диаметре катящегося тела. Следует различать пробой стержневых систем (фрикционных связей) и пробой полей в целом. Пробой стержневых систем, вследствие их высокой ориентированности и практически полного исчерпания возможностей тангенциального упрочнения, имеет место всегда (режим внутреннего трения, в том числе при неподвижном контакте).

Пробой же вихревых полей (зон периферии вихрей) и страгивание тел наступает только при достижении некоторого предельного значения тангенциальных движущих сил, действующих в системе, также находящегося в прямой зависимости от угла α_f . Следовательно, как физический контакт тел, так и свободные поверхности всегда являются системами, в которых непрерывно осуществляется фрикционное взаимодействие, вне зависимости от того, имеет ли место непрерывное однонаправленное движение элементов системы или это движение отсутствует.

Дальнейшее рассмотрение вопроса о роли разделительных частиц показывает, что значение указанных частиц и зон их расположения при относительном движении тел, в динамике, не меньше, чем при покоящемся контакте. В частности, можно предположить, что поступательное движение стержневых систем и канонических третьих тел и, следовательно, возможность осуществления процессов преобразования энергии в системе [3] обусловлены противовращением стержней систем, обеспечиваемым туннелированием силовых полей (рис. 4). Можно предположить также, что формирование частиц износа и излучение частиц звуковых колебаний (трибофононов), которое можно рассматривать как одну из форм изнашивания, неразрывно связано с угловыми колебаниями стержней 3_r и 4_r , присутствием частиц b и c в структуре поля, их циклическими поступательными перемещениями и способностью распространяться за пределы зоны контакта.

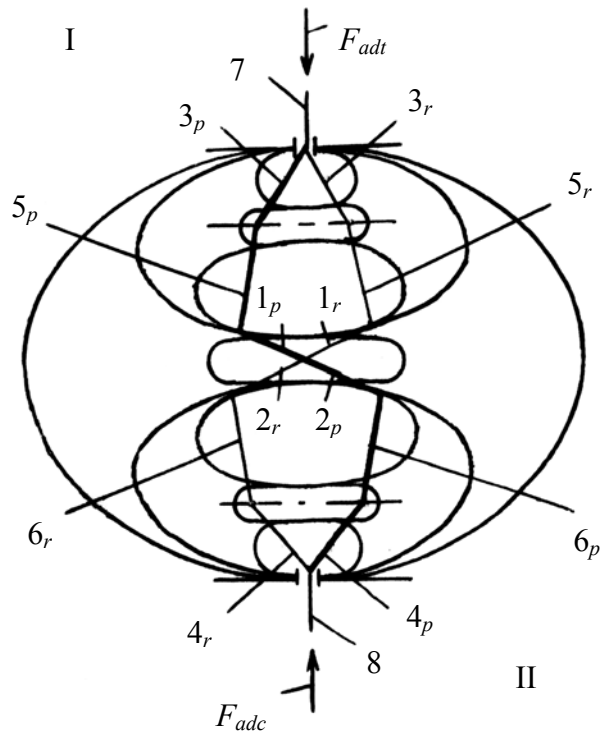


Рис. 3. Комплексная структура суммарного вихря

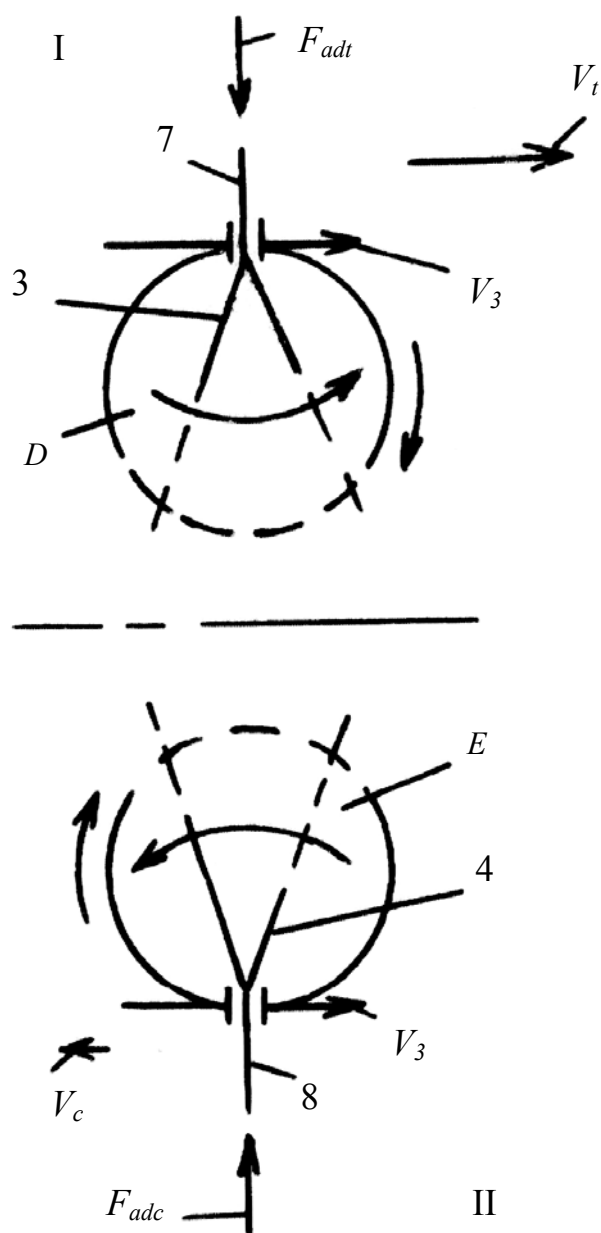


Рис. 4. Схема процесса противовращения стержней, обеспечивающего поступательное движение стержневых систем

градиент плотности в подслое тела, характеризующегося повышенным уровнем поверхностных сил, возрастает. Тем самым, создаются предпосылки перехода к высокоэффективному организованному и сократительно-му процессам взаимодействий.

Важную роль при этом играют процессы производства продуктов трибодеструкции и частиц массопереноса, протекающие в зоне фрикционного контакта. Роль продуктов трибодеструкции состоит в индукционном (поляризационном) усилении действия полей поверхностных сил контактирующих тел, которое, в зависимости от фазы вторичного процесса, может как увеличивать градиент плотности вещества подслоя тел, так и снижать его. Процесс же фрикционного переноса частиц упруго-пластического поглощения, направленный в сторону канонического

С наличием зон промежуточных частиц неразрывно связано также формирование и непрерывное присутствие в системе канонического третьего тела как особого функционального объекта и фактора взаимодействий. Можно видеть, что, являясь результатом взаимного внедрения элементов профилей контактирующих тел, происходящего в зонах расположения частиц a , третье тело представляет собой объект формирования собственного наведенного поля поверхностных сил F_{ad3} , являющегося противополопом по отношению к полям поверхностных сил тела и контртела F_{adt} и F_{adc} (рис. 5). Это обеспечивает возможность полного или частичного экранирования действия полей тела и контртела на подслое парных им тел и повышение градиента плотности подслоя контактирующих тел. Преобладание полей одного из тел пары приводит к частичному преодолению экранирующего действия поля сил F_{ad3} , смещению третьего тела в сторону подслоя этого тела, интенсификации воздействия поля сил данного тела на подслое парного тела и уменьшению градиента плотности в подслое парного тела. При этом

третьего тела, всегда способствует усилению экранирования третьим телом полей тел, находящихся в контакте, т.е. ослаблению их взаимного воздействия на поверхность парного тела. Следует отметить наличие фаз разъединения элементов третьего тела и периодического присутствия разъединенных элементов тела в зоне частиц *в* и *с* в каноническом процессе и непрерывного состояния разъединения третьего тела в организованном и сократительном процессах.

И, наконец, с присутствием промежуточных частиц неразрывно связано понятие поверхности трения, располагающейся в зонах положения равновесия частиц, характеризующихся наибольшей подвижностью (наименьшей глубиной потенциальных ям). В соответствии с приведенным выше, при каноническом процессе должны иметь место две одновременно функционирующие поверхности трения, при организованном процессе движения – одна (расположенная вблизи подслоя контртела) и при сократительном процессе – две поочередно функционирующих (рис. 6).

В заключение следует отметить, наличие широких пределов, которыми характеризуется пространственно-временной масштаб вихревых полей и которые обусловлены конкурирующим действием туннелированных полей потенциальных и поверхностных сил. В случае преобладания в системе туннелированных полей потенциальных сил, в особенности упругих, масштаб полей макроскопический. Макроскопической составляющей поля являются составляющие вихри *D* и *E*, а также стержни 3_p и 3_r . В случае преобладания туннелированных полей поверхностных сил контактные

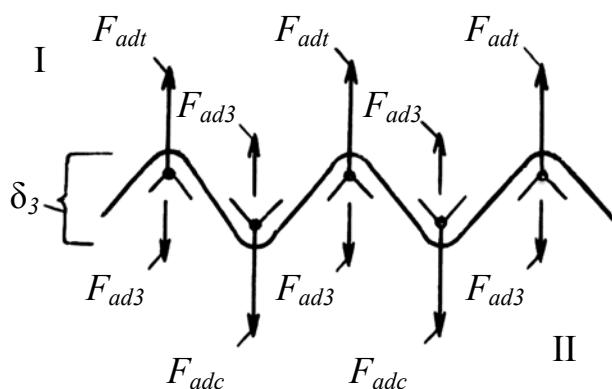


Рис. 5. Схема строения и действия поля сил канонического третьего тела; δ_3 — толщина третьего тела

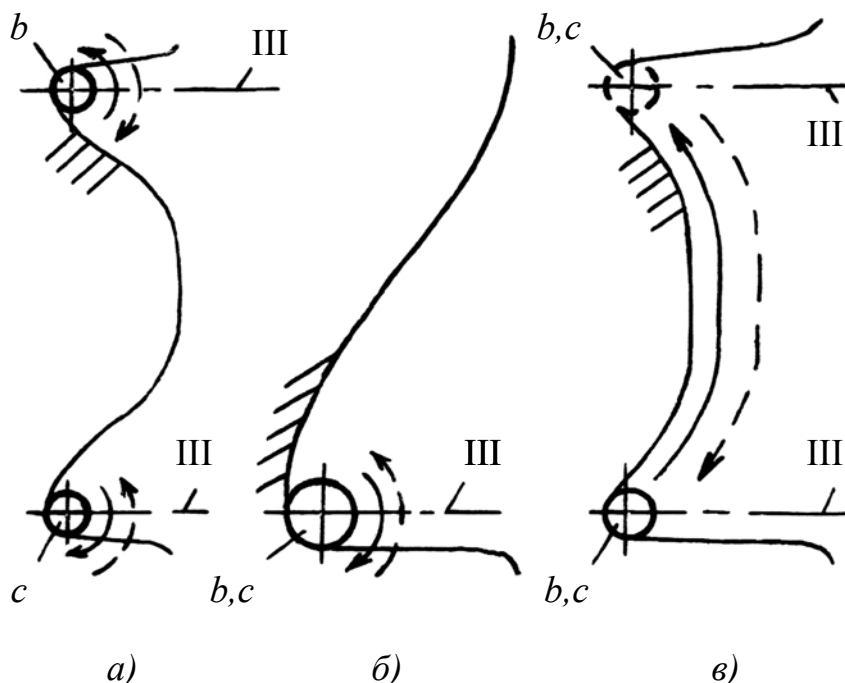


Рис. 6. Схема расположения поверхностей трения в зоне взаимодействий: *а* — канонический процесс; *б* — процесс организованного движения; *в* — сократительный процесс

вихревые поля имеют микроскопический и субмикроскопический масштаб. При этом, вследствие органической взаимосвязи и взаимопревращений полей поверхностных и потенциальных сил, преобладание одной из туннелированных составляющих поля сил исключает или существенно подавляет другую составляющую силового поля. Учитывая, что необходимым признаком организованной системы является ее макроскопический масштаб, можно предположить, что в процессе формирования и организации систем, первоначально микроскопических, имеет место тенденция перехода к дальнедействующим туннелированным полям сил тяготения и полям упругих сил, действие которых и обеспечивают дальнейший переход к высокоорганизованным системам и формированию биосферы. Причем, первоначально происходит формирование периферии микровихрей поля как исходной предпосылки, а затем туннелирование микро- и макрополей.

Выводы

1. Основная роль в формировании структуры контактных вихревых полей принадлежит статическому индукционному воздействию полей поверхностных и потенциальных сил на вещество зоны контакта.

2. Присутствие важнейших элементов поля – стержневых систем (фрикционных связей) – обусловлено туннелированием (фокусировкой) полей сил при их проникновении внутрь вещества вихрей, происходящем в зонах расположения особых частиц, разделяющих тела и вихри, а также составляющие вихревых систем.

3. Пространственно-временной масштаб полей находится в весьма широких пределах и определяется видом силового поля, под действием которого происходит формирование системы в целом или ее части. Частичное превалирование полей потенциальных сил обеспечивает макроскопический, а преимущественное действие полей поверхностных сил – микроскопический или субмикроскопический масштаб вихревых полей.

4. Физическая сущность процесса пробоя вихревых полей состоит в ограниченности возможностей перемещения центров масс (разделительных частиц) систем в полях поверхностных сил и потенциальных полях в направлении, нормальном поверхности трения. Процесс нормальных перемещений обусловлен взаимным лавинообразным упрочнением вещества вихрей подслоя и вихрей поверхности, представляющим собой нагромождение вещества элементарных слоев зоны контакта, результатом которого является увеличение угла отклонения стержней 3 и 4 (угла контактных деформаций α_f). Уменьшение возможностей упрочнения зоны контакта и ускорение пробоя полей обеспечивается повышением градиента прочности слоев (скольжение) или увеличением жесткости тел при обеспечении округлости их формы (качение тел).

5. Индуцированное поступательное движение стержневых систем и канонических третьих тел, происходящее при внешнем трении, обусловлено интенсивным противовращением составляющих стержней стержневых систем, совершающимся под действием туннелированного поля потенциальных или поверхностных сил.

6. Возникновение звуковых колебаний при трении и излучение трибофононов фрикционным контактом свидетельствуют о неразрывности понятий информации и макроскопического движения и, тем самым, о том, что, представляя собой одну из форм изнашивания, излучение звука является фактором распространения и повышения эффективности организованного движения в среде.

7. Одной из основных функций канонического третьего тела является предотвращение или уменьшение интенсивности (экранирование) действия поля поверхностных сил каждого из контактирующих тел на подслоя парного тела. Смещение третьего тела в сторону подслоя одного из тел пары означает возрастание действия поля сил этого тела, снижение градиента плотности и возрастание глубины потенциальных ям, в которых находятся разделительные частицы, в подслое второго тела пары.

8. Пространственное расположение поверхности трения в зоне контакта определяется положением статического равновесия частиц указанной зоны, характеризующихся наибольшей подвижностью (наименьшей глубиной потенциальной ямы). При каноническом процессе взаимодействий таких поверхностей (одновременно функционирующих) две – располагающихся вблизи подслоя каждого из контактирующих тел. При организованном процессе движения поверхность трения одна – расположенная вблизи подслоя контртела. В сократительном процессе поверхностей две – функционирующих поочередно вблизи активных элементов-нитей (контртело), охватывающих третье тело (миозиновую нить).

Литература

1. Эрдеи-Груз Т. Основы строения материи. – М.: Мир, 1976. – 488 с.
2. Максвелл Д.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 687 с.
3. Бородай А.В., Клименко А.В., Пономарев В.И. О стержневой модели процессов предварительного смещения, страгивания и восстановления энергии в трибосистемах // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2002. – Ч. 2. – С. 31-35.
4. Бородай А.В. О волновом трибоцикле как факторе движения и проектирования систем / Новочерк. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 1996. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 19.12.96, № 3702-B96.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 55-412, e-mail: klmno@yandex.ru

УДК 621.833.6

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУММИРОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТДЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Д.В. Дерябин, А.Ф. Емельянов, Л.О. Штриплинг
Снежинская государственная физико-техническая академия,
Омский государственный технический университет

Значительное влияние на точность работы зубчатой передачи оказывают динамические явления, возникающие в самой передаче при эксплуатации ее в реальных условиях.

Изучению динамических процессов в зубчатых передачах посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых: Э.Л. Айрапетова, Б.М. Абрамова, В.В. Аугустайтиса, В.Л. Дорофеева, М.Д. Генкина, В.К. Гринкевича, Н.А. Ковалева, Г.Б. Кожевникова, Л.А. Кудрявцева, О.И. Косарева, А.И. Петрусевича, П.К. Попова, М. Бентона, А. Сейрега и др.

Разработан ряд широко известных моделей, которые позволяют в той или иной мере оценивать вибровозбуждение в передаче. Условно можно выделить три основных направления разработок. К первому направлению можно отнести модели, учитывающие ударные процессы, возникающие при перезацеплении зубьев колес из-за наличия погрешностей шага зацепления. Сюда же можно отнести модели, рассматривающие виброударные колебания зубчатых колес в пределах боковых зазоров между зубьями. Ко второму направлению относятся модели, рассматривающие параметрические колебания, обусловленные периодическим изменением жесткости зацепления. К третьему направлению причислим модели кинематического возбуждения, вызываемого периодическими погрешностями зубчатых колес [1, 2].

Многообразие схем планетарных передач зачастую ведет к механическому переносу выводов, сделанных на основе исследований одной передачи, в том числе и экспериментальных, на все остальные, что затрудняет рассмотрение вопроса расчета их точности. В результате чего расчет точности одной и той же планетарной передачи, проведенный по зависимостям, взятым из разных источников, дает весьма значительный разброс результатов [3].

Такое состояние вопроса привело к необходимости дополнительного исследования, которое бы позволило, на основе учета всех особенностей суммирования погрешностей отдельных звеньев планетарных передач, разработать общую методику расчета стационарной динамико-кинематической погрешности.

Для планетарной передачи, выполненной по схеме $(3k)_{ea}^b$, схема суммирования погрешностей звеньев для одного из потоков представлена на рис. 1.

В этом случае погрешности ведущего центрального зубчатого колеса a и профиля зубчатого венца сателлита q_1 оказывают на положение всех звеньев передачи такое же действие, как если бы колесо a просто повернулось на угол, которому соответствует дуга окружности размером $e_a + e_{q1}$. Вследствие этого центральное зубчатое колесо e , являющееся выходным звеном данной передачи, повернется на угол, в передаточное число раз меньше. Погрешности центрального зубчатого колеса b и другого профиля q_2 того же зубчатого венца сателлита, провернут весь двухвенцовый сателлит относительно его полюса зацепления с колесом a , смещая при этом зубчатым венцом f колесо e по дуге окружности на величину

$$(e_b + e_{q2}) \cdot d_f / d_q.$$

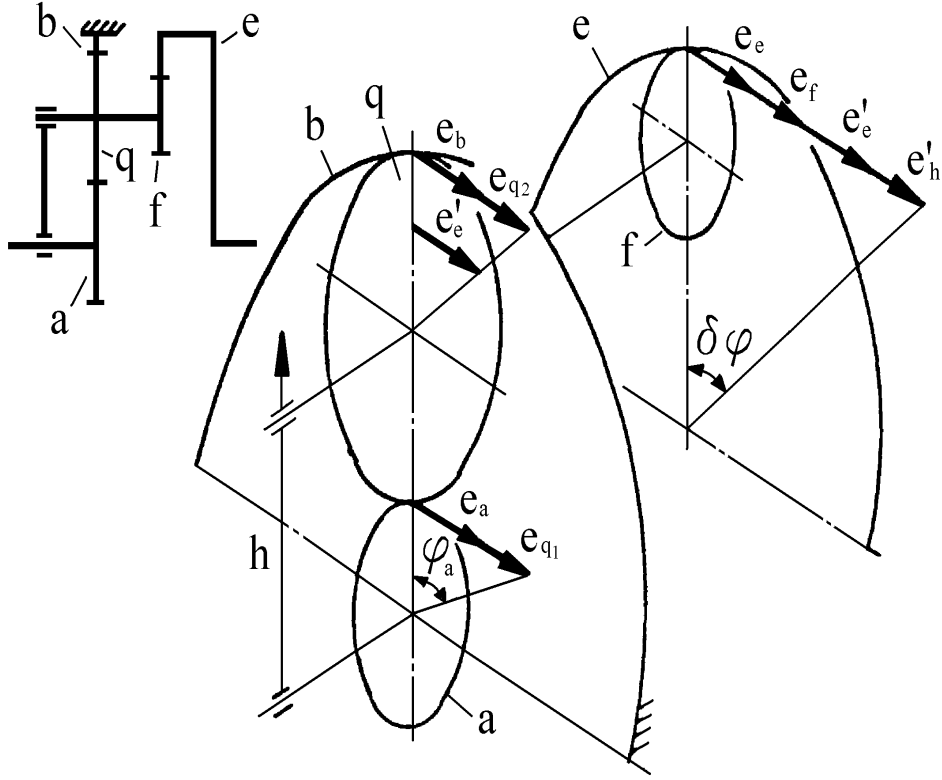


Рис. 1. Схема суммирования погрешностей звеньев

Погрешности самого колеса e и находящегося с ним в зацеплении зубчатого венца f вызовут дополнительное смещение колеса e еще на величину $e_e + e_f$. Погрешность водила через оба венца сателлита вызывает разное смещение колеса e по дуге окружности на величину

$$(l + d_f / d_q) \cdot E_h \cdot \operatorname{tg} \alpha_t \cdot \cos \varphi_h,$$

где α_t – угол зацепления колеса e .

Следовательно, текущее угловое отклонение выходного звена передачи $(3k)_{ea}^b$, формируемое k -ым потоком, можно представить формулой

$$\begin{aligned} \delta \varphi_k''(\omega_i \cdot t) = & \frac{206,3}{d_e} \cdot \left[\frac{l}{U} (E_a \cdot \cos(\omega'_a \cdot t + \varphi_a + \varphi_k) + E_{q1} \cdot \cos(\omega'_q \cdot t + \varphi_{q1} + \varphi_k) + \right. \\ & + E_{za} \cdot \cos(z_a \cdot \omega'_a \cdot t + \varphi_{za}) + E_{zq1} \cdot \cos(z_q \cdot \omega'_q \cdot t + \varphi_{zq1})) + \\ & \frac{d_f}{d_q} (E_b \cdot \cos(\omega'_b \cdot t + \varphi_b + \varphi_k) + E_{q2} \cdot \cos(\omega'_q \cdot t + \varphi_{q2} + \varphi_k) + \\ & + E_{zb} \cdot \cos(z_b \cdot \omega'_b \cdot t + \varphi_{zb}) + E_{zq2} \cdot \cos(z_q \cdot \omega'_q \cdot t + \varphi_{zq2})) + \\ & + (E_e \cdot \cos(\omega'_e \cdot t + \varphi_e + \varphi_k) + E_f \cdot \cos(\omega'_f \cdot t + \varphi_f + \varphi_k) + \\ & + E_{ze} \cdot \cos(z_e \cdot \omega'_e \cdot t + \varphi_{ze}) + E_{zf} \cdot \cos(z_f \cdot \omega'_f \cdot t + \varphi_{zf})) + \\ & \left. + 2 \left(1 + \frac{d_f}{d_q} \right) \cdot E_h \cdot \operatorname{tg} \alpha_t \cdot \cos(\varphi_h + \varphi_k) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Планетарная передача $(3k)_{ea}^b$ с одновенцовым сателлитом является частным случаем рассмотренной выше передачи, а следовательно, все рассуждения по расчету ее погрешности будут аналогичными, при расчете по формуле (1) следует принимать $d_f = d_q$, $E_{q1} = E_f$, $E_{zq1} = E_{zf}$.

Литература

1. Айрапетов Э.Л., Апархов В.И., Генкин М.Д. Возбуждение колебаний в планетарных механизмах // Колебания механизмов с зубчатыми передачами. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 15-28.
2. Айрапетов Э.Л., Апархов В.И., Генкин М.Д. Возбуждение колебаний в зубчатых передачах // Динамические процессы в механизмах с зубчатыми передачами. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 3-18.
3. Косарев О.И. Вибровозбуждение и динамические процессы в цилиндрических зубчатых передачах: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.18, 01.02.06. – М., 1997. – 269 с.

456770, г. Снежинск, ул. Дзержинского, д. 35, кв. 35, т. (35172)3-13-12,
e-mail: den_dvd@mail.ru

УДК 621.833.6

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Д.В. Дерябин, А.Ф. Емельянов, Л.О. Штриплинг
Снежинская государственная физико-техническая академия,
Омский государственный технический университет

Значение стационарной динамико-кинематической погрешности для планетарной передачи без специальных требований к сборке определяется сочетанием случайных величин, поэтому ее расчет необходимо вести с применением вероятностных методов.

Используя опыт расчета кинематических цепей, состоящих из нерегулируемых зубчатых передач [1, 2], вероятностное значение амплитуды стационарной динамико-кинематической погрешности планетарной передачи будет определяться по зависимости

$$\delta\varphi_p'' = 0,5 \cdot K_h \cdot \left(\sum_{j=1}^3 (\delta\varphi_{\max j}'' + \delta\varphi_{\min j}'') + t_v \cdot \sum_{j=1}^3 (\delta\varphi_{\max i}'' + \delta\varphi_{\min i}'')^2 \right) \quad (1)$$

здесь $\delta\varphi_{\max j}''$ – приведенное к выходному валу максимально возможное значение стационарной динамико-кинематической погрешности, которое способна вызвать пара соприкасающихся зубчатых колес; $\delta\varphi_{\min j}''$ – приведенное к выходному валу, минимально возможное, т.е. рассчитанное с учетом всех возможных компенсаций, значение стационарной динамико-кинематической погрешности той же пары зубчатых колес; t_v – коэффициент, принимается в зависимости от процента риска Р по таблице [1]; K_h – коэффициент, учитывающий влияние количества потоков

планетарной передачи и точность изготовления водила, определяется по графикам, аналогичным приведенному на рис. 1. Как показали расчеты, при точности изготовления водила не ниже точности изготовления зубчатых колес и количестве потоков не менее трех для планетарных передач с одновенцовыми сателлитами можно принимать $K_h = 0,67$, для планетарных передач с двухвенцовыми сателлитами $K_h = 0,53$.

Таблица

Значение коэффициента t_v				
Процент риска Р	10	4,5	1,0	0,27
Коэффициент t_v	0,26	0,35	0,48	0,57

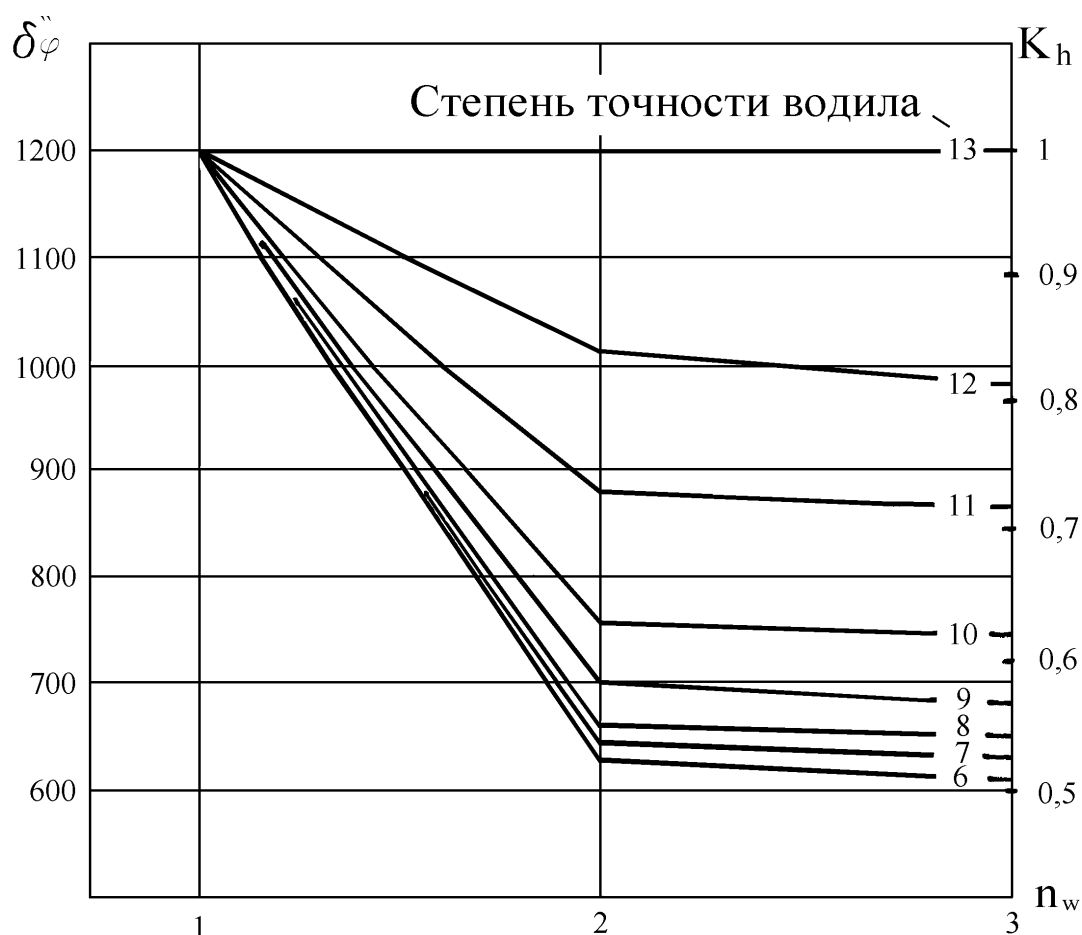


Рис. 1. Точность изготовления водила

Сравнение представленных результатов, а также результатов расчета и экспериментальных данных, полученных при исследовании одиночных образцов различных типов планетарных передач, позволяет сделать вывод об адекватности предлагаемого метода расчета реальному процессу образования стационарной динамико-кинематической погрешности.

Литература

1. Астроследящие системы / Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
2. Тимофеев Б.П. Характеристики распределения погрешностей передаточного отношения пары зубчатых колес и простого ряда // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1985. – № 2. – С. 20-26.

456770, г. Снежинск, ул. Дзержинского, д. 35, кв.35, т. (35172)3-13-12,
e-mail: den_dvd@mail.ru

УДК 621.9.06-529

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСХОДНОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

Я.Ю. Шленский, Б.Б. Пономарев

Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ)

Описан метод определения размеров исходной инструментальной поверхности и алгоритм построения ее формы.

Обоснованный выбор типоразмера инструмента и его проектирование для трехкоординатного фрезерования поверхностей свободной формы является одной из наиболее сложных задач при формировании стратегии обработки. Максимальная эффективность формообразования достигается повышением степени конформности инструментальной поверхности с поверхностью детали, при этом необходимо учитывать ограничения, накладываемые механическими свойствами материала заготовки и инструмента. Известно, что чистовую обработку поверхностей, имеющих сложный профиль, производят несколькими инструментами, добиваясь повышения производительности и учитывая возникающие дополнительные вспомогательные движения и затраты времени на его смену. При выборе инструмента и проектировании его исходной поверхности разработчики САПР, как правило, стремятся установить взаимосвязь формообразуемой и формообразующей поверхностей и, используя критерии оптимизации, определить комплект необходимого для обработки инструмента из базы данных, а для фасонного инструмента рассчитать основные геометрические параметры исходной поверхности. Для этого необходимо иметь полную информацию о форме и размерах детали или ее модели.

В работах [1, 2] для определения формы, параметров микрогеометрии и проверки условий фрезеруемости предлагается использовать проекционное изображение модели, сориентированной в направлении оси z . Для этого используется полутонное растровое изображение, которое можно получить по результатам построений в большинстве систем технологической подготовки производства. Источником фотореалистичных изображений может быть световой поток, смоделированный программой для компьютерного пространственного объекта и данные об освещенности. Эту

задачу выполняют модули визуализации в некоторых программных пакетах, таких как ArtCAM и PowerMill. При визуализации компьютерной модели погрешности освещения, обработки и оцифровки изображения отсутствуют, поэтому она отображает идеальную деталь. Источником исходных данных служат рисунки в формате ***bmp**, которые могут быть получены непосредственно в модулях черчения и трехмерного моделирования. Эти изображения содержат информацию о контурах детали и имеют, как правило, небольшое количество цветов.

В качестве входных данных для получения профиля инструмента в предлагаемом методе моделирования используется двухмерное растровое полутоновое отображение трехмерной модели на плоскости, что соответствует точечному представлению координат x и y в пикселах, а по оси z в яркостях с разрешением $1/256$ оттенков серого. В этом случае у неинвертированной модели максимальная высота трехмерного пространства соответствует белому цвету, минимальная – черному, а промежуточные элементы, образующие криволинейный профиль, отображаются в оттенках серого. Как известно, при трехкоординатном фрезеровании сложных поверхностей инструментальную поверхность лимитирует форма вогнутых областей детали, которые могут быть представлены как участки кинематической поверхности, образованной направляющими и образующими.

Выделение направляющих предложено производить по перепадам яркости. Для этого использованы линейные и нелинейные фильтры. Результатом является бинарное изображение, преобразованное так, что пиксеты, в окрестности которых имеет место перепад яркости, изменяют цвет на белый, остальным же пикселям присваивается черный цвет.

Выделение вертикальных перепадов при линейной фильтрации осуществляется дифференцированием по строкам, горизонтальных – по столбцам. Дифференцирование производится в цифровой форме:

$$g_{i,k} = \Delta f_{i,k} / \Delta x = f_{i,k} - f_{i,(k-1)} \text{ (по строкам);}$$

$$g_{i,k} = \Delta f_{i,k} / \Delta y = f_{i,k} - f_{(i-1),k} \text{ (по столбцам);}$$

Здесь $\Delta x = 1$ – приращение вдоль строки, равное 1 пикселу, $\Delta y = 1$ – приращение вдоль столбца, также равное 1 пикселу (рис. 1), $f_{i,k}, f_{(i-1),k}, f_{i,(k-1)}$ – уровни яркости пикселей соответственно с координатами $i, k; i-1, k; i, k-1$. Выделение перепадов по диагонали можно получить, вычисляя разности уровней диагональных пар элементов.

Выделение горизонтального перепада можно выполнить также путем вычисления приращения

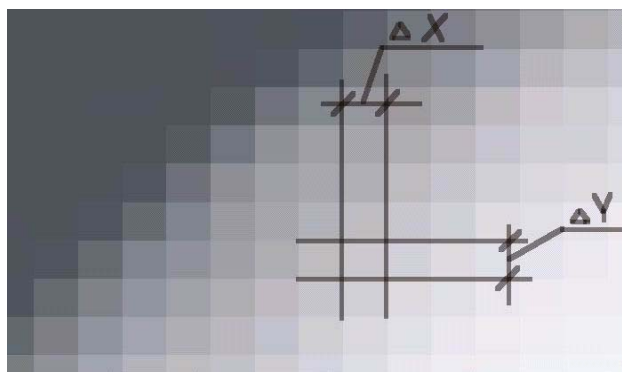


Рис. 1. Схема определения перепадов яркости по x и y

разности яркостей пикселей вдоль строки, что равноценно вычислению второй производной по направлению (оператор Лапласа):

$$g_{i,k} = \Delta^2 f_{i,k} / \Delta x^2 = [f_{i,k} - f_{i,(k-1)}] - [f_{i,(k+1)} - f_{i,k}] = 2f_{i,k} - f_{i,(k-1)} - f_{i,(k+1)}.$$

Таким же образом можно искать перепады по вертикали и по диагонали.

Для выделения контуров и перепадов яркости могут применяться нелинейные фильтры. При этом используются так называемые маски, представляющие собой аналог матрицы размером $N \times N$ (2×2 , 3×3 и т.д.), в которых элементы маски накладываются на элементы полутонового растрового изображения с последующим перемещением маски по всему изображению и его бинаризации описанным выше образом. В нелинейных алгоритмах используют нелинейные операторы дискретного дифференцирования.

В **фильтре Робертса** используется перемещающаяся по изображению маска 2×2 :

$$\begin{vmatrix} f_{i,j} & f_{i,j+1} \\ f_{i+1,j} & f_{i+1,j+1} \end{vmatrix}.$$

Дифференцирования производятся с помощью одного из выражений

$$g_{i,j} = \left\{ (f_{i,j} - f_{i+1,j+1})^2 + (f_{i,j+1} - f_{i+1,j})^2 \right\}^{1/2}, \quad g_{i,j} = |f_{i,j} - f_{i+1,j+1}| + |f_{i,j+1} - f_{i+1,j}|.$$

В **фильтре Собела** используется окно 3×3 :

$$\begin{vmatrix} f_{i-1,j-1} & f_{i-1,j} & f_{i-1,j+1} \\ f_{i,j-1} & f_{i,j} & f_{i,j+1} \\ f_{i+1,j-1} & f_{i+1,j} & f_{i+1,j+1} \end{vmatrix}.$$

Центральному (i,j) -му пикселу вместо $f_{i,j}$ присваивается значение яркости $g_{i,j} = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ либо $g_{i,j} = |X| + |Y|$, где

$$X = (f_{(i-1),(j-1)} + 2f_{(i-1),j} + f_{(i-1),j+1}) - (f_{i+1,(j-1)} + 2f_{i+1,j} + f_{i+1,j+1});$$

$$Y = (f_{(i-1),(j-1)} + 2f_{i,(j-1)} - f_{i+1,(j-1)}) - (f_{(i-1),j+1} + 2f_{i,j+1} + f_{i+1,j+1}).$$

Для выделения перепадов яркости в предлагаемом методе использован фильтр Собела (рис. 2,в), как более гибкий и чувствительный к небольшим перепадам яркости.

Алгоритм определения перепадов яркости предусматривает:

1) сканирование пикселей бинарного изображения после фильтрации: координаты линий перепадов яркости вводятся в матрицу, причем размер матрицы соответствует размеру изображения, черные пиксели соответствуют нулевому значению, а белые – единице.

2) пользуясь методом кусочно-линейной аппроксимации соседние пиксели линий перепадов яркости объединяются прямыми.

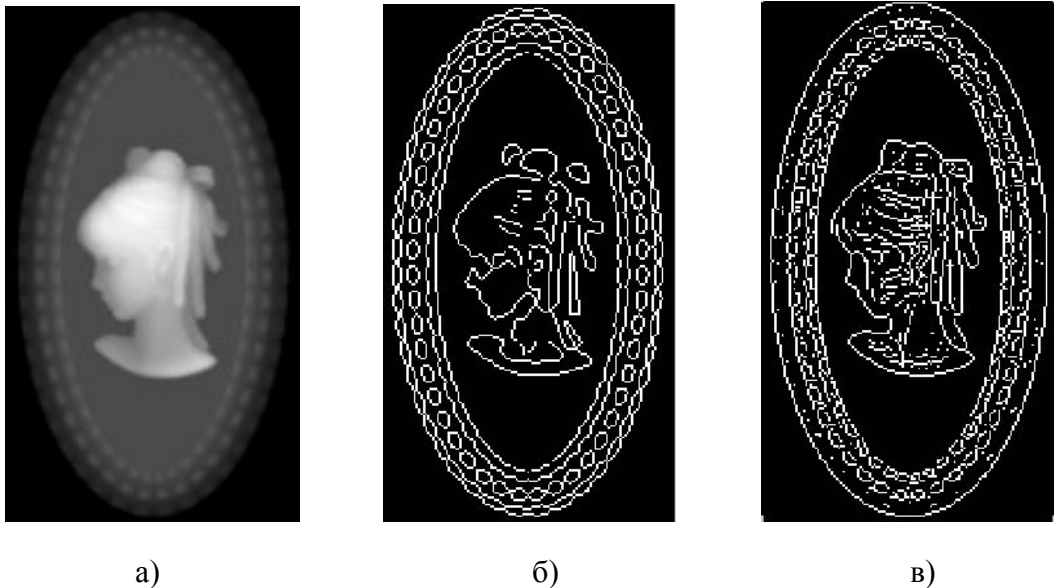


Рис. 2. Пример применения фильтров: а – исходное изображение, б – изображение после применения линейного фильтра, в – результат работы фильтра Собела

3) для всех i точек в каждой $i+1$ -й проводится перпендикуляр к этой прямой в направлении увеличения яркости пикселей.

4) на следующем этапе формируется профиль яркости пикселей вдоль перпендикуляров к кривым перепада яркости (рис. 3).

Количество точек, в которых проверяется яркость при построении профиля, устанавливается приблизительно равным числу пикселей, которые пересекают путь. Для полутонового изображения выходной параметр является одномерным массивом.

Если для полученных изображений дополнительно определим два выходных параметра x и y , то функции построения электронной модели в координатах x и y позволят вновь перейти к пространственной системе координат, по данным которой получены значения яркости. Для получения значений яркости в произвольной точке изображения используем интерполяцию по значениям в соседних точках.

После обработки изображения определяем диаметр инструментальной поверхности, для чего в каждой контрольной точке строим окружность с центром в этой точке и диаметральной линией, находящейся на прямой, для которой строится профиль яркости. При этом уровень яркости на периферии профиля больше или равен уровню яркости точки на прямой, пересекающей окружность в любом направлении (рис. 4).

На последнем этапе группируются комбинации координат образующих инструментальных поверхностей в плоскостях XOZ (плоскость,

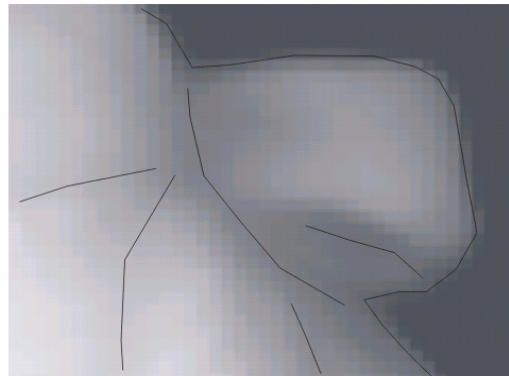


Рис. 3. Увеличенный фрагмент изображения детали с наложенными на него выделенными участками перепада яркости пикселей

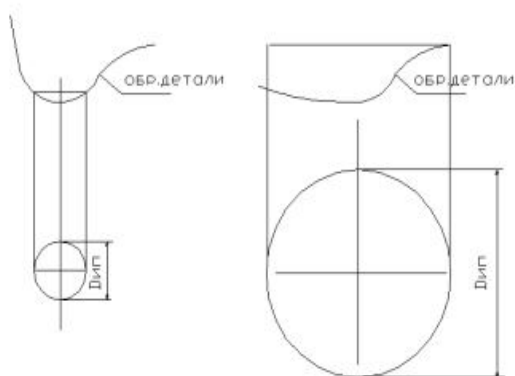


Рис. 4. Определение диаметра $D_{ип}$ инструментальной поверхности:

Обр. детали – профиль яркости детали в данном сечении

параллельная вертикальной оси z), и значений соответствующих им диаметров инструментальных поверхностей в плоскости XOY (плоскость полутонового изображения).

Задача при этом заключается в том, чтобы используя множество координат точек образующих инструментальных поверхностей (при совмещении минимума яркости профиля с центром локальной системы координат), разбить это множество и множество диаметров инструментальных поверхностей на m -целое число кластеров (подмножеств)

$Q_1, Q_2 \dots Q_m$ так, чтобы каждая образующая принадлежала одному и только одному подмножеству разбиения и чтобы образующие и их диаметры, принадлежащие одному и тому же кластеру, были адекватны, в то время как образующие и соответствующие им диаметры инструментальных поверхностей, принадлежащие разным кластерам, были разнородными.

Для решения этой задачи используются два основных метода: метод K -средних и метод иерархического группирования.

Метод K -средних – это метод разделения, который распределяет объекты (образующие с соответствующими диаметрами инструментальных поверхностей) в K -взаимоисключающие группы, такие, что объекты в пределах каждой группы близки друг к другу насколько возможно и далеки от объектов в других группах (рис. 5). Каждая группа характеризуется его центроидом или центром.

Иерархическое группирование – это способ, позволяющий исследовать группировку данных одновременно по разнообразию масштабов расстояния, создавая дерево групп (рис. 6). Группы на одном уровне объединяются в группы на следующем высшем уровне.

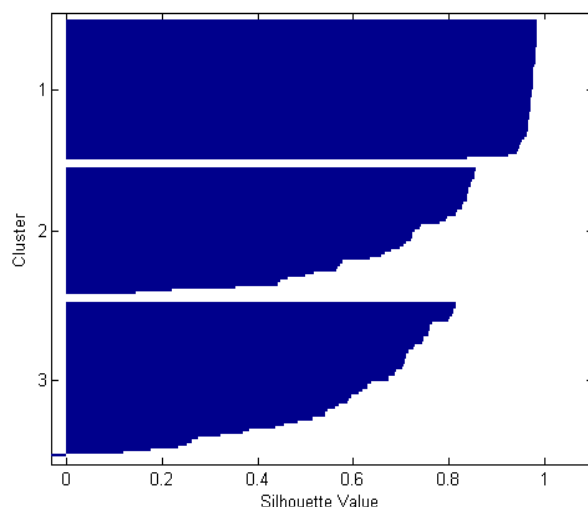


Рис. 5. Разбиение кластеров по методу K -средних [3]

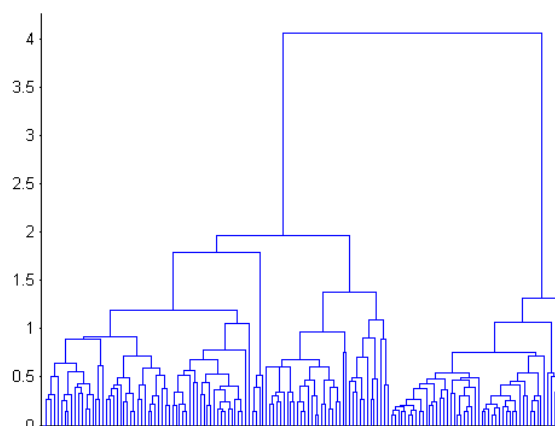


Рис. 6. Разбиение кластеров с помощью иерархического группирования [3]

Выбор группирования зависит от поставленной задачи и при выборе групп оптимальных инструментальных поверхностей, исходя из ограниченного набора вариантов, осуществляется методом K -средних.

Иерархическое группирование применяется при выборе групп оптимальных инструментальных поверхностей, исходя из построенных дендрограмм подгрупп.

Литература

1. Пономарев Б.Б., Каневский И.Б. Определение параметров шероховатости сложных поверхностей с использованием цифровой фотографии: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» в г. Севастополе 10-16 сент. 2001 г. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Т. 2. – С. 86-90.
2. Медведев Ф.В. Создание художественных барельефов в программном пакете Art-SAM Pro // Современные высокоэффективные технологии в машиностроении для различных отраслей промышленности: Сб. статей к семинару. – Иркутск, 2001.
3. <http://www.matlab.ru>

664043, г. Иркутск, ул. Булавина, д. 12, кв. 109, e-mail: yaroslavs@hotmail.ru

УДК 681.5:621.929.2/.9

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛЬНЫХ КООРДИНАТ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Б.А. Федосенков, В.П. Дороганов, А.Л. Чеботарев

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности

Рассмотрены вопросы обработки сигнальных переменных и управления смесеприготовительными агрегатами непрерывного действия с использованием алгоритма вейвлет-поиска соответствия.

Для обеспечения контроля работы смесеприготовительного агрегата и управления режимами его функционирования разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс, включающий в себя интерфейсную систему, сопрягаемую с IBM PC-совместимой ЭВМ, блок измерительных преобразователей сигналов материалопотока, блоки управления смесеприготовительными агрегатами непрерывного действия (СМПА) и комплекс программного обеспечения системы.

В качестве датчиков сигналов материалопотока использованы пьезоэлектрические и тензометрические преобразователи.

Тензометрический датчик выполнен в виде балки равного сопротивления изгибу, изготовленный из фосфористой бронзы, с наклеенными тензорезисторами в составе мостовой/полумостовой схемы. Для увеличения уровня сигнала тензопреобразователя разработан высококачественный дифференциальный усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления $K_u=100$ в полосе частот 0-100 кГц.

Преобразователи устанавливаются на выходе материалопотока дозатора или смесителя под углом 5-60° к оси падения потока. Положение и угол установки преобразователей подбираются экспериментально по максимуму интенсивности спектра снимаемого сигнала.

Предварительно производится процесс калибровки датчиков. Подается образцовый непрерывный поток однородного материала, расход которого изменяется от нулевого значения до максимального. Исследуя осциллограммы полученных сигналов, определяются коэффициенты усиления предварительных усилителей с тем, чтобы уровень сигнала на входе АЦП не превышал предельного значения во всех режимах работы СМПА.

В процессе работы агрегата формируются технологические файлы данных, определяющие одномерные сигналы, снимаемые с пьезо- и/или тензодатчиков. Пример графического представления файла данных шнекового дозатора приведен на рис. 1.

Программа обработки, в частности, позволяет производить фильтрацию сигнала материалопотока для выделения основной (рабочей) частоты, связанной с частотой вращения шнека дозатора.

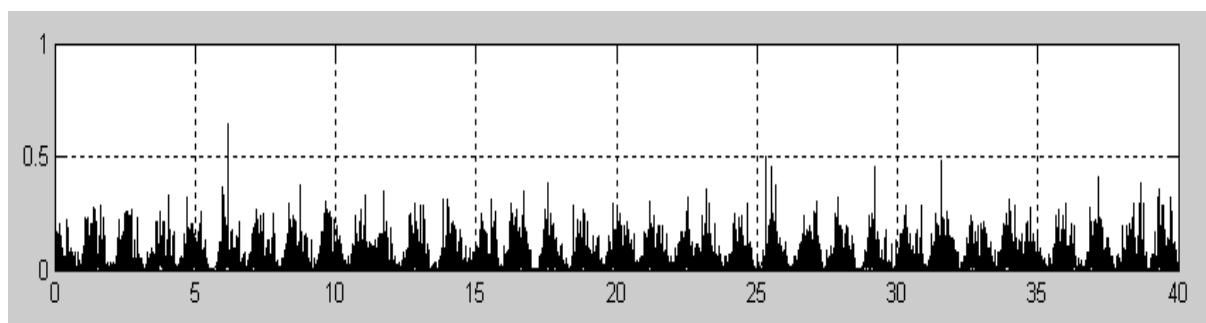


Рис. 1. Одномерный сигнал материалопотока на выходе шнекового дозатора

Основой описываемой здесь технологии обработки является дальнейшее преобразование одномерного сигнала расхода материала в двумерную время-частотную контролируемую или управляемую координату. Преобразование производится на основе непрерывно пересчитываемых время-частотных отображений (карт Вигнера-Вилле) смесеприготовительной динамической системы, которые, по сути, представляют собой совокупности динамических спектров определенных структур материалопотоковых сигналов. При изменении структуры спектра временного вектора какой-либо сигнальной координаты меняется время-частотная локализация соответствующих «атомов» на время-частотной карте. Пример отфильтрованного сигнала дозатора и его время-частотная карта с соответствующими атомами, определяющими локальные особенности материалопотокового сигнала на выходе блока, состоящего из двух дозаторов (непрерывного и дискретного действия) приведены на рис. 2. С целью оптимизации процедуры идентификации режимов работы дозирующих устройств здесь произведена режекция сигналов от материалопотоковых постоянных составляющих.

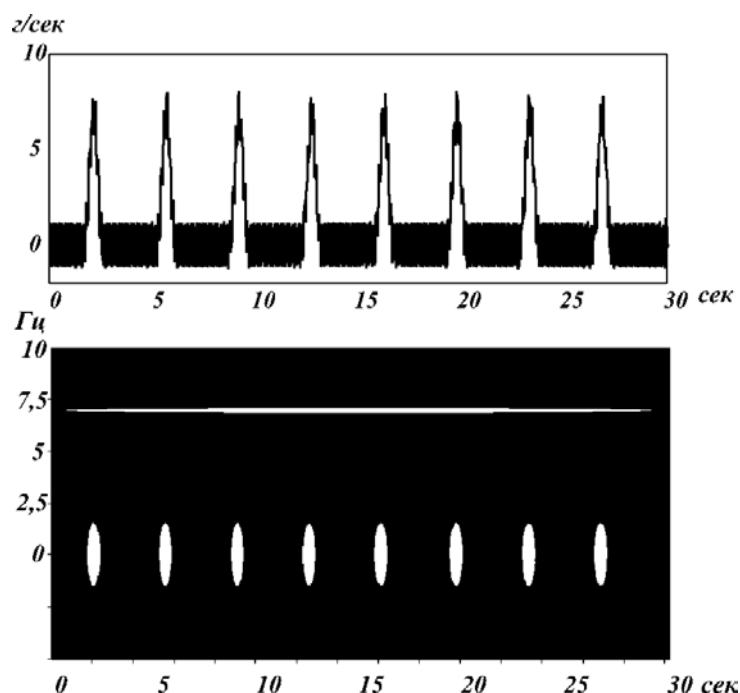


Рис. 2. Сигнал блока дозаторов и его время-частотное отображение

Алгоритм процедуры обработки материалопотокового сигнала и процесса управления смесеприготовительной динамической системой приведен на рис. 3.

Здесь блок (1) – собственно СМПА. На первом этапе производится регистрация значений сигнала $x(t)$ и ввод их в ПЭВМ с помощью интерфейсной схемы сопряжения (2). Далее производится обработка полученных значений по алгоритму вейвлет-поиска соответствия (ВПС) [1] (3) с последующим получением непрерывно пересчитываемой время-частотной карты Вигнера. В соответствии с этим алгоритмом выполняется адаптивная аппроксимация сигналов на базе избыточного тезауруса (словарной базы) вейвлет-функций Габора [2]. Карта рассчитывается по результатам разложения анализируемого сигнала материалопотока на время-частотные атомы (ВЧА) с помощью вейвлет-преобразования. В результате каждого пересчета карты Вигнера в памяти компьютера формируется массив данных. Карта, полученная j -м акте регистрации в установившемся режиме работы СМПА, соответствует исходному (номинальному) режиму работы агрегата. С течением времени амплитудно-частотные параметры дозаторов меняются. Программа управления последовательно извлекает каждое значение из полученного массива данных по «вертикали» (частоте) и по «горизонтали» (времени), сравнивает его с заданным «пороговым» значением, а затем, выбрав наибольшее и наименьшее значения положения ВЧА, формирует условные «прямоугольные окна» (фреймы) значений. Таким образом, полученные в результате первого цикла работы системы атомные фреймы соответствуют номинальному режиму работы СМПА. Далее, при следующих циклах работы агрегата, каждый раз производится регистрация новых значений $x(t)$ (2), обработка их по ВПС-алгоритму (3) и анализ полученных массивов данных.

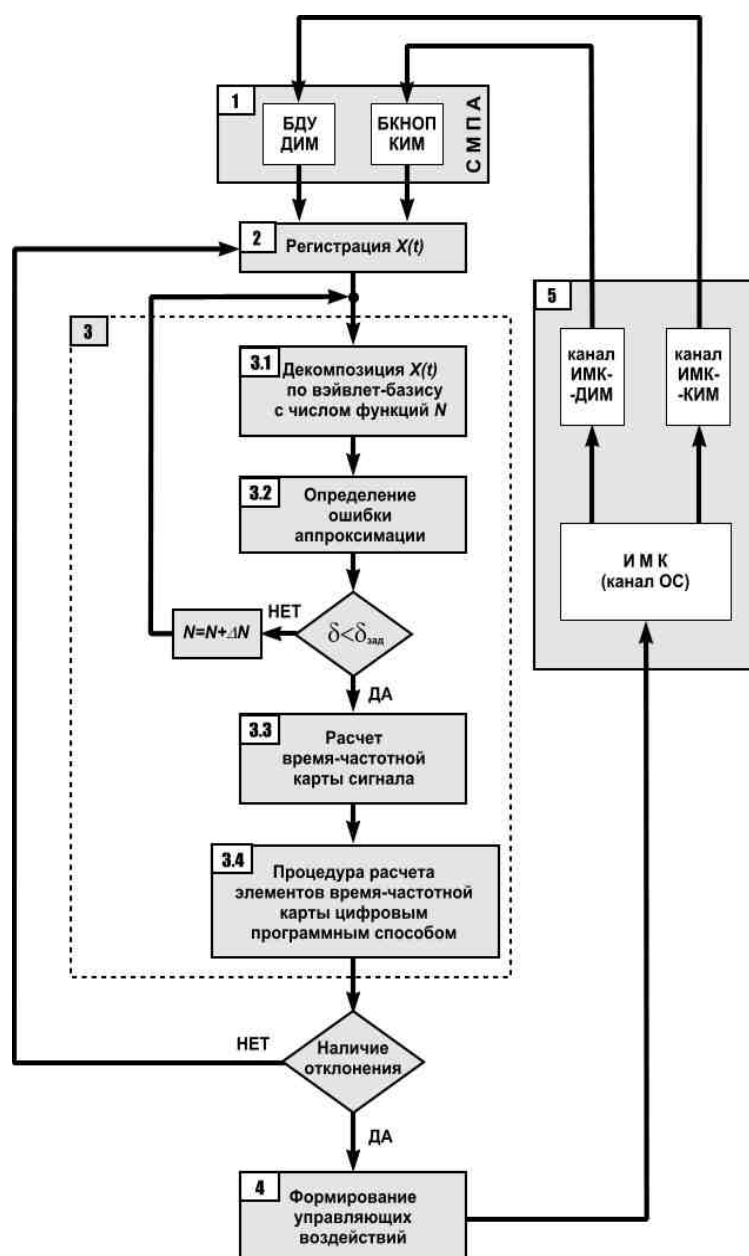


Рис. 3. Блок-схема обработки сигнала и управления агрегатом:

ИМК – интерфейс мониторингового комплекса;

ДИМ – исполнительные механизмы блока дозаторов;

КИМ – исполнительные механизмы каналов направленной организации потоков

Для поддержания стабильного коэффициента неоднородности смеси следует стабилизировать положение ВЧА в пределах заданных фреймов на карте Вигнера с заданной допускаемой погрешностью. Если не наблюдается выхода ВЧА за допустимые пределы, то происходит переход к модулю (2) регистрации новой осциллограммы $x(t)$. При выходе ВЧА за заданные пределы атомного фрейма в $(j+v)$ -м акте регистрации формируются необходимые управляющие воздействия (4) на смесительный агрегат (1) через модуль обратной связи (5). Исследования показали, что эффективное управление агрегатом уже возможно при возникновении «разбежки» значений результирующих показателей вектора параметров в диапазоне от 10 до 15 % по время-частотной карте.

Разработанная автоматизированная система векторного управления позволяет выполнять совместные функции наглядного комплексного мониторинга смесительного агрегата и управления его динамикой, что способствует получению смесевых композиций высокого качества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант ТО2-03.2-2440).

Литература

1. S. Mallat and Z. Zhang. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12): 3397-3415, December 1993.
2. S. Qian and D. Chen. Signal representation via adaptive normalized Gaussian functions. IEEE Transactions on Signal Processing, 36(1), January 1994.

650056, г. Кемерово, Бульвар Строителей, 47, т. 73-41-03, e-mail: raf@kifset.ru

УДК 861.5:621.929.2/.9

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Б.А. Федосенков, А.В. Камалдинов

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности

Описан метод фильтрации время-частотных изображений (карт Вигнера) одномерных сигналов материалопоточковых расходов средствами высокочастотной и надпороговой фильтрации.

В условиях автоматизированного смесеприготовительного агрегата (рис. 1) управление посредством аппаратно-программного комплекса представляет собой способ направленной перестройки режима блока дозирующих устройств и каналов направленной организации материалопотока (каналов рецикла и байпасирования). При этом непрерывно во времени производится пересчет динамических спектров в виде время-частотных отображений (карт Вигнера) смесеприготовительного процесса, представленного в виде сигнала дисперсного материалопотока и в соответствии с ним вносятся коррективы, выражающиеся в задании номинальных условий синхронизации синфазных параметров дозирующих устройств в составе блока дозаторов, а также соответствующих режимно-конструктивных параметров узла каналов директивной организации потоков.

Одним из этапов процедуры автоматизированного управления является оцифровка аналогового сигнала с дальнейшей его обработкой. Регистрация расходных характеристик смесеприготовительного агрегата ведется с помощью пьезоэлектрических и тензометрических преобразователей. Последний подключается через плату преобразователя к компьютеру (рис. 2); при этом обеспечивается достаточная точность оцифровки

исследуемого сигнала (рис. 3). Фильтрация исходного сигнала, снимаемого посредством первичных измерительных устройств, определяется теоремой отсчетов и необходима для наиболее точного построения трехмерной карты Вигнера, позволяющей визуально оценивать параметры рабочих режимов исследуемого агрегата и осуществлять функции контроля и управления.

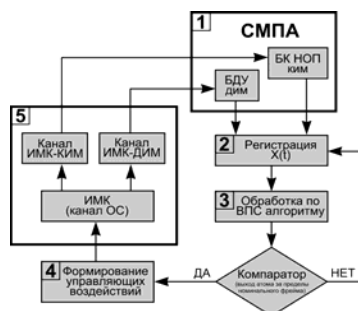


Рис. 1. Блок-схема автоматического управления СМПА

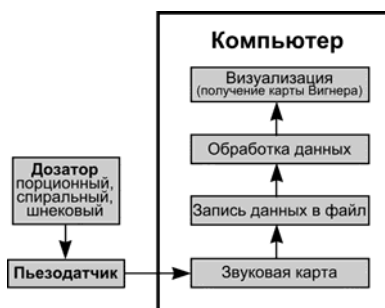


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

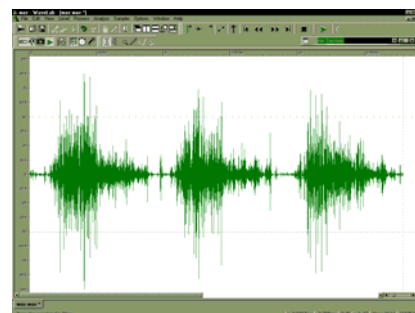


Рис. 3. Оцифрованный сигнал

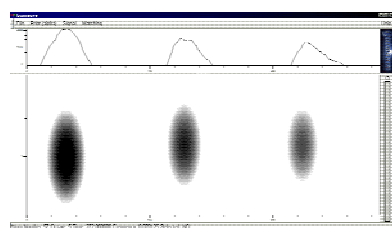


Рис. 4. Карта Вигнера

На последующих этапах, после первичного расчета карты Вигнера (рис. 4), производится высокочастотная фильтрация в динамических спектрах, с помощью которой устраняются постоянные составляющие в составе материалопотоковых сигналов дозаторов непрерывного (шнековых и спиральных) и дискретного (порционных) действия. На 3D изображении время-частотной карты структурные образования малой интенсивности, локализованные у подошвы холма, «размывают» атомы, созданные вейвлет-функциями в составе реконструированного сигнала, что затрудняет процесс распознавания карты, а с ней – и идентификации соответствующего режима дозирования или режима функционирования того или иного канала директивной организации материалопотока.

Поэтому на карте Вигнера урезается (режектируется) нижняя часть холма, тем самым верхняя его часть становится более «контрастной». Одновременно с высокочастотной фильтрацией выполняется надпороговая фильтрация; при этом происходит надпороговая режекция время-частотных образований по их интенсивности. Высокоинтенсивные шумы в виде дельта-всплесков, расположенные над верхней частью холма – «атома» удаляются с помощью подпороговой фильтрации.

В итоге получается карта Вигнера, состоящая из правильных «эллипсообразных» атомов, по которым можно судить о параметрах работы смесеприготовительного агрегата. Зная расстояние между эллипсами по оси абсцисс, можно оценить частоту работы дозатора. Исследуя неравномерность в расстояниях между атомами, можно судить об отклонениях в работе дозатора. Исследуя неравномерность в расстояниях между атомами, определяемой девиацией последних на 2D-карте вследствие нарушения текуще-

го режима работы объекта, можно судить об отклонениях в работе дозатора (исследуются отклонения каждого атома по оси ординат и абсцисс). В результате фиксации этих данных и сравнения для номинального и возмущенного режимов формируются управляющие воздействия по цепи векторной обратной связи, посредством которых корректируются режимы работы до номинальных [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант ТО2-03.2-2440).

Литература

1. Анискевич А.А., Камалдинов А.А., Федосенков Б.А. Теоретические аспекты управления динамикой смесеприготовительных процессов на базе вейвлет-преобразований: Материалы Сибирской конф. ММТТ-16, апр. 2003 г. – Ангарск: Ангарская гос. техн. академия.

650056, г. Кемерово, Бульвар Строителей, 47, т. (3842) 73-41-03, 73-23-60,
e-mail: raf@kifset.ru

УДК 681.5:621.929.2/.9

УПРАВЛЕНИЕ СМЕСИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ ПО ДВУМЕРНЫМ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ НА БАЗЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Б.А. Федосенков, А.В. Шебуков

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности

Изложена концепция моделирования и управления смесеприготовительным агрегатом (СМПА) по двумерным время-частотным переменным на базе систем с обратными связями. Показана целесообразность проведения исследований процессов в подобном рода объектах методами время-частотной локализации в вейвлет-среде.

Эффективное функционирование смесительных комплексов возможно только при стабилизации режимов работы всех его составных узлов: блока дозаторов, питающе-формирующей системы и смесительного узла, в состав которого входят так называемые каналы директивной (направленной) организации материальных потоков.

Экспериментально установлено, что реальные процессы смешивания на сигнальном уровне представляют собой нестационарные процессы с изменяющейся во времени частотой. Частота сигнала мгновенного расхода материалопотока в различных точках смесительного агрегата является при этом времязависимым параметром. Форма и интенсивность изменения частоты определяются рядом показателей, характеризующих функционирование составных узлов агрегата. В этой связи используемое для анализа стационарных процессов преобразование Фурье не может предоставить полную информацию о характеристиках нестационарного сигнала в частотной области с учетом их изменения во временном пространстве.

Поэтому нами предлагается использование для анализа такого рода сигналов алгоритма вейвлет-поиска соответствия (ВПС) [1, 2], в основе которого лежит выбор базисных вейвлет-функций, наилучшим образом соответствующих анализируемым сигналам из специализированных баз данных в виде время-частотных тезаурусов (словарей). В соответствии с этим алгоритмом генерируется семейство вейвлет-функций на основе некоторой базисной функции $\psi(t, s, \tau, \xi)$ путем ее масштабирования (s), перевода (τ) и модуляции (ξ). Полученное семейство представляет собой функции в виде время-частотных атомов. Такие базисные функции-атомы отражают многочисленные комбинации значений размеров временных и частотных анализирующих окон, в результате чего в составе словаря формируется избыточный набор атомов. Избыточность подразумевает наличие в составе словаря, помимо базисных вейвлет-функций, дополнительно гармонических и δ -функций (функций Дирака). Как только виды атомарных функций определены, рассчитывается наилучшее соответствие между ними и оциллограммой исследуемого сигнала путем отображения (проецирования) последней на избыточный словарь.

Материалопотоковый сигнал в соответствии с алгоритмом ВПС раскладывается на сумму выбранных в вейвлет-тезаурусе время-частотных атомов (ВЧА), оптимально соответствующих остаткам сигнала на определенных итерациях:

$$x(t) = \sum_{n=0, m} \langle R^n(x), \psi_{I_n} \rangle \psi_{I_n} + R^{m+1}(x).$$

Данное выражение сходится к $x(t)$ при $m \rightarrow \infty$, где m – число итераций, в ходе которых сигнал «проецируется» на некоторый словарный вектор ψ_{I_m} . Критерием оптимальности соответствия служит условие

$$\left| \langle R^m(x), \psi_{I_m} \rangle \right| = \max, \psi_{I_m} \in D,$$

где $R^m(x)$ – остаточный вектор (вектор «расхождения») на m -й итерации проектирования сигнала $X(t)$ на вектор ψ_{I_m} вейвлет-функции в тезаурусе D . Реализация ВПС-процедуры производится на базе быстрого алгоритма по расчету скалярного произведения двух дискретных функций $\langle R^{m+1}(x), \psi_I \rangle$ на основании $\langle R^m(x), \psi_I \rangle$. Поскольку наложение дискретного остатка сигнала $R^m(x)$ на вейвлет-вектор ψ_{I_m} из словаря D дает

$$R^m(x) = \langle R^m(x), \psi_{I_m} \rangle \psi_{I_m} + R^{m+1}(x),$$

то, определяя скалярные произведения с вектором ψ_I для обеих частей данного уравнения, получаем

$$\langle R^{m+1}(x), \psi_I \rangle = \langle R^m(x), \psi_I \rangle - \langle R^m(x), \psi_{I_m} \rangle \langle \psi_{I_m}, \psi_I \rangle.$$

При требуемой относительной точности ε итеративная процедура останавливается при выполнении условия:

$$\|R^{m+1}(x)\|^2 = \|R^m(x)\|^2 - \left| \langle R^m(x), \psi_{I_m} \rangle \right|^2 \leq \varepsilon^2 \|x(t)\|^2.$$

При наличии весьма избыточных словарей расчеты ведутся в под-словарях.

С целью эффективной визуальной идентификации и контроля текущих режимов работы отдельных фрагментов смесеприготовительного комплекса, а также управления их динамикой, необходимо осуществить переход от одномерных материалопотоковых сигналов в подконтрольных точках системы к двумерным модифицированным координатам. Перевод одномерного сигнала в двумерную время-частотную область производится на основе алгоритма ВПС при помощи распределения Вигнера-Вилле:

$$WVx(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot \bar{x}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Для визуализации энергетической плотности во время-частотной плоскости реконструированных (восстановленных) по алгоритму ВПС сигналов, используется функция $Ex(t, \omega)$, которая представляет собой сумму распределений Вигнера всех время-частотных атомов:

$$Ex(t, \omega) = \sum_{n=1, N} \left| \left\langle X_{n-1}^*(t), \psi(s, \tau, \xi) \right\rangle \right|^2 W_{\psi(s, \tau, \xi)_n}(t, \omega).$$

Для обработки расходных сигналов в смесеприготовительном агрегате использовался время-частотный словарь Габора, в котором вейвлет-функции образованы с помощью окна в виде функции Гаусса.

Этот выбор объясняется тем, что сдвигаемые и частотно-модулированные функции Гаусса

$$\psi_I(t) = s^{-0,5} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \exp(j\xi t)$$

являются единственными функциями, распределения Вигнера которых остаются всегда положительными, что обязательно при интерпретации распределения как совместного распределения плотности энергии сигнала во время-частотном пространстве.

В автоматизированной системе управления смесительным агрегатом в режиме «он-лайн» производится текущая регистрация всех необходимых одномерных расходных сигналов и их преобразование в двумерные время-частотные переменные. Управляемые координаты, к которым относятся потоки разгрузки дозаторов, а также расходы в соответствующих каналах смесителя, в виде двумерных изображений материалопотоков обрабатываются анализирующей частью аппаратно-программного комплекса; в результате формируется вектор параметров рассогласования, компоненты которого в виде напряжений подаются на исполнительные механизмы системы.

На рис. 1 в качестве примера представлен результирующий сигнал материалопотока, его время-частотная карта и зоны атомных фреймов допустимых перемещений время-частотных образований, при выходе за которые требуется стабилизация работы дозирующих устройств: порционно-го (рабочая частота 0,205 Гц) и спирального (рабочая частота 6,89 Гц).

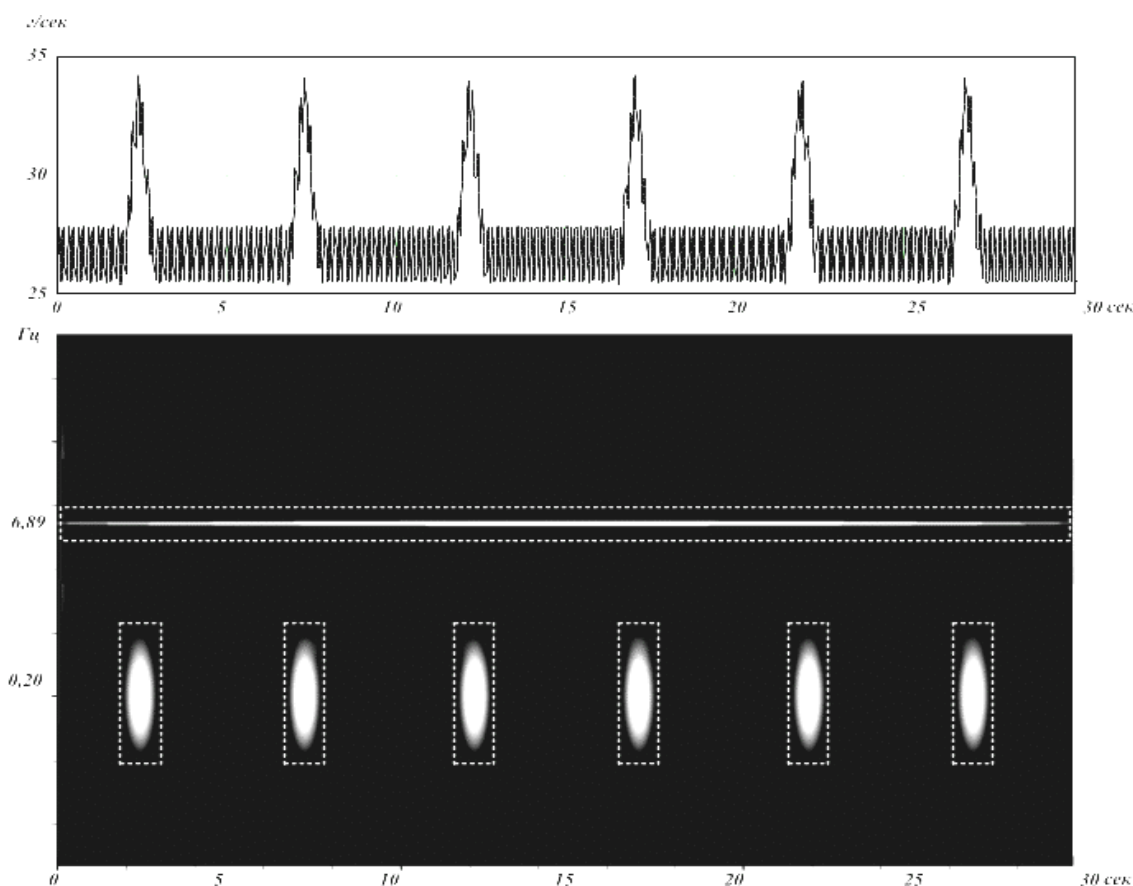


Рис. 1. Осциллограмма и время-частотная карта сигнала блока дозаторов с наложенными атомными фреймами

Разработанная технология адаптации алгоритма вейвлет-поиска соответствия применительно к обработке нестационарных по частоте материалопотоковых сигналов дает возможность эффективно идентифицировать и контролировать специфические режимы работы дозирующих устройств и каналов директивной организации потоков, обусловленные заданной технологией получения смесевых композиций, а также управлять динамикой смесительного комплекса, используя карту Вигнера в качестве регулируемой двумерной время-частотной переменной, что в конечном счете позволяет оптимизировать процесс производства высококачественных смесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант ТО2-03.2-2440).

Литература

1. S. Mallat. A wavelet tour of signal processing. Academic Press, 2001.
2. Федосенков Б.А., Анискевич А.А., Камалдинов А.В. Теоретические аспекты управления динамикой смесеприготовительных процессов на базе вейвлет-преобразований // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-16): Материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. / Санкт-Петербургский гос. техн. ин-т. (СПбГТИ). – СПб. – 2003.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМЫ ПОР ХЛЕБНОГО МЯКИША*Р.Н. Воронин*

Орловский государственный технический университет

Представлено описание геометрической формы пор хлебного мякиша.

Известно, что хлебобулочные изделия представляют собой пористые материалы, на свойства которых существенно влияют геометрические особенности их структуры [1]. В большинстве случаев они обладают сложной нерегулярной стохастической структурой. Отдельные поры, составляющие совокупное пространство пор, отличаются по форме, размерам, ориентации, шероховатости и кривизне поверхности [2]. При детальном исследовании геометрического строения пористых систем (состоящих из миллиардов первичных пор), выявляется сложная картина, зафиксировать которую в виде изображений и формул практически невозможно. Первичной информацией о таких системах могут служить форма и размер пор, а также их взаимное положение в объеме пористого тела. Наличие этой информации позволяет определить практически все свойства пористых материалов – геометрические, сорбционные, механические и другие.

Описать геометрическое строение пористой структуры продуктов питания с учетом особенностей профилей пор можно путем геометрического моделирования на основе теории случайных функций [3].

Представим себе форму поры как некоторую реализацию случайной функции, представляющую собой совокупность гармоник различных частот со случайными амплитудами и фазами.

Если рассматривать произвольное сечение поры, случайно ориентированной в пространстве в результате выпечки хлеба, то вероятностные характеристики случайной функции, реализацией которой является данное сечение поры, не будут зависеть от аргумента, то есть от положения текущего радиуса поры, и, следовательно, эта случайная функция будет стационарной. Подобному случаю в полярной системе координат соответствует уравнение контура поры [4]:

$$R(\varphi) = r + \sum_{k=2}^{k=p} [x_k \cdot \sin(\omega_k \cdot \varphi) + y_k \cdot \cos(\omega_k \cdot \varphi)], \quad (1)$$

где $R(\varphi)$ – радиус профиля поры; φ – полярный угол; r – радиус средней окружности профиля; x_k и y_k – случайные некоррелированные амплитуды, соответствующие k -й гармонике и имеющие попарно равные дисперсии $D[x] = D[y] = D$; $\omega_1, \dots, \omega_k$ – произвольно выбранные частоты; $k = \overline{1, p}$; при $k = 1$, $R(\varphi) = r$.

Уравнение (1) можно применить как для анализа геометрической формы единичной поры, так и для исследования геометрической формы группы пор, принадлежащих одной выемке. В последнем случае первое слагаемое в формуле (1) следует рассматривать как случайную величину, вы-

ражающую размер поры, то есть характеризующую рассеивание размеров пор, если бы они были идеальными шарами. Но так как поры представляют собой неправильные геометрические тела, то в общее рассеивание размеров пор будет входить еще отклонение от правильной геометрической формы шара, которое определяется вторым слагаемым формулы (1).

Так как поры, образующие ячеистую структуру хлебного мякиша, в основном имеют форму, близкую к эллипсоидальной, то в уравнении (1) гармоники с порядковым номером $k > 2$, описывающие микронеровности профиля пор, практического значения иметь не будут. Тогда геометрическую форму профилей пор, попавших в произвольное сечение исследуемого образца хлебного мякиша, можно представить в виде эллипса. Для этого выделим в уравнении (1) вторую гармонику:

$$R(\varphi) = r + A_{02} \cdot \sin(2\varphi + \psi_2), \quad (2)$$

где $A_{02} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$; $\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{y_2}{x_2}$.

Поскольку микронеровности профиля пор накладываются на неровности, описываемые гармониками с порядковым номером $k < 2$, то средней линией неровностей k -й гармоники является линия, образуемая низшими гармониками. Поэтому выражение (2) можно рассматривать как зависимость, описывающую среднюю форму сечений пор, ориентированных вдоль их большой диагонали (оси), как показано на рисунке 1.

Большой диагональю AB сечения поры является максимальное расстояние между двумя диаметрально противоположными точками ее профиля, которое можно определить как диаметр D окружности, описанной вокруг сечения поры.

Малая диагональ EF сечения поры – это диаметр вписанной окружности d , усредненный по конечному числу n окружностей, которые можно вписать в истинный профиль поры. Количество таких окружностей будет зависеть от конечной цели исследования геометрической формы пор.

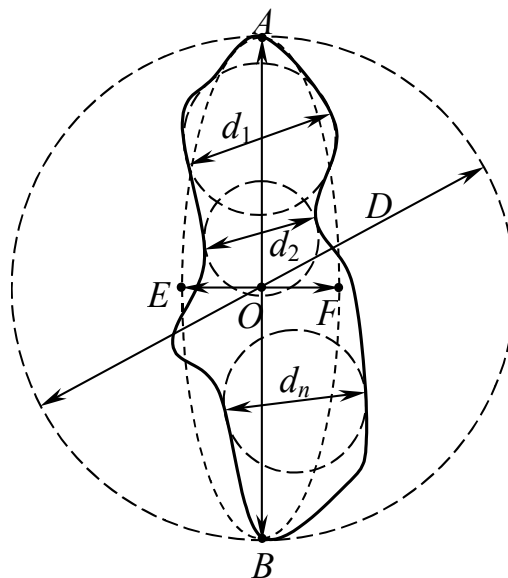


Рис. 1. Геометрическая модель усредненной формы сечения поры хлебного мякиша:
 $AFBE$ – упрощенный вид сечения поры; d_1, d_2, d_m – диаметры вписанных окружностей;
 D – диаметр описанной окружности

Количественно вытянутость профиля сечения поры можно описать коэффициентом формы поры k_{Φ} , определяющимся как отношение ее большей диагонали к меньшей.

На основе выражения (2) коэффициент формы можно определить как:

$$\frac{a}{b} = \frac{r + A_{02}}{r - A_{02}} = k_{\Phi}, \quad (3)$$

где a , b – большая и малая диагонали профиля поры соответственно.

Выразим из выражения (3) параметр A_{02} :

$$A_{02} = r \cdot \frac{\left(\frac{a}{b} - 1\right)}{\left(\frac{a}{b} + 1\right)}. \quad (4)$$

Исходя из теории случайных функций имеем, что площадь сечения профиля поры, определяемая в нашем случае как площадь эллипса ($S_1 = \pi \cdot a \cdot b$) в среднем будет равна площади круга радиуса r ($S_2 = \pi \cdot r^2$). В этом случае радиус r средней окружности профиля поры можно принять равным среднему геометрическому значений ее диагоналей a и b :

$$r = \sqrt{a \cdot b}. \quad (5)$$

Из (5), (4) и (2) следует, что площадь сечения поры можно определить по формуле:

$$S_{\text{поры}} = \pi \cdot a \cdot b \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \left(\frac{\frac{a}{b} - 1}{\frac{a}{b} + 1} \right)^2 \right). \quad (6)$$

В процессе выпечки хлебных изделий поры в объеме хлебного мякиша располагаются случайным образом, поэтому пористость любого произвольного сечения исследуемого образца в среднем можно считать одинаковой. Просуммировав площади профилей всех пор одного из таких сечений, можно получить пористость образца хлебного мякиша, что описано следующим выражением:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} S_i}{S} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где S_i – площадь сечения i -й поры; S – площадь сечения образца; $i = 1, 2, \dots, N$ – количество пор в образце.

Таким образом, геометрическая модель формы пор хлебного мякиша на основе классической теории корреляционных функций позволяет более полно описать истинную форму пор хлебных изделий (а, по-видимому, и любых ячеистых материалов), и в частности такое их свойство, как вытянутость пор в одном из направлений. Количественно это свойство можно оха-

характеризовать отношением большей диагонали ячейки поры к меньшей, то есть коэффициентом формы ячейки k_f . Благодаря этому предложенная геометрическая модель носит более универсальный характер и сохраняет при этом относительную простоту в отношении математической обработки.

Литература

1. Плахотин В.Я. Контроль качества пищевых продуктов. – Киев: Урожай, 1988. – 144 с.
2. Моделирование пористых материалов. – Новосибирск: СО АН СССР, 1976. – 190 с.
3. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 375 с.
4. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. – 182 с.

307173, Курская обл., г. Железногорск, ул. Ленина, д. 1, кв. 12, e-mail: fotina77@list.ru

УДК 62-784.433.001.573

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ФОРСУНКОЙ

В.А. Телегин

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Рассматривается идентификация математической модели пылеулавливающего устройства с форсункой на основе теории подобия и анализа размерностей. Экспериментальные исследования параметрического ряда эжекторов-пылеуловителей указывают на достаточную аналитическую идентичность и практическую адекватность предложенной математической модели.

Пылеулавливающие устройства с форсунками, ввиду высокой эффективности, низкой металлоемкости и уровня шума, простоты изготовления [1], могут широко использоваться в различных отраслях промышленности.

Рассмотрим процесс улавливания пыли в пылеулавливающем устройстве с форсункой, расчетная схема которой показана на рис. 1.

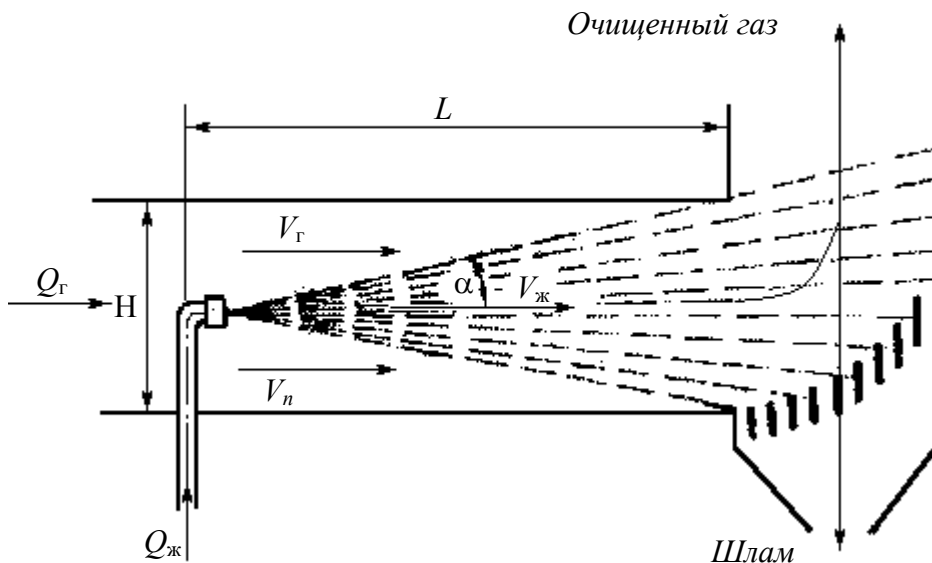


Рис. 1. Расчетная схема пылеулавливающего устройства с форсункой

Найдем выражения для относительных концентраций частиц пыли в газовом потоке после воздействия на них каплей жидкости.

Для этого в пылеулавливающем устройстве выделим элементарный объем длиной dl с площадью поперечного сечения S , как показано на рис. 2.

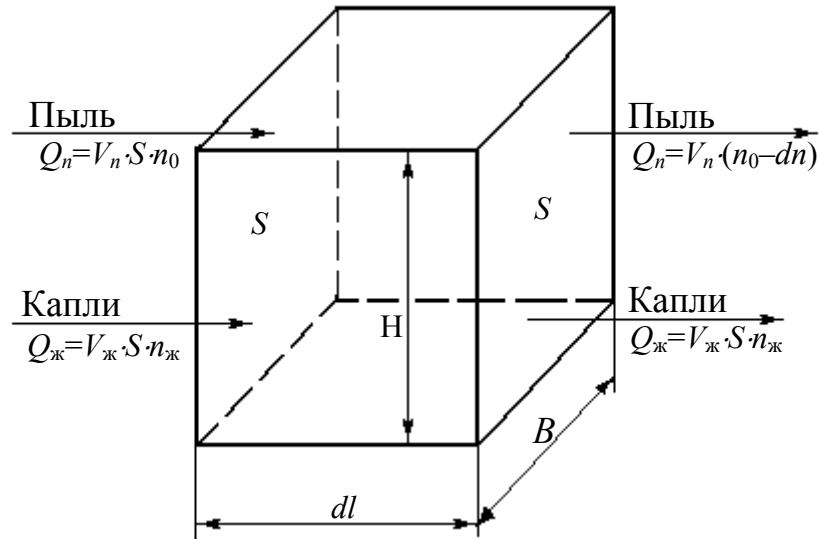


Рис. 2. Расчетная схема материального баланса в элементарном объеме устройства:
 n_0 – концентрация пыли на входе элементарного объема, кг/м^3 ; V_Γ – скорость газа в сечении устройства, м/с ; V_n – скорость частиц пыли в сечении устройства, м/с , $V_n = V_\Gamma$; dn_n – приращение концентрации пыли в элементарном объеме, кг/м^3 ; $n_\text{ж}$ – объемное содержание жидкости в единице объема газа, $\text{м}^3_\text{ж}/\text{м}^3_\text{г}$; $V_\text{ж}$ – скорость капли, вылетающей из сопла форсунки, м/с ; Q_n и $Q_\text{ж}$ – расход пыли и жидкости, проходящей через элементарный объем в единицу времени, кг/с и $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно

Уравнение материального баланса для элементарного объема обеспыливающего устройства можно записать в следующем виде:

$$n_0 \cdot V_\Gamma \cdot S - V_\Gamma \cdot S \cdot (n_0 - dn_n) = -n_0 \cdot \eta_\text{ж} \cdot (V_\text{ж} - V_n) \cdot n_\text{ж} \cdot \frac{3Sdl}{2\delta_\text{ж}}, \quad (1)$$

где δ_n – диаметр пылевой частицы, м ; μ_Γ – динамический коэффициент вязкости газовой среды, кг/мс ; $\delta_\text{ж}$ – диаметр капли жидкости, м ; $\eta_\text{ж}$ – коэффициент захвата частиц пыли шаром [2]:

$$\eta_\text{ж} = \frac{Stk_n^2}{(Stk_n + y)^2};$$

Stk_n – критерий Стокса для частиц пыли

$$Stk_n = \frac{(V_\text{ж} - V_n) \cdot \delta_n^2 \cdot (\rho_n - \rho_\Gamma)}{18 \cdot \delta_\text{ж} \cdot \mu_\Gamma};$$

ρ_n – плотность вещества пылинки, кг/м^3 ;

$$y = 0,125 + \left(0,213 + 0,022 \cdot \sqrt[3]{\text{Re}_\text{ж}}\right) \cdot Stk_n.$$

$Re_{ж}$ – критерий Рейнольдса для капли жидкости

$$Re_{ж} = \frac{\delta_{ж} \cdot (V_{ж} - V_{г}) \cdot \rho_{г}}{\mu_{г}}.$$

Из выражения (1) получаем математическую модель процесса в виде остаточной относительной концентрации пыли

$$\frac{n}{n_0} = \exp \left(- \frac{3n_{ж} \cdot \eta_{ж} \cdot (V_{ж} - V_n) \cdot l}{2\delta_{ж} \cdot V_{г}} \right), \quad (2)$$

где l – длина пробега капли жидкости в неподвижной среде, м; $l = \tau_{ж} \cdot V_{ж}$; $\tau_{ж}$ – время релаксации капель жидкости в вязкой среде, с;

$$\tau_{ж} = \frac{\delta_{ж}^2 \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г})}{18\mu};$$

$\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотности жидкости и газовой среды, кг/м³.

Анализ остальных процессов пылеулавливания [3] показал, что полученная математическая модель (2) играет решающую роль при определении эффективности пылеулавливания.

До сих пор нет единого мнения о механизме взаимодействия жидкого и пылевого аэрозолей в поле действия инерционных сил, не доказана тождественность аналитической и физической моделей процесса, не определены критерии подобия физического моделирования, не изучена их взаимосвязь с величиной остаточного уноса пыли.

Выразим функциональную зависимость остаточной концентрации пыли на выходе из канала после воздействия механизма инерционного захвата частиц пыли каплями жидкости посредством метода анализа размерностей [4, 5] в виде уравнения связи

$$\pi_1 = \ln \frac{n}{n_0} = K_i \cdot (V_{ж} - V_{г})^a \cdot V_{ж}^b \cdot V_{г}^c \cdot \delta_{ж}^d \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г})^e \cdot \mu_{г}^g \cdot S_c^h \cdot S_{г}^i,$$

где π_1 – безразмерный комплекс величины относительной остаточной концентрации пыли; K_i – безразмерный коэффициент; S_c , $S_{г}$ – площадь сечения сопла форсунки и газового потока соответственно, м²; a , b , c , d , f , g , h , i – показатели степени.

После составления матрицы размерностей и решения системы однородных линейных уравнений относительно показателей степени получаем зависимость (1) в критериальной форме:

$$\pi_1 = \ln \frac{n}{n_0} = K_i \cdot \pi_2 \cdot \pi_3 = K_i \cdot Ne^p \cdot Re_{ж}^q, \quad (3)$$

где Ne – аналог критерия Ньютона

$$\pi_4 = Ne = \frac{S_c \cdot V_{ж}^2 \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г})}{S_{г} \cdot V_{г}^2 \cdot \rho_{г}};$$

p , q – показатели степени.

Тождественность между выражениями (2) и (3) очевидна, откуда $K_i = -3/2 \cdot \eta_{\text{ж}}; p = 1; q = 1$.

Теперь выражение (2) можно записать в критериальной форме:

$$\frac{n}{n_0} = \exp \left\{ - \frac{3 \cdot Stk_n^2 \cdot Ne \cdot Re_{\text{ж}}}{2 \left[Stk_n + 0,125 + \left(0,213 + 0,022 \sqrt[3]{Re_{\text{ж}}} \right) \cdot Stk_n \right]^2} \right\}.$$

Таким образом очевидно, что безразмерные комплексы Stk_n , Ne , $Re_{\text{ж}}$ представляют собой критерии подобия явления между физической моделью и реальным объектом для механизма инерционного захвата пылевых частиц каплями жидкости.

Тогда можно записать достаточные условия подобия в виде:

$$\pi_1 = f \cdot (\pi_2; \pi_3; \pi_4) = idem.$$

Подобие явлений на модели и объекте при соблюдении условий однозначности Stk_n , Ne , $Re_{\text{ж}}$ означает равенство величин остаточной концентрации пыли.

Результаты экспериментальных исследований параметрического ряда плоских водо-воздушных эжекторов-пылеуловителей подтверждают идентичность аналитической и критериальной моделей. Расчетные значения лежат в пределах доверительных интервалов средних значений остаточной концентрации пыли. Максимальная абсолютная погрешность с учетом систематической погрешности средств измерения составляет 13,3 % при доверительной вероятности 0,95.

Таким образом, можно утверждать, что гипотеза о тождественности аналитической и физической моделей процесса пылеулавливания в устройстве с форсункой подтверждается идентичностью аналитической и критериальной моделей и адекватностью их результатам эксперимента.

Литература

1. Сергеев С.И., Усик А.Г., Безгласный П.А. Безвентиляторные и вентиляционные пылеуловители угольных шахт // Прогноз состояния окружающей среды и улучшение условий труда на предприятиях угольной промышленности: Сб. науч. статей / Новочерк. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: НГТУ, 1996. – С. 61-66.
2. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – М: Мир, 1987. – С. 78.
3. Сергеев С.И., Телегин В.А., Шупляк Н.Г. Математическое моделирование пылеулавливающего устройства с форсункой // Оценка, прогноз и повышение экологической и производственной безопасности жизнедеятельности: Сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ) – Новочеркасск: Набл, 2000. – С. 66-72.
4. Кирпичев В.М. Теория подобия. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 96 с.
5. Романков П.Д., Курочкина М.Н. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 286 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ДРЕНАЖНЫХ ТРУБАХ

А.В. Михеев

Новочеркасская государственная мелиоративная академия

Приводится теоретическое исследование взаимодействия защитно-фильтрующего материала, грунта обратной засыпки дренажной траншеи и дренажной трубы при строительстве закрытого горизонтального дренажа узкотраншейным способом. Предложены методы определения перемещений и внутренних силовых факторов, возникающих в дренажной трубе.

Одной из проблем закрытого горизонтального дренажа (ЗГД) на мелиоративных системах является потеря устойчивости из условий жесткости дренажных труб еще в процессе строительства дренажной сети в результате обрушения стенок траншеи или в процессе засыпки дренажной траншеи грунтом.

Особенно актуальна данная проблема при выполнении закрытого горизонтального дренажа из пластмассовых дренажных труб (ПВХ, ПНД и др.) с обсыпкой защитно-фильтрующим материалом (песчано-гравийной смесью или крупнозернистым песком) [1, 2].

В существующих нормах по проектированию дренажных труб на прочность и жесткость используется метод приведения действующей нагрузки к эквивалентной:

$$F_{eqv} = \beta \eta \sum F,$$

где β – коэффициент приведения, зависящий от способа укладки, при укладке на неспланированное основание под дренажную трубу $\beta = 0,75$; η – коэффициент бокового давления, зависящий от вида грунта засыпки (для песка при нормальном уплотнении $\eta = 0,95; 0,97$); $\sum F$ – сумма вертикальных сил от грунта засыпки.

Наиболее значимой из вертикальных нагрузок является нагрузка от вертикального давления грунта, которая обычно принимается равномерно распределенной

$$F_{гр} = \gamma_f \gamma h B_{тр} k_1 k_2,$$

где γ_f – коэффициент надежности по действующей нагрузке грунта засыпки ($\gamma_f = 1,15 \dots 1,20$); γ – удельный вес грунта засыпки, кН/м³; h – приведенная высота грунта засыпки, м; $B_{тр}$ – ширина траншеи, м; k_1 – коэффициент зависания грунта, зависящий от отношения приведенной высоты грунта засыпки к ширине траншеи (при $\frac{h}{B_{тр}} = 1,0 \dots 2,0$, $k_1 = 0,86 \dots 0,75$);

k_2 – коэффициент разгрузки грунта в пазухах, зависящий от отношения диаметра дренажной трубы к ширине траншеи $\frac{D}{B_{тр}}$; модуля деформации

грунта засыпки $E_{гр}$; модуля упругости и коэффициента Пуассона материала, из которого изготовлена дренажная труба.

Так как расчет ведется на единицу ширины дренажной трубы, то $F_{гр}$ имеет размерность силы.

Расчет на прочность и жесткость дренажных труб выполняется, как от действия на трубу двух сосредоточенных сил.

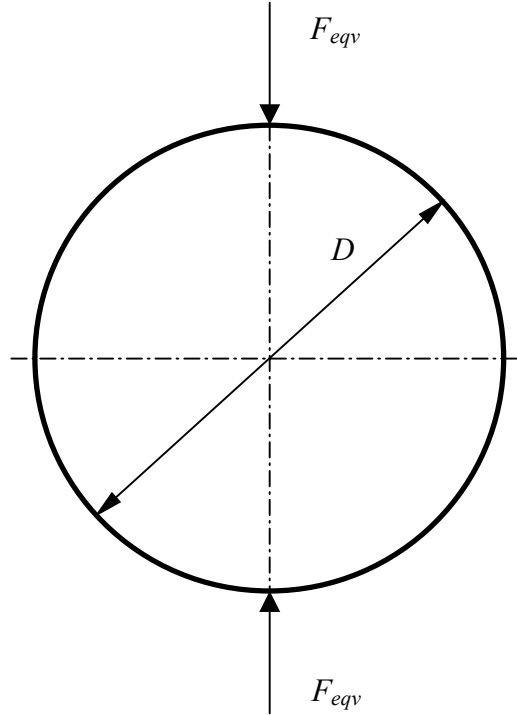


Рис. 1. Схема приложения эквивалентной нагрузки на трубу

Перемещения можно определить с использованием интеграла Мора:

$$\delta = \int_e \frac{M_F \bar{M}_1}{EJ_x} dS + \int_e k_3 \frac{Q_F \bar{Q}_1}{GA} dS + \int_e \frac{N_F \bar{N}_1}{EA} dS,$$

где M_F , Q_F , N_F – изгибающий момент, перерезывающая и нормальная силы от внешних нагрузок; \bar{M}_1 , \bar{Q}_1 , \bar{N}_1 – то же от единичных силовых факторов; EJ_x , GA , EA – жесткости дренажной трубы на изгиб, сдвиг и растяжение; k_3 – коэффициент формы сечения.

Анализ расчетов показывает, что влияние перерезывающих (Q) и нормальных (N) сил для дренажных труб значительно меньше (менее 5 %) чем от изгибающих моментов, поэтому ими можно пренебречь.

Внутренние силовые факторы можно определить с использованием метода сил:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \delta_{13}x_3 + \Delta_{1F} &= 0; \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \delta_{23}x_3 + \Delta_{2F} &= 0; \\ \delta_{31}x_1 + \delta_{32}x_2 + \delta_{33}x_3 + \Delta_{3F} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \end{matrix}$$

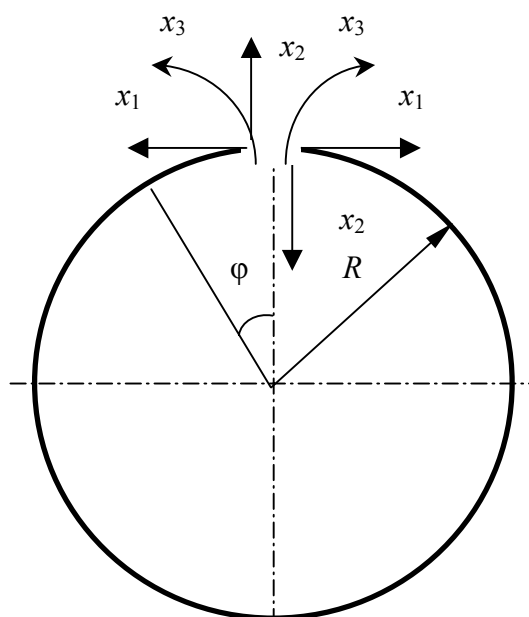


Рис. 2. Схема действия внутренних силовых факторов на трубу

Уравнение (1) выражает отсутствие смещения разреза (в основной системе) в направлении силы x_1 . Уравнение (2) выражает отсутствие взаимного смещения в направлении x_2 . Уравнение (3) выражает отсутствие взаимного поворота разреза.

Рассматривая предложенную систему уравнений и интеграл Мора, становится возможным определить изменение параметров дренажной трубы под действием эквивалентной нагрузки и построить эпюру изгибающих моментов в безразмерном виде, что является наиболее значимым для выявления причин возникновения дефектов при строительстве ЗГД в зоне орошения узкотраншейным способом.

Литература

1. Беляев Н.М., Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
2. Штеренлихт Д.В., Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

346448, г. Новочеркасск, ул. Н.-Терешковой, 15, кв. 48, т. 7-30-90, e-mail: avmich@mail.ru

УДК 624.15:004.89

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ

Е.Ю. Анищенко, С.И. Евтушенко

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Излагаются результаты разработки программно-аппаратного комплекса управления информационно-измерительной тензометрической системой СИИТ-3 и обработки данных экспериментальных исследований с использованием персонального компьютера в реальном масштабе времени.

Автоматизированный испытательный комплекс лаборатории оснований и фундаментов кафедры САПР ОСФ ЮРГТУ (НПИ), созданный под руководством профессора Ю.Н. Мурзенко, предназначен для проведения экспериментальных исследований оснований и фундаментов на крупномасштабных моделях в лабораторных условиях. Центральным звеном автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) является испытательная машина МФ-1. Кроме того, в состав АСНИ входят следующие устройства: система дистанционных преобразователей, информационно-измерительная система СИИТ-3, компьютерная система с периферийными устройствами. Программно-техническое обеспечение АСНИ создает возможность выполнения экспериментов на моделях в реальном масштабе времени.

Машина МФ-1 предназначена для модельных испытаний фундаментов на песчаном основании и относится к разряду вертикальных испытательных машин с гидравлическим приводом, маятниковым гидравлическим силоизмерителем и централизованным пультом управления. Основанием служит среднезернистый воздушно-сухой песок, моделирующий собой песчаное основание.

Напряжения и деформации в массиве основания измеряются высокочувствительными преобразователями напряжений (месдозы) МК-37, МК-26 (пределы измерений от 0 до 0,25 МПа) и МК-54 (пределы измерений от 0 до 0,5 МПа) конструкции Ю. Н. Мурзенко; преобразователями деформаций (деформометры) Д-2 конструкции Ю.В. Галашева и Ю.Н. Мурзенко, датчиками сдвига конструкции В.В. Шматкова.

Регистрация показаний преобразователей производится измерительной тензометрической системой СИИТ-3, включающей блок коммутации и блок измерений, сопряженной с персональным компьютером. Измерительная тензометрическая система СИИТ-3 работает в автоматическом режиме опроса каналов со скоростью 50 опросов в секунду. Это позволяет производить несколько опросов за короткий промежуток времени.

На рис. 1 представлена блок-схема аппаратно-программного комплекса автоматизированной системы экспериментальных исследований.

Организация обработки показаний дистанционных датчиков в реальном масштабе времени связана с необходимостью влиять на ход эксперимента в зависимости от результатов оперативной обработки данных, представленных, как правило, в виде таблиц, графиков и изолиний с разной степенью детализации. Ее необходимо выполнять за короткое время с максимальным использованием оборудования.

Аппаратура для измерения исследуемых параметров должна регистрировать показания приборов со скоростью, не требующей значительной задержки опыта во времени, особенно в фазе разрушения фундаментной модели. В практике проведения опытов широко используются информационно-измерительные системы, построенные на методах цифровой обработки, регистрации и передачи данных. Это позволяет широко применять ЭВМ для обработки результатов. В настоящее время возникает необходи-

мость сопряжения тензометрических станций типа СИИТ с персональными компьютерами на базе современных процессоров Intel и AMD. Данное обстоятельство делает актуальной задачу разработки связи измерительной, управляющей и обрабатывающих систем на базе современного персонального компьютера.

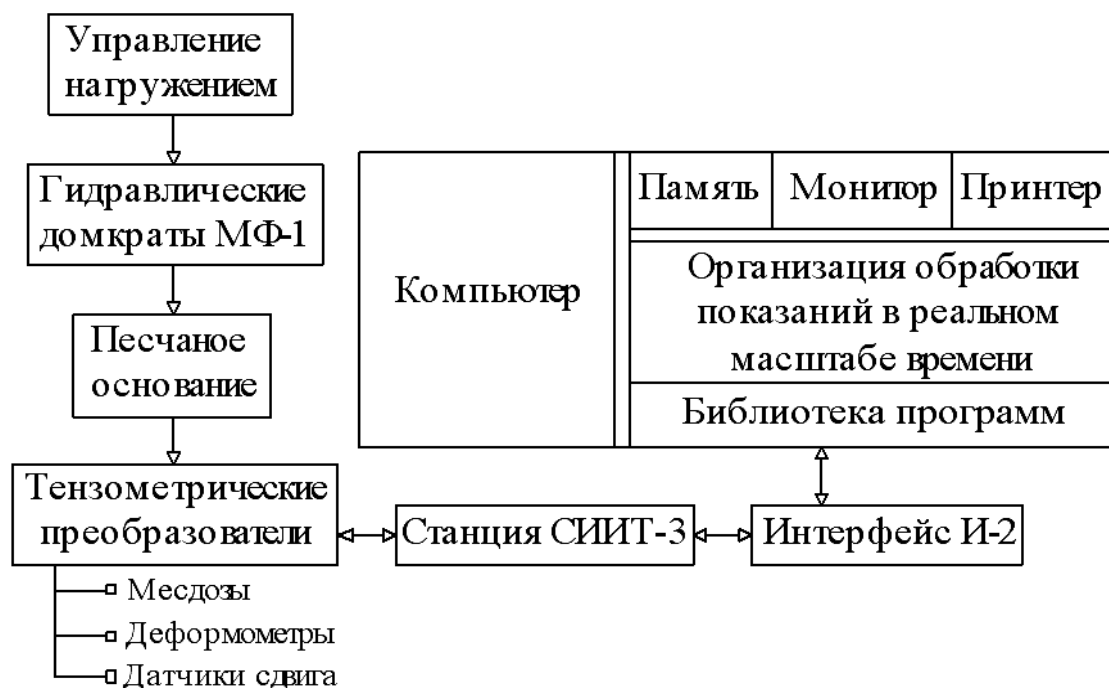


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс автоматизированной системы экспериментальных исследований

К персональному компьютеру типа IBM PC управляющая система может подключаться через стандартные внешние интерфейсы, средства которых входят в базовую конфигурацию. Некоторые из них:

- системная магистраль;
- параллельный интерфейс Centronics;
- последовательный интерфейс RS-232C.

Исходя из того, что для нормального функционирования тензометрической системы СИИТ-3 требуется невысокая скорость обмена данными, а на опрос нескольких десятков датчиков отводится порядка 5 минут, предпочтение было отдано интерфейсу Centronics. Разработанный интерфейс представляет собой расширение стандартного порта принтера. В основе устройства лежит микросхема K580BB55, которая представляет собой программируемый интерфейс параллельной передачи информации. Для сохранения совместимости со старыми вариантами интерфейса Centronics ввод информации в компьютер производится по 4 разряда. Для разработки программного обеспечения на языке ассемблера написаны драйвера для работы устройства [1].

Второй этап разработки комплекса заключался в создании программного приложения системы управления.

Программный модуль «Комплекс-1» [2], предназначенный для управления системой СИИТ-3, написан на языке программирования «Object Pascal» в среде быстрой разработки приложений Delphi. В процессе сбора данных «Комплекс-1» позволяет выполнять первичную статистическую обработку, вычисление средних значений показаний тензометрической станции. На рис. 2. представлен интерфейс программного модуля «Комплекс-1».



Рис. 2. Интерфейс программного модуля «Комплекс-1»

Кроме управления системой СИИТ-3 в процессе проведения эксперимента, данный модуль используется при градуировке дистанционных измерительных приборов и в ходе подготовки экспериментов для фиксированной установки преобразователей. Программный модуль «Комплекс-1» дает возможность сохранить в памяти компьютера показания тензометрической станции СИИТ-3 в табличном виде для последующей обработки экспериментальных и градуировочных данных в специализированных табличных редакторах.

Программный модуль «Комплекс-2» [3] предназначен для обработки и визуального представления показаний дистанционных преобразователей в реальном масштабе времени. Входными данными программы служат показания дистанционных датчиков, представленные в цифровом виде, а выходными – графики и таблицы значений напряжений и деформаций основания фундаментов для разных ступеней нагружения, которые могут быть использованы на последующих этапах моделирования.

Алгоритм обработки основан на вычислении напряжений и деформаций по градуировочным зависимостям с учетом их нелинейности и гистерезиса.

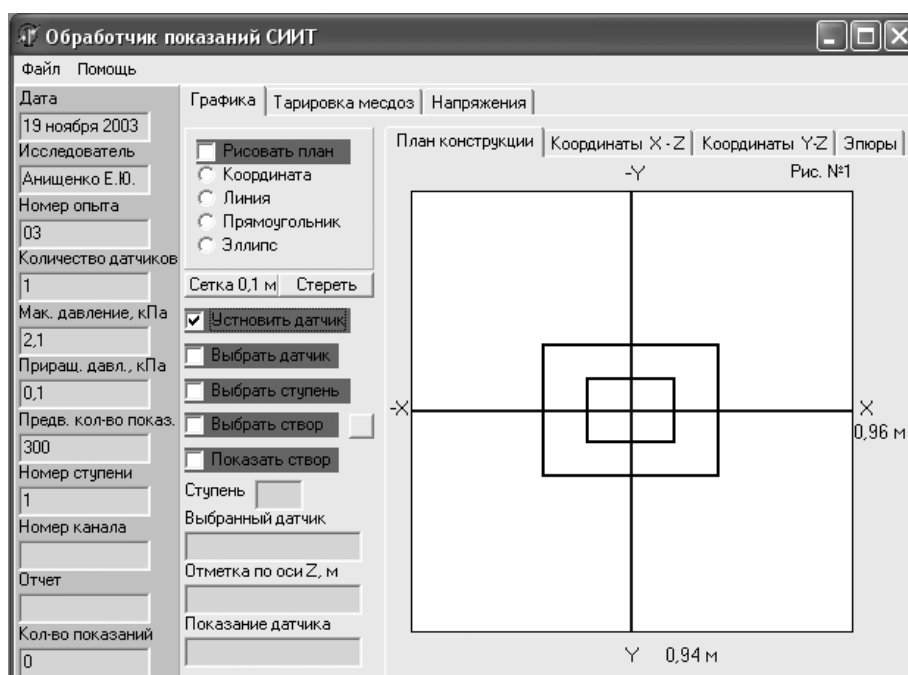


Рис. 3. Интерфейс программного модуля «Комплекс-2»

Выходные таблицы с результатами могут быть записаны в виде файлов на жестком диске для детального анализа после завершения эксперимента.

Литература

1. Мусаев М.М., Евтушенко С.И., Евтушенко А.С. Автоматизация сбора и обработки информации при экспериментальных исследованиях оснований и фундаментов // Проблемы строительства и инженерной экологии: Матер. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию строительного факультета / Юж.-Рос. гос. тех. ун. (НПИ). – Новочеркасск: НОК, 2000. – С. 156-158.
2. Анищенко Е.Ю., Евтушенко С.И., Мусаев М.М., Евтушенко А.С. Управление тензометрической станцией СИИТ-3 («Комплекс-1») // Свид-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ 2004610372 РФ / Роспатент. – № 2003612599; Заявл. 10.12.2003; Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2004.
3. Анищенко Е.Ю. Обработка показаний тензометрической станции СИИТ-3 («Комплекс-2») // Свид-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ 2004610374 РФ / Роспатент. – № 2003612601; Заявл. 10.12.2003; Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2004.

УДК 691.322.001.573

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕЖЕУЛОЖЕННОЙ КЕРАМЗИТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

В.А. Есаулов

Ростовский государственный строительный университет (РГСУ)

Дано описание математической модели тепловых процессов в свежееуложенной керамзитобетонной смеси с учетом ее внутренней геометрии и физических идеализаций.

В практике особую актуальность приобретают круглогодичные циклы строительных работ и их производство в экстремальных условиях, в том числе в зимних. Процесс твердения бетона значительно превышает по длительности все остальные операции по изготовлению бетонных и железобетонных изделий. Как показывает практика работ и ряд исследований, тепло- массообменные процессы в твердеющем бетоне оказывают существенное влияние на его показатели назначения, являясь одним из важнейших факторов в технологии зимнего бетонирования. Развитие компьютерных технологий дает возможность качественного математического моделирования процессов тепло- массопереноса, в связи с чем исследование влияния тепло- массообменных процессов с использованием методов математического моделирования является актуальным и перспективным.

Ранее автором были разработаны обобщенные модели [1, 2], описывающие процессы тепло- массопереноса в твердеющем бетоне с учетом его геометрической структуры разного типа [3]. Однако при их практическом использовании необходимо большое число параметров, а также относительно большие вычислительные затраты, и поэтому они в большинстве случаев представляют интерес для теоретического исследования.

В результате анализа моделей, используемых для описания процессов тепло- массопереноса в твердеющем бетоне [4, 5], автором предложена и обоснована модель тепло- массообменных процессов в керамзитобетонной смеси, отличие которой от известных состоит в том, что она построена на основе идеализаций, напрямую не вытекающих из тех, которые были использованы при построении обобщенных моделей. Показано, что на стадии укладки массообменные процессы между растворной составляющей и керамзитом отсутствуют, и между ними существует идеальный тепловой контакт. Это явилось одним из оснований для выбора теплообмена как наиболее информативного параметра. На основе данных по величине критериальных характеристик тепло- массопереноса, был сделан вывод о независимом характере протекания процессов тепло- массообмена в керамзитобетонной смеси, что позволило резко понизить ее сложность.

В результате анализа современных подходов к моделированию геометрической структуры бетонной смеси [6], а также данных по микроструктуре смеси, керамзитобетонная смесь рассматривается как двухфазная система «керамзит - растворная составляющая», при этом на стадии укладки к ним применимо континуальное приближение [7]. На стадии укладки геометрическая структура керамзитобетонной смеси удовлетворительно описывается в рамках вероятностно-геометрической концепции, которая отражает стохастический характер расположения керамзита в растворной составляющей. Ввиду этого, при формулировке математической модели теплового поля в керамзитобетонной смеси использовалась методика пространственного осреднения в приближении эргодической гипотезы о структуре смеси [8].

Следует отметить, что выбор метода осреднения качественно зависит от технологии тепловой обработки бетонной смеси. При учете взаимо-

действия теплового поля керамзитобетонной смеси с окружающей средой были применены граничные условия четвертого рода для теплообмена на границе с опалубкой, воздухом и грунтом. В случае воздуха и грунта предполагалось наличие фазового перехода.

Литература

1. Айрапетов Г.А., Есаулов В.А. Математическая модель твердения свежееуложенной бетонной смеси с использованием метода термоса // «Строительство-2002»: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д: РГСУ, 2002. – С. 8-9.
2. Айрапетов Г.А., Есаулов В.А. Математическая модель твердения бетона с учетом взаимосвязи явлений перколяции и тепло-массопереноса // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д: РГСУ, 2002. – С. 50-55.
3. Айрапетов Г.А., Есаулов В.А. Математическая модель твердения свежееуложенной керамзитобетонной смеси с учетом схем тепло-массообмена и ее геометрической структуры // «Строительство-2003»: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д: РГСУ, 2003. – С. 137.
4. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535с.
5. Павлов А.Р. Математическое моделирование процессов тепло- массопереноса и температурных деформаций в строительных материалах при фазовых переходах. – Новосибирск: Наука, 2001. – 176 с.
6. Воробьев В.А., Илюхин А.А. Новые задачи компьютерного материаловедения – М.: Вестник РААСН, выпуск 4, 2001 – С. 122-128.
7. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
8. Механика насыщенных пористых сред / В.Н. Николаевский, К.С. Басниев, А.Т. Горбунов, Г.А. Зотов. – М.: Недра, 1970. – 339 с.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, кафедра ТСПиСМ,
т. (8632)655070, (86352)45353, e-mail: tsp@aanet.ru, esaul_va@mail.ru

УДК 536.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ХИМИЧЕСКИХ РАВНОВЕСИЙ

В.Ю. Бузько, А.А. Полушин, И.В. Сухно
Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Представлена программа (Windows 95/98/NT/2000/XP) моделирования термодинамических параметров химических равновесий.

Создана программа (рис. 1), моделирующая термодинамические параметры ($\lg K^0_{298}$, ΔH^0_{298} , ΔS^0_{298} , $\Delta C_p^0_{298}$, $d(\Delta C_p^0_{298})/dT$, $d^2(\Delta C_p^0_{298})/dT^2$) из температурной зависимости константы равновесия и использующая 8 регрессионных моделей (Вант-Гоффа, изобары и расширенной изобары реакции, Кларка-Глу и расширенная Кларка-Глу, DQUANT, Валентинера, Блэндамера-Робертсона-Скотта).

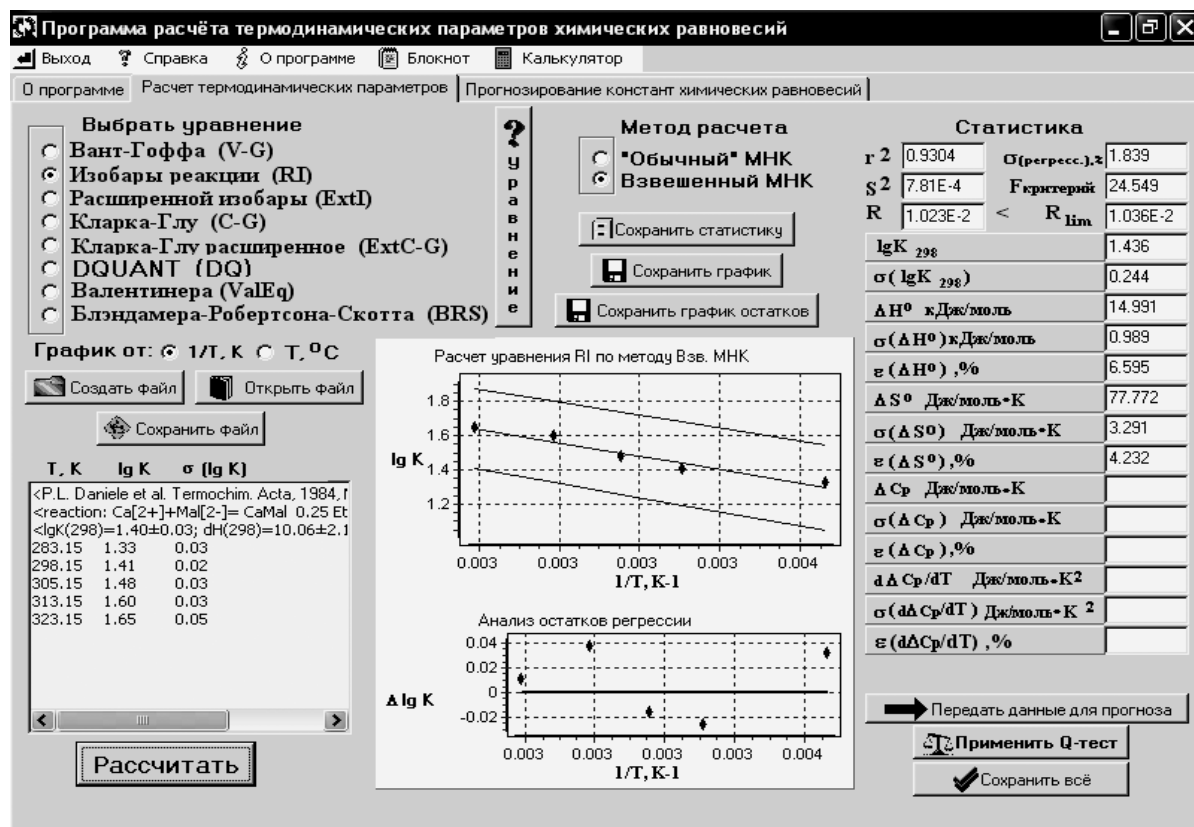


Рис. 1. Табулированная страница «Расчет термодинамических параметров»

Программа использует взвешенную и невзвешенную схемы робастной нелинейной регрессии и обеспечена статистической оценкой проверяемых моделей (критерии Фишера, Гамильтона, средний квадрат отклонений относительно регрессии, множественный коэффициент детерминации, среднеквадратичная ошибка регрессии). Для выбраковки сомнительных данных используется Q-тест Диксона.

350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, т. (8612) 69-95-74,
e-mail: buzko@chem.kubsu.ru, sukhno@chem.kubsu.ru, <http://public.kubsu.ru/sukhno>

УДК 543.428; 541.49; 546.562; 547-32-304.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РАВНОВЕСИЙ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

С.Н. Болотин, А.А. Скляр, Н. М. Трудникова
Кубанский государственный университет

Рассмотрено применение метода математической обработки электронных спектров растворов, содержащих ионы переходных металлов с целью определения констант равновесия процессов комплексообразования.

Обычно экспериментальный электронный спектр раствора, содержащий ион металла и лиганд (лиганды), содержит сигналы различных частиц, часто перекрывающихся друг с другом. Применение методик определения

состава и устойчивости комплексов по зависимости оптической плотности раствора от соотношения концентраций компонентов (методы изомолярных серий, насыщения и др.) имеет ряд ограничений и возможно лишь в тех случаях, когда количество окрашенных соединений в системе невелико или их сигналы отдалены друг от друга. Большинство *d*-элементов имеют в видимой области широкие полосы поглощения и в этом случае наиболее надежным методом определения как спектральных характеристик комплексных соединений, так и их устойчивости является сравнение теоретических спектров с экспериментальными путем компьютерного моделирования.

Целью данной работы являлась разработка алгоритма и создание компьютерной программы для расчета характеристик комплексных соединений в растворе по электронным спектрам при наличии равновесий различного типа без ограничения количества и состава частиц.

В качестве примера рассмотрена система, содержащая одновременно ионы меди(II) и две аминокислоты в качестве лигандов. На первом этапе проводили исследование бинарных систем и соответственно определяли характеристики комплексов с участием одного лиганда. Полученные данные использовались при обработке спектров тройных систем и определении характеристик разнолигандных комплексов.

Значения констант устойчивости комплексов, образующихся в системах медь(II) – аспарагиновая кислота – серин и медь(II) – аспарагиновая кислота – валин, определенные нами, соответствуют литературным данным, полученным другими методами.

E-mail: epr_kb@chem.kubsu.ru

УДК 621.315

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖЪЯДЕРНЫХ РАССТОЯНИЙ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ КУБИЧЕСКОЙ СИНГОНИИ

Е.А. Коваленко, И.Е. Еремин, Н.С. Костюков

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Предлагается геометрическая методика измерения межъядерных расстояний в ионных кристаллах кубической сингонии, основанная на использовании табличных данных об их плотности.

В физике существует целый ряд подходов определения внутренней структуры вещества, которые базируются на использовании экспериментальных данных, полученных различными способами. К ним относятся: дифракционные, резонансные, спектроскопические и оптические методы исследования. Кроме того, могут использоваться методики, позволяющие приблизительно определять межъядерные расстояния аналитически, в частности, как сумму ионных радиусов на основании надлежащих таблиц Гольдшмидта или Полинга, Бокия и Белова.

Рассматривая ионные кристаллы кубической сингонии, предлагается использовать геометрию их элементарной ячейки, на основании которой могут быть получены формулы для расчета межъядерных расстояний, исходными данными при использовании которых будут являться плотности исследуемых материалов. Например, анализируя строение элементарной ячейки, образующей структуру кубической гранецентрированной решетки с координационным числом равным 6, соответствующей соединениям типа *NaCl* и содержащей 4 формульные единицы, можно использовать следующие соображения. Учитывая, что 4 формульные единицы образуют некоторый объем V , а n формульных единиц заполняют соответствующую единицу объема, на основании геометрии куба можно получить следующее соотношение для измерения межъядерного расстояния a :

$$a = \sqrt[3]{\frac{(M_1 + M_2) \text{ аем}}{2\rho}},$$

где M_1 и M_2 – атомные массы ионов; аем – атомная единица массы; ρ – плотность кристалла.

Проверка адекватности предлагаемой геометрической методики расчета межъядерных расстояний показала ее наибольшую эффективность по сравнению с использованием таблиц ионных радиусов. Таким образом, определение межъядерных расстояний в кристаллах кубической сингонии может базироваться на непосредственных измерениях их плотности.

675027, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21,
e-mail: eie@freemail.amursu.ru

УДК 541.128

МОДЕЛЬ РЕКОМБИНАЦИИ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЮМИНОФОРА ZnS-Cu

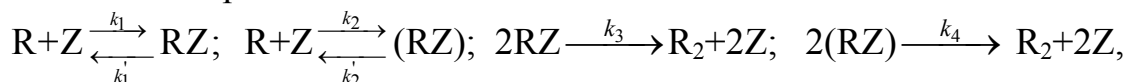
Т.С. Рогожина

Орловский государственный технический университет

С использованием техники импульсной периодической модуляции концентрации активных частиц в газовой среде обнаружено влияние степени покрытия поверхности хемосорбированными атомами водорода на скорость реакции $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$, протекающей на поверхности люминофора ZnS-Cu, обусловленное участием хемосорбированных атомов в отводе избыточной энергии при рекомбинации физически адсорбированных атомов водорода. Предложена модель реакции, описывающая полученные закономерности.

В результате проведенного экспериментального исследования атомно-молекулярных процессов, вызывающих электронное возбуждение поверхности кристаллофосфоров, в среде химически активных газовых частиц были получены закономерности, которые не могли быть объяснены механизмом участия хемосорбированных атомов водорода в актах химиче-

ских превращений, не выполнялся критерий участия хемосорбированных атомов Н в химических превращениях. Поэтому была предложена следующая модель реакции:



где (RZ) – хемосорбированный атом; RZ – атом, захваченный в предадсорбционное состояние. Ей соответствуют кинетические уравнения:

$$\dot{N}_1 = k_1(N_0 - N) - k_1'N_1 - 2k_3N_1^2; \quad \dot{N} = k_2(N_0 - N) - k_2'N - 2k_4N^2,$$

где N_1 – концентрация предадсорбированных атомов; N_0 – концентрация центров адсорбции; $k_1 - k_4$ – константы скорости реакций; $k_1 = 0,25nv\sigma$; σ – сечение захвата свободных атомов в состояние предадсорбции.

Полагая, что предадсорбированные и хемосорбированные атомы образуют две подсистемы: «быструю» и, соответственно, «медленную», и используя адиабатическое приближение, находим скорость реакции: $J \cong k_3N_1^2$;

$$J \approx k_3k_1^2(N_0 - N)^2(k_1')^{-2}, \quad 8k_1k_3(N_0 - N) \ll (k_1')^2; \quad 2k_3N_1 \ll k_1' \quad (1)$$

$$J \approx 0,5k_1(N_0 - N), \quad 8k_1k_3(N_0 - N) \gg (k_1')^2; \quad 2k_3N_1 \gg k_1'. \quad (2)$$

При условии $N \ll N_0$ выражение (2) описывает кинетические экспериментальные зависимости скорости реакции в случае «больших» концентраций атомов водорода в газовой среде n . Выражение (1) соответствует кривым, полученным в случае «малых» n . При росте концентрации атомов водорода в газовой среде выполнение условий $k_3 \sim N \sim n$ облегчает переход из режима реакции, определенного выражением (1), в режим, определенный равенством (2).

302028, г. Орел, ул. Брестская, д. 12, кв. 56, т. (0862)431251,
e-mail: rogozhin@rekom.ru

УДК [621.315.592:546.28]:382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КРИСТАЛЛА С ЖИДКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ С УЧЕТОМ РЕИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ НИХ

А.В. Малибашев, В.А. Малибашев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

На основе моделирования теплового поля проводится оценка дополнительного нагрева кристалла за счет реизлучения из дискретных зон расплава, находящихся в объеме кристалла. Показана связь реизлучения с изменением траекторий жидких включений, движущихся в поле температурного градиента.

Эпитаксиальные слои в виде локальных глубоких областей – каналов находят широкое применение в технологии изготовления полупроводниковых структур [1]. Свойства эпитаксиальных слоев, полученных мето-

дом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ), зависят как от состава жидкого включения, так и от их формы, траектории, тепловых условий проведения процесса ЗПГТ.

Нами рассматривается оценка влияния реизлучения из расплава дискретных жидких включений на их форму и траекторию движения. В основу оценки положено моделирование теплового поля с привлечением аналогии теплового и электрического полей и принципа суперпозиции полей [2]. В качестве жидких включений взяты кольцевые зоны. Считая, что с единицы площади поверхности кольцевого жидкого включения в единицу времени излучается энергия σ_0 , и используя решение аналогичной задачи в электростатике, температуру в окрестности кольцевого включения за счет составляющей реизлучения можно найти по формуле

$$T(r_M, z_M) = \frac{\sigma_0}{\eta} \int_0^{2\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{r_N dr_N d\alpha}{\sqrt{r_M^2 + r_N^2 - 2r_N r_M \cos \alpha + (z_N - z_M)^2}},$$

где N – точка на кольце; r_N – расстояние от центра кольца до точки N ; r_M – расстояние от точки N до точки наблюдения M ; z_M – расстояние от точки M до плоскости кольца $z = z_N$ (на рис. 1 $z_N = 0$); R_{\min} , R_{\max} – внутренний и внешний радиусы кольца; $F(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода; η – коэффициент, учитывающий теплопроводность кристалла и условия теплообмена.

Анализ теплового поля показывает, что при удалении от включений в область между ними изотермы вытягиваются в направлении к соседнему включению, т.е. эта область кристалла нагревается сильнее по сравнению с другими. Действие реизлучения ограничивается толщиной поглощения излучения кристаллом. Если расстояние между зонами меньше, чем удвоенная толщина поглощения, то искажения теплового поля за счет реизлучения приведут к сближению включений. Такие проявления траекторной неустойчивости экспериментально установлены [1, 3].

Зависимости температуры от координаты точек в сечении, перпендикулярном плоскости кольца и проходящем через его диаметр в относительных единицах, в зависимости от ширины кольцевого включения, полученные численным интегрированием формулы (1), приведены на рис. 1.

Ширина колец изменялась от 0 до 2 и 4 отн.ед. (кривые 1-3 соответственно) и далее до 20 отн. ед. с шагом 4 отн. ед. (кривые 4-7). Как следует из рис. 1, в центре кольца наблюдается повышение температуры по сравнению с областями, лежащими дальше среднего радиуса. Это свидетельствует о нарушении однородности поля температурного градиента кольцевой зоной расплава, причем более горячие центральные области будут способствовать стягиванию расплава кольцевой зоны к его центру; ширина кольцевой зоны будет увеличиваться, что в свою очередь усилит нагрев в центре кольца.

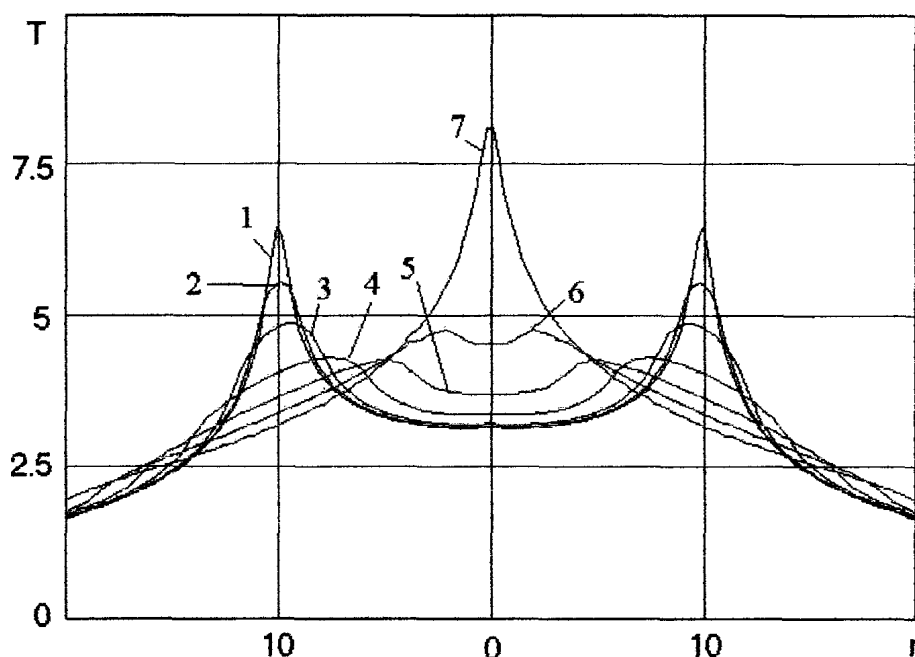


Рис. 1. Распределение температуры в кристалле вдоль диаметра кольцевого включения в зависимости от ширины включения кольца

Поскольку при повышении температуры роль реизлучения уменьшается, то рост температуры ЗПГТ будет способствовать устойчивости движения включений в прозрачных для излучения кристаллах.

Литература

1. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
2. Руссо В.А., Дарвойд Т.Н., Лисицкий И.С. Применение электроаналогий к исследованию температурных полей при выращивании монокристаллов // Научные труды ГИРЕДМЕТА. – М., 1969. – Т. XXV. – С. 15-22.
3. Anthony T.R., Cline H.E. Random Walk of Liquid Droplets Migrating in Silicon // J. Appl. Phys., 1976, v. 47. – № 6. – P. 2316-2324.

УДК 548.3

ФАЗОВАЯ РАЗУПОРЯДОЧЕННОСТЬ В СИСТЕМАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $MFe_{2-x}Cr_xO_4$ (M – CO, NI, CU, ZN)

Н.П. Шабельская, В.В. Иванов, В.М. Таланов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Проведены моделирование фазовой разупорядоченности и анализ ее влияния на некоторые свойства веществ. В системах твердых растворов $MFe_{2-x}Cr_xO_4$ (M – Co, Ni, Cu, Zn) установлено качественное соответствие результатов анализа с экспериментальными данными об особенностях фазообразования в оксидных системах, структурных характеристиках и электропроводности образующихся фаз.

Состояние распределения некоторых компонент состава сложного вещества по двум и более фазам, отличающимся в общем случае не только

химическим составом, но и структурой (состояние фазовой разупорядоченности) может возникнуть в процессе образования даже однофазного продукта реакции. Например, процесс образования однофазных твердых растворов $\text{ZnFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ со структурой кубической шпинели (Fd3m) в интервале параметра состава $0,3 < x < 1,7$ является многостадийным и протекает с образованием промежуточных продуктов синтеза. Анализ соответствия между характеристиками состояния фазовой разупорядоченности и закономерностями фазообразования в системах твердых растворов, а также физико-химическими свойствами образующихся растворов представляет интерес в связи с возможностью предсказания этих свойств на основе результатов несложного эксперимента.

Фазовая разупорядоченность может быть оценена по относительному отклонению плотности твердых растворов от их идеального значения. Это отклонение характеризует пористость материала, в проявлении которой отражается вся его физико-химическая и термическая предыстория. Процедура выделения эффективного вклада фазовой разупорядоченности в экспериментально определенную пористость, а также определение профиля индивидуальных вкладов фаз в разупорядоченность, необходимое для последующего гармонического анализа, могут быть представлены следующими соотношениями:

$$P_{\text{эфф}}(x) = P_{\text{эксп}}(x) - \Delta P_{\text{хп}}(x) - \Delta P_{\text{доб}}(x) + \Delta P_{\text{геом}}(x) \quad (1)$$

$$P_{\text{эфф}}(x) = P_0(x) + \sum_i^n P_i(x) \quad (2)$$

$$P_i(x) = 2[(x_{\text{max},i} - x)(x - x_{\text{min},i})]^{1/2} P_i / \Delta x_i. \quad (3)$$

В соответствии с соотношением (1) эффективный вклад фазовой разупорядоченности $P_{\text{эфф}}(x)$ в экспериментально определенную пористость $P_{\text{эксп}}(x)$ может быть рассчитан с помощью учета изменений пористости за счет цепочки превращений смеси исходных оксидов в конечный продукт $\Delta P_{\text{хп}}(x)$, удаления из материала минерализатора $\Delta P_{\text{доб}}(x)$ и изменения геометрических размеров таблетки в результате термообработки $\Delta P_{\text{геом}}(x)$. Соотношение (2) есть представление эффективной части пористости в виде ее фоновой составляющей $P_0(x)$ и интегральных $P_i(x)$ компонент от качественно различных вариантов разупорядоченности фаз внутри интервала концентрации $\Delta x_i = x_{\text{max},i} - x_{\text{min},i}$. Соотношение (3) отражает представление интегральной компоненты пористости в виде куполообразной функции с максимальной интенсивностью проявления внутри интервала Δx_i .

В результате сравнительного анализа двух групп эмпирических данных (полученных методами РФА, измерения электропроводности и рассчитанных из результатов измерения пористости образцов), представленных в таблице, между ними установлено качественное соответствие.

**Результаты физико-химических исследований твердых растворов
MFe_{2-x}Cr_xO₄ в сравнении с результатами анализа фазовой
разупорядоченности по данным о пористости образцов**

M	Интервал параметра x по дан- ным РФА	Фазо- вый со- став	Время синте- за, час.	$\frac{\Delta V_{\text{ф.е.}} \cdot 10^3}{\Delta x \text{ нм}^3}$	$\frac{\Delta \lambda \cdot 10^2}{\Delta x \text{ отн. ед.}}$	$\frac{\Delta \lambda \cdot 10^2}{\Delta x \text{ см/см}}$	Интервал параметра x по данным о пористости	Π_i отн. ед.
Co	0 – 0,4	Fd3m	20	- 3	- 100	- 18	0 – 0,5	2
	0,4 – 1,4	Fd3m	40-60	- 4	- 30	- 16	0,5 – 1,3	4
	1,4 - 2	Fd3m	70-100	- 15	- 25	- 4	1,3 - 2	11
Ni	0 – 1	Fd3m	25	- 16	0	- 60	0 – 1,25	5
	1 – 1,15	Fd3m	30	+ 20	- 70	+ 55		
	1,15 – 1,45	I4 ₁ /amd	40-50	+ 3	- 35	- 30	1,2 – 1,5	8
	1,45 - 2	Fd3m	60-80	- 3	- 75	- 25	1,4 - 2	6
Cu	0 – 0,35	I4 ₁ /amd	20	+ 14	- 85	-	0 – 0,3	5
	0,35 – 1,15	Fd3m	30	- 3	- 50	-	0,25 – 1,6	3,5
	1,15 – 1,45	(Fd3m +						
		I $\bar{4}2d$)	30-60	- 23	+ 14	-	1,2 – 1,8	2
	1,45 - 2	I $\bar{4}2d$	60	- 3	0	-	1,7 - 2	1
Zn	0 – 0,4	Fd3m	20	- 11	- 5	- 4	0 – 0,4	4
	0,4 – 1,6	Fd3m	70-100	- 14	- 5	- 4	0,4 – 1,6	15
	1,6 - 2	Fd3m	30	- 4	- 5	- 5	1,6 - 2	4

Практически для всех исследуемых систем твердых растворов результаты анализа фазовой разупорядоченности по данным о пористости образцов коррелируют с данными о фазовом составе и скорости образования конечного продукта, характером изменения объема формульной единицы $V_{\text{ф.е.}}$ твердых растворов MFe_{2-x}Cr_xO₄, параметром обращенности шпинели λ и удельной электропроводности σ (таблица). Это означает, что результаты анализа фазовой разупорядоченности в сложных оксидных системах позволяют качественно предсказать основные закономерности фазообразования и возможные изменения некоторых физико-химических свойств и структурных характеристик образующихся в них фаз.

346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, каф. ОиХХ ХТИ, т. 55-105.

УДК 548.3:530

THE ANALYSIS OF POSSIBLE CONCEPTUAL CONSTRUCTS FOR CONCEPTUAL SYSTEMS CONSTRUCTION

V.V. Ivanov

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Рассмотрены возможные концептуальные конструкты, которые могут быть использованы для построения вариантов концептуальных систем в химии и материаловедении.

One or a few relations are taken as a principle of any abstract construction of a mathematical theory. These relations between elements of some multitude are the composition relation (in algebraic constructions), the ordinal relation (in order constructions), the topological relation (in topological constructions), or their possible combinations [1].

Each abstract construction determines the corresponding conceptual construct:

Element – Composition – Structure (1), or ECR_C ;

Element – Order – Structure (2), or EPR_P ;

Element – Topology – Structure (3), or ETR_T ;

Element – Composition \cap Order – Structure (4), or $EC \cap PR_{CP}$;

Element – Composition \cap Topology – Structure (5), or $EC \cap TR_{CT}$;

Element – Order \cap Topology – Structure (6), or $EP \cap TR_{PT}$;

Element – Composition \cap Order \cap Topology – Structure (7), or $EC \cap P \cap TR_{CPT}$.

Thus, all possible conceptual constructs for conceptual systems construction were obtained [1].

The matter of all constructive elements «Structure (N)» is different. Only Structure (1) of the first conceptual construct is the structure, which completely depends from Composition. This conceptual construct ECR_C is in the best way corresponds to the second conceptual system of chemistry – the structural theories system [2]. The procedure of receipt of the conceptual construct ECR_C from algebraic construction is following.

Elements. If assume that:

1) $E = \{e_i\}$ is the terminal multitude of elements, and the $p \in P: pe_1 = e_2$ (where $e_1, e_2 \in E$) is the equivalent relation, which ensures the splitting of multitude E on the classes of the similar elements $E^\alpha = \{e \mid \alpha(e) = \alpha\} \in E$ (where α is the fundamental characteristic index of the class);

2) the number of bonds $\omega(e)$ and index of bonds $\beta(e)$ between elements are their characteristic, then the structural unification of these elements into configuration is possible.

Configurations and images. If assume that:

1) $C = \{c_{ij}\}$ is the multitude of configurations, where $c_{ij} \{e_i, e_j\}$ is the combination of elements with indexes $\beta_i(e_i)$ and $\beta_j(e_j)$;

2) the bond's relation ρ and type of combination $r \in R$ (where R is multitude of schemes of the configuration's structures) are new;

3) the relations $\Pi = \langle \rho, R \rangle$ is the combinatoric rules, which determines the multitude of regular configurations or structures $C(\Pi)$, then the multitude of images $I = \{I_i\}$ may be received upon multitude of regular structures $C(\Pi)$ by identification rule Id.

The images algebra may be presented in the following way: $A = \langle E, S, R, \rho, \Pi \rangle$. The multitude E is the composition of images and the R is the structural characteristic of the combinations, which may be formed the every image I_i .

Image-presentation and Construct. Elemental composition and configuration's structure are the main characteristics of Image-presentation about object. The Image-presentation may be described in the following conventional construct $K = \langle E, C, R \rangle$. In this symbolic entry the E , C and R are denotes the Element, Composition and Structure, accordingly. If assume that Elements E are completely determines Composition of configurations C and their Structure R , then the conventional construct K is the conceptual construct ECR.

References:

1. Ivanov V.V. Combinatoric modeling of possible structures of an inorganic substances. – Rostov-on-Don: SKNC VS, 2003. – 204 p.
2. Kuznetsov V.I. Dialectic of chemistry development. From history to theory chemistry development. – M.: Nauka, 1973. – 328 p.

346428, Novocherkassk, Prosveschenia, 132, dep. inorgan. chem., tel. 55-105.

УДК 548.1:541.1:669.018

ABOUT PHASE AND STRUCTURAL PHASE DISORDERING ON SURFACE OF THE NI-SI-COATS UPON STEELS AND REFRACTORY METALS

V.V. Ivanov, S.I. Marchenko, A.V. Ivanov, O.M. Bashkirov, V.T. Loginov
Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

ФГУП ОКБ «Орион»

Проанализирована возможность реализации фазовой и структурно-фазовой упорядоченности в поверхностных слоях упрочняющих композиционных Ni-Si-покрытий на сталях. Установлено, что эти специфические состояния в поверхностных слоях композиционных покрытий могут определять уровень проявляемых ими физико-механических характеристик.

The compositions Me-Si (where Me is denotes a metals of iron group) as a wear and corrosion firmness coats upon iron, steels or refractory metals were investigated [1-3]. It is possible the best properties of the firm coats are conditioned by specific self-creation and accommodation processes, which follows on the coat's surface. An analysis of the coexistence's possibility of the phase and structural phase disordering on the Ni-Si-coats surface is the main task of this paper.

In Ni and Ni₃Si structures the atoms are formed the cubic close-packing [4] (fig.1, number 1 and 2). All tetrahedral positions in cubic close packing from Ni-atoms of the structure NiSi₂ are occupied by silicon atoms [4, 5] (fig. 1, number 5). The structure Ni₂Si presents itself the hexagonal close packing from Ni-atoms, in which half octahedral positions are occupied by silicon atom [5] (fig. 1, number 3). Monoclinic structure of the NiSi can be presented as a distorted variant of the hexagonal structure Ni₂Si, in which is absent the half an Ni-atoms [4, 5] (fig. 1, number 4).

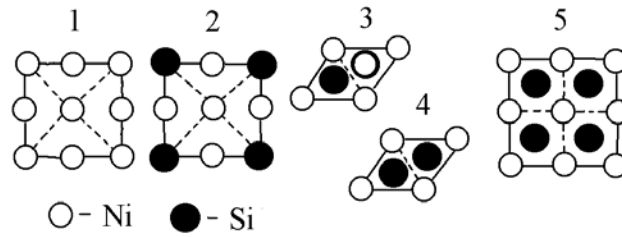


Fig. 1. Ideally representations of the Ni (1), Ni₃Si (2), Ni₂Si (3), NiSi (4) and NiSi₂ (5) crystal structures as a projection on the corresponding XY-plane

At mechanical influence on the surface material, being accompanied the point deformations and the increasing of the temperature before 1200°C, in surface layers of the Ni-Si-coat can simultaneously proceed the following processes: 1) the formation of other possible Si-containing compounds with more high contents silicon and to account mechanic-chemical reactions, bring about the following transitions: $\text{Ni} + 2\text{Si} \Rightarrow 1/3\text{Ni}_3\text{Si} + 5/3\text{Si} \Rightarrow \text{NiSi}_2$, $\text{Ni} + \text{Si} \Rightarrow 1/2\text{NiSi} + 1/4\text{Ni}_2\text{Si} + 1/4\text{Si} \Rightarrow \text{NiSi}$, as a result which is realized the phase disordering condition;

2) the formation of possible set pseudo-phase for each silicon-containing phase, which are have the structured vicinity to the initial phase and developed network inter-phase borders; is it herewith realized the structural phase disordering condition (table).

Table

**Structural description of some phases
in system Ni-Si and its possible modifications**

Composition	Space group (z)	Lattice complexes and its characteristics	Symmetry of structures with analogic or similar lattice complexes
Ni ₃ Si	Pm3m (1)	Ni: J-3(c) 4/mmm Si: P-1(a) m3m	P432, P $\bar{4}$ 3m, Pm3, R $\bar{3}$ m, P4mm 4/mmm, P $\bar{4}$ 2m, P422, P4/m, P $\bar{4}$, Pmmm, Pmm2, P222, P2/m, Pm
θ-Ni ₂ Si	P6 ₃ /mmc (2)	Ni: P _c -2(a) $\bar{3}$ m, E-2(d) $\bar{6}$ m2 Si: E-2(c) $\bar{6}$ m2	P $\bar{6}$ 2c, P6 ₃ mc, P6 ₃ 22, P6 ₃ /m, P6 ₃ , P $\bar{3}$ 1c, P31c
NiSi	Pnma (4)	Ni: B _b A _a FI _a 1xz- 4(c)m Si: B _b A _a FI _a 1xz- 4(c)m	P2 ₁ 2 ₁ 2 ₁ , Pmc2 ₁ , Pna2 ₁ , Pmn2 ₁ , P2 ₁ /b
α-NiSi ₂	Fm3m (4)	Ni: F-4(a) m3m Si: P ₂ -8(c) $\bar{4}$ 3m	F432, Fm3, R $\bar{3}$ m, I4/mmm, I4mm, I $\bar{4}$ 2m, I422, I4/m, I $\bar{4}$, Fmmm, Immm, Fmm2, Imm2, F222, I222, B2/b

Notes: z – quantity of the formula unite of substance in unite cell volume.

Necessary to note that when turning from nickel to silicon-containing compounds the relative «loosing» of their structures begins with composition NiSi (fig. 2, curve 1) [4]. However, formally possible concentration change into surface layer and formation, in particular, the structure NiSi₂, brings about more high importance micro-hardness and thermal stability to surface of the protectable material [3] (fig. 2, curves 2 and 3).

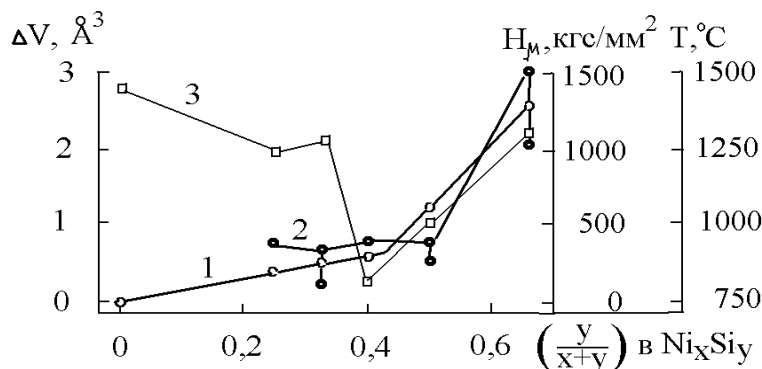


Fig. 2. Comparative change of Ni-atomic volume into the structures (1), the microhardness (2) and the maximal temperature of Si-containing compounds stability (3) as a function of composition's parameter

Thus, the considered possibility of the phase and structural phase disordering into surface layer nickel-silicon coats on steels, probably, can be a realization of the self-creation process and the effect to adaptability materials, which work in greatly unequilibrium conditions and function their own characteristic on necessary level of the manifestation.

References

1. Geld P.V., Sidorenko F.A. Silicides of the transition 3d-metals. – M.: Metallurgija, 1971. – 582 p.
2. Gladjishevskii E.I. Crystal chemistry of silicides and germanides. – M.: Metallurgija, 1971. – 296 p.
3. Samsonov G.V., Vinickii I.M. Refractory compounds. – M.: Metallurgija, 1978. – 560 p.
4. Matushenko N.N. Crystal structures of the binary compounds. – M.: Metallurgija, 1969. – 304 p.
5. Kripjakevich P.I. Structural types of intermetallic compounds. – M.: Nauka, 1977. – 290 p.

346428, Novocherkassk, Prosveschenia, 132, dep. inorgan. chem., tel. 55-105; 346428, Novocherkassk, Mihailovskaja, 150-a, «Orion», tel. 27-010.

УДК 548.3:530

THE MAIN TRANSFORMATION MECHANISMS OF A ECR-LIKE CONCEPTUAL CONSTRUCT AND THE CORRESPONDING CONCEPTUAL SYSTEMS

V.V. Ivanov

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Проанализированы основные способы вывода возможных вариантов концептуального ECR-конструкта, который максимально соответствует второй концептуальной системе химии.

Take into consideration that the main transformation mechanisms ECR-like conceptual construct may be formed from dynamic system properties, in particular, the evolution, the gomology, the furcation.

Evolutionary transformation mechanism of the ECR conceptual construct is the possibility of crossing from one condition to another and the change of it quality. In this case the conventional construct $\langle E, C, R \rangle$ may be presented in the following way $K = \langle E, C, R, U, S \rangle$ (or ECRUS). The additional construct elements U and S are the possible conditions and properties of a system.

Gomological transformation mechanism of the ECRUS conceptual construct is the result of manifestation of a different organization level of type ...super-system – system – sub-system... Hence it follows that the one-level construct $K^{(1)}$ may be reorganized into following multi-level way $K^{(1)} \Rightarrow K^{(n)}$, or $(ECRUS) \Rightarrow (\dots((ECRUS)^{(1)} CRUS)^{(2)} \dots CRUS)^{(n)}$.

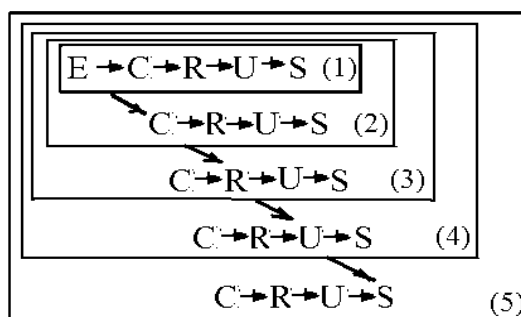
Furcationary transformation mechanism of the $K^{(1)}$ conceptual construct is the possibility of the private construct K_n existence for each class of elements E_n of the evolutionary conceptual construct $K^{(1)}$. Take into account the transformation $K^{(1)} \Rightarrow K_n^{(1)}$ may be presented in the following way $(ECRUS)^{(1)} \Rightarrow (EE_n C_n R_n U_n S_n)^{(1)}$.

Thus, the main variants of a ECR-like conceptual construct were received. The corresponding variants of the conceptual systems were inferred, too.

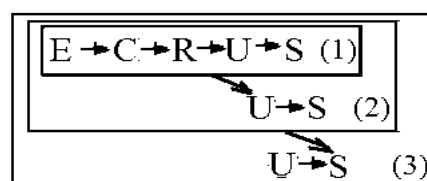
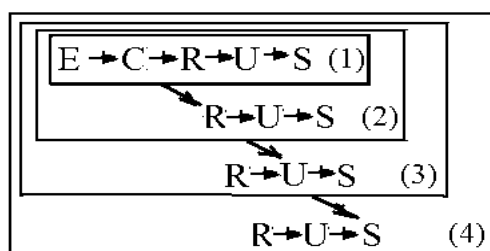
1. A linear variant of the evolutionary conceptual system:

$$E \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow U \rightarrow S.$$

2. A gomological variant of the evolutionary conceptual system:



and the possible compositional and structural analogies of its:



3. A furcationary variant of the evolutionary conceptual system:

$$E \rightarrow C_E \rightarrow R_E \rightarrow U_E \rightarrow S_E$$

$$E_C \rightarrow C \rightarrow R_C \rightarrow U_C \rightarrow S_C$$

$$E_R \rightarrow C_R \rightarrow R \rightarrow U_R \rightarrow S_R$$

$$E_U \rightarrow C_U \rightarrow R_U \rightarrow U \rightarrow S_U$$

$$E_S \rightarrow C_S \rightarrow R_S \rightarrow U_S \rightarrow S.$$

THE BASIC FORECASTING PRINCIPLES OF INORGANIC SUBSTANCES WITH NECESSARY PROPERTIES

V.V. Ivanov

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Представлена система основных принципов прогнозирования и моделирования неорганических веществ с заданными свойствами.

Take into account the using of the furcationary variant of an evolutionary conceptual system of type $(EE_4C_4U_4S_4)^{(1)}$ [1] is fixes the following relations for property: 1) $S(E) = S(E_C, E_R, E_U, E_S)$; 2) $S(C) = S(C_E, C_R, C_U, C_S)$; 3) $S(R) = S(R_E, R_C, R_U, R_S)$; 4) $S(U) = S(U_E, U_C, U_R, U_S)$.

The corresponding forecasting principles of an inorganic substances with necessary properties are may be formulated in the following way.

1. **Principle of fragmental construction of the substances.** Crystal structure of any substance may be presented by fragments, and the composition (qualitative and quantitative), the structure, the condition and the property of their fragments are the completely set of the composition, the structure and the diagnostic property of substances.

2. **Principle of the predominance of «geometric» factor into crystal structure forming.** The correlation of individual elemental characteristic of the structural fragment are shapes its crystallochemical topology and the composition, and therefore, the structure condition and the property of crystal.

3. **Principle of the determinate of the crystal structure by structural fragment.** Crystallochemical topology and the chemical composition of the structural fragment are the completely determines the structure, the condition and the diagnostic property of crystal.

4. **Principle of the determinate of the specific condition of crystal by fragment's condition.** Specific condition of the structural fragment is the result of its crystallochemical topology, the chemical composition and completely determines the the structure, the condition and the diagnostic property of crystal.

Let us note, that their four positions are the basic forecasting and modeling principles of inorganic substances with necessary properties.

Reference

1. Ivanov V.V. Combinatoric modeling of possible structures of an inorganic substances. – Rostov-on-Don: SKNC VS, 2003. – 204 p.

346428, Novocherkassk, Prosveschenia, 132, dep. inorgan. chem., tel. 55-105.

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Д.В. Чирков, В.В. Карташов, Е.П. Лобанов

ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет – УПИ

ООО «Уральский научно-технологический центр», г. Екатеринбург

Дано краткое описание программы моделирования теплофизических процессов горячего прессования тугоплавких материалов на установке УГП-2. Приведены использованные приемы и методики расчетов, намечены пути дальнейшего развития программы.

Одним из основных методов производства изделий из тугоплавких материалов является статическое горячее прессование – процесс высокотемпературного (температуры более 1500 °С) уплотнения порошков при одновременном действии высокого внешнего давления (от десятков до сотен МПа).

Разработанная программа является первой частью программного комплекса для моделирования процесса горячего прессования порошковых материалов на установке УГП-2. Уникальность установки заключается в том, что одновременно с прессованием происходит комбинированный нагрев как при помощи пропускания электрического тока через пресс-форму и обрабатываемый материал, так и внешним нагревателем. Нагрев происходит в вакууме или в атмосфере инертного газа.

Установка имеет цилиндрическую форму и обладает осевой симметрией, что позволило упростить уравнение распределения электрического потенциала и уравнение теплопроводности (в цилиндрической системе координат) [1]:

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left(\chi_z \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\chi_R R \frac{\partial \varphi}{\partial R} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\lambda_R R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + Q_V = \gamma C \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Для уравнения распределения электростатического потенциала приняты следующие граничные условия: на торцах установки (токоподводы) известно значение электрического потенциала, на боковой поверхности и оси симметрии установки задано условие непроницаемости.

Для уравнения теплопроводности заданы следующие граничные условия: на торцах установки (токоподводах) происходит конвективный теплообмен с охлаждающей водой, на боковой поверхности – теплообмен излучением с нагревателем и футеровкой, на оси симметрии принято условие непроницаемости [2].

Большинство коэффициентов в этих уравнениях – нелинейные, зависят от температуры, а для пористых материалов, кроме того, и от относительной плотности.

Точное аналитическое решение для приведенных выше уравнений может быть получено лишь в простейших случаях, поэтому возникает необходимость использования численных методов. В данной работе для их решения применен метод конечных элементов и приняты следующие упрощения:

- коэффициенты электропроводности приняты независимыми от температуры, что позволило существенно сократить объем вычислений: распределение электростатического потенциала и внутренних источников тепла рассчитывается только один раз;
- степени черноты поверхностей материалов, из которых сделаны элементы установки, приняты постоянными;
- упрощены некоторые конструкционные особенности установки.

Для решения нелинейного уравнения теплопроводности применен метод итераций. Специфика обрабатываемых материалов требует учета анизотропии, их свойств по различным направлениям, что было учтено при разработке программы [3, 4].

В качестве среды программирования выбран пакет MATLAB. Выбор обусловлен тем, что пакет включает в себя богатые средства визуализации данных и имеет готовые процедуры для триангуляции областей и решения простейших уравнений методом конечных элементов.

Программа позволяет определить распределение температур, а также градиенты температуры в процессе горячего прессования с учетом анизотропии свойств и зависимостей теплоемкости и теплопроводности от температуры конструкционных материалов печи и спекаемого материала.

Дальнейшее развитие программы предполагает более полный учет нелинейности коэффициентов электропроводности, учет процесса уплотнения материала, применение методов априорной оценки погрешности полученного решения, а также возможности получения решения с заданной точностью за приемлемое время. Кроме того, будет произведено исследование с целью наиболее оптимального выбора метода решения нелинейных уравнений.

Литература

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 763 с.
2. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 439 с.
3. Валасова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Приближенные методы математической физики. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.
4. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.

620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ,
Физико-технический факультет, кафедра редких металлов,
т. (343)-375-47-41, e-mail: dmitry_chirkov@mail.ru, kvv@dpt.ustu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Бородай А.В., Салтыков С.В. О структуре, пространственно-временном масштабе, динамике и механизме пробоя контактных вихревых полей	4
Дерябин Д.В., Емельянов А.Ф., Штриплинг Л.О. Некоторые особенности суммирования погрешностей отдельных звеньев планетарных передач	11
Дерябин Д.В., Емельянов А.Ф., Штриплинг Л.О. Вероятностный расчет кинематических цепей планетарных передач	14
Шленский Я.Ю., Пономарев Б.Б. Моделирование исходной инструментальной	16
Федосенков Б.А., Дороганов В.П., Чеботарев А.Л. Технология обработки сигнальных координат в автоматизированной смесеприготовительной системе	21
Федосенков Б.А., Камалдинов А.В. Методика регистрации и преобразование двумерных время-частотных отображений одномерных сигналов	25
Федосенков Б.А., Шебуков А.В. Управление смесительным комплексом по двумерным время-частотным переменным на базе вейвлет-преобразований	27
Воронин Р.Н. Геометрическая модель формы пор хлебного мякиша	31
Телегин В.А. Идентификация математической модели пылеулавливающего устройства с форсункой	34
Михеев А.В. Математическая модель напряжений и деформаций в дренажных трубах	38
Анищенко Е.Ю., Евтушенко С.И. Программно-аппаратный комплекс автоматизированной системы научных исследований оснований и фундаментов	40
Есаулов В.А. Математическая модель тепловых процессов в свежесушеной керамзитобетонной смеси при применении тепловой обработки в зимних условиях	44
Бузько В.Ю., Полушин А.А., Сухно И.В. Моделирование термодинамических параметров химических равновесий	46
Болотин С.Н., Скляр А.А., Трудникова Н.М. Математическое моделирование химических равновесий по данным оптической спектроскопии	47
Коваленко Е.А., Еремин И.Е., Костюков Н.С. Методика измерения междядерных расстояний в ионных кристаллах кубической сингонии	48
Рогожина Т.С. Модель рекомбинации атомов водорода на поверхности люминофора ZnS-Cu	49
Малибашев А.В., Малибашев В.А. Моделирование теплового поля кристалла с жидкими включениями с учетом реизлучения из них	50
Шабельская Н.П., Иванов В.В., Таланов В.М. Фазовая разупорядоченность в системах твердых растворов $MFe_{2-x}Cr_xO_4$ ($M - Co, Ni, Cu, Zn$)	52
Ivanov V.V. The analysis of possible conceptual constructs for conceptual systems construction	54
Ivanov V.V., Marchenko S.I., Ivanov A.V., Bashkirov O.M., Loginov V.T. About phase and structural phase disordering on surface of the Ni-Si-coats upon steels and refractory metals	56
Ivanov V.V. The main transformation mechanisms of a ECR-like conceptual construct and the corresponding conceptual systems	58
Ivanov V.V. The basic forecasting principles of inorganic substances with necessary properties	60
Чирков Д.В., Карташов В.В., Лобанов Е.П. Программа моделирования теплофизических процессов горячего прессования	61

Научное издание

Моделирование. Теория, методы и средства

Материалы IV Международной научно-практической конференции
Часть 2

Редактор: Е.В. Кулыгина
Компьютерная верстка: М.К. Аверьянова

Подписано в печать 25.05.04 г.
Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Печ. л. 3,93. Уч.-изд. л. 4,50. Тираж 100 экз. Заказ 47-1737.

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)
Адрес университета и центра оперативной полиграфии:
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. 55-222

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

*Материалы
IV Международной научно-практической
конференции*

Часть 3

*9 апреля 2004 года
г. Новочеркасск*

Новочеркасск 2004

УДК 519.688
ББК 22.18 в6
М 74

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки РФ;
Северо-Кавказский научный центр высшей школы;
Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт);
Технический университет Ильменау (ФРГ);
Редакция журнала «Известия вузов. Электромеханика»;
Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион.
Технические науки»;
Ростовский государственный медицинский университет

Оргкомитет конференции:

Н.И. Горбатенко (РФ), профессор – председатель;
Ю.А. Бахвалов (РФ), профессор;
Г. Вурмус (ФРГ), профессор;
Г. Йегер (ФРГ), профессор;
Е. Калленбах (ФРГ), профессор;
М.В. Ланкин (РФ), доцент – зам. председателя;
Н.Ф. Никитенко (РФ), профессор;
А.В. Павленко (РФ), профессор;
В.А. Плаксин (РФ), доцент;
В.Н. Чернов (РФ), профессор

Редакционная коллегия:

Н.И. Горбатенко, д-р техн. наук, профессор – ответственный редактор;
М.В. Ланкин, канд. техн. наук, доцент – зам. ответственного редактора;
В.А. Плаксин, канд. техн. наук, доцент

М 74 Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы IV Ме-
ждународ. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 9 апр. 2004 г.: В 4 ч. / Юж.-
Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – Ч. 3. – 63 с.

ISBN 5-88998-462-4

Сборник содержит материалы по нескольким научным направлениям. В третьей части рассмотрены вопросы математических моделей в энергетике и электромашиностроении; математических моделей в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях.

УДК 519.688

ISBN 5-88998-462-4

© Южно-Российский государственный
технический университет (НПИ), 2004
© Авторы, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт) – крупнейший вуз на юге России, имеющий вековой опыт исследований в различных отраслях науки и техники и обширные научно-технические контакты, – выступил инициатором проведения ряда Международных дистанционных научно-практических конференций. Такая форма проведения конференций стала возможной в результате широкого развития телекоммуникационных технологий, в том числе Internet.

В апреле 2004 года на базе ЮРГТУ (НПИ) проходила IV Международная научно-практическая конференция «Моделирование. Теория, методы и средства». В работе конференции приняли участие ученые и специалисты – представители высших учебных заведений, НИИ, научно-производственных предприятий Москвы, Екатеринбурга, Новосибирска, Краснодара, Иркутска, Ростова-на-Дону, Казани, Томска, Тулы, Оренбурга, Владивостока, Орла, Ставрополя, Таганрога, Перми, Ижевска, Новочеркасска, Шахты и других городов.

На конференцию представлено 72 доклада, которые вошли в сборник, состоящий из четырех частей, в соответствии с научными направлениями.

Первая часть содержит публикации о математических моделях в электротехнике и магнитной гидродинамике; математических моделях в теплотехнике и гидравлике; математическом моделировании социальных и экономических процессов; математических моделях в медицине, биологии и экологии.

Вторая часть содержит материалы, посвященные математическому моделированию технологических процессов; математическим моделям в строительстве, математическим моделям в химии и металлургии.

В третьей части рассмотрены вопросы математических моделей в энергетике и электромашиностроении; математических моделей в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях.

В четвертую часть вошли материалы о математическом моделировании информационно-измерительных и вычислительных систем; физическом моделировании в науке и технике; учебно-методические вопросы преподавания основ моделирования в учебном процессе.

Организаторы выражают уверенность, что конференция послужит обобщению и распространению научных результатов, оказанию методической помощи молодым ученым и аспирантам, а также стимулированию контактов между учеными России и зарубежья, с благодарностью примут замечания и пожелания.

Оргкомитет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАДИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ

А.И. Троицкий

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Исследована математическая модель потерь активной мощности в радиальной четырехпроводной линии с несимметричной нагрузкой, отнесенных к потерям от токов прямой последовательности в линейных проводах.

Потери активной мощности в трех линейных и нулевом проводах радиальной четырехпроводной линии или на отдельном участке магистральной четырехпроводной линии при несимметрии линейных токов [1] равны:

$$\Delta P = 3I_1^2 R_F + 3I_2^2 R_F + 3I_0^2 R_F + I_N^2 R_N, \quad (1)$$

где I_1, I_2, I_0 – модули токов прямой, обратной и нулевой последовательности (ТПП, ТОП, ТНП) соответственно фазы А; R_F, R_N – активные сопротивления линейного и нулевого проводов; модуль тока в нулевом проводе

$$I_N = 3 I_0. \quad (2)$$

Введем обозначение $\gamma = \frac{R_N}{R_F}, \quad (3)$

тогда с учетом равенств (1)-(3) потери активной мощности радиальной четырехпроводной линии нужно определять по формуле:

$$\Delta P = 3I_1^2 R_F + 3I_2^2 R_F + 3I_0^2 R_F + 9\gamma I_0^2 R_F. \quad (4)$$

Левую часть и каждое слагаемое правой части уравнения (4) разделим на $3I_1^2 R_F$ – потери активной мощности от ТПП в трех линейных проводах. Потери активной мощности в трех линейных и нулевом проводах четырехпроводной линии при несимметричной нагрузке, отнесенные к потерям активной мощности от ТПП в трех линейных проводах, обозначим как

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{3I_1^2 R_F}. \quad (5)$$

Помня о том, что модули коэффициентов несимметрии (КНТ) и неуравновешенности (КНУ) токов соответственно равны

$$k_2 = \frac{I_2}{I_1}; \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{I_0}{I_1}, \quad (7)$$

из уравнения (4) с учетом обозначения (5) находим

$$\Delta P^* = 1 + k_2^2 + (1 + 3\gamma)k_0^2. \quad (8)$$

Для фиксированных значений γ (0; 0,5; 1; 2) получим следующие уравнения:

$$\Delta P^* = 1 + k_2^2 + k_0^2. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P'^* &= 1 + k_2^2 + 2,5 k_0^2; \\ \Delta P''^* &= 1 + k_2^2 + 4 k_0^2; \\ \Delta P'''^* &= 1 + k_2^2 + 7 k_0^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

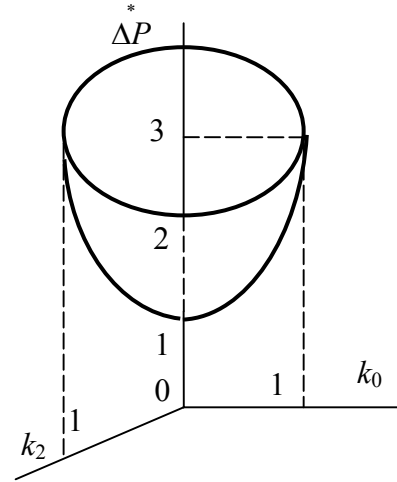


Рис. 1. Зависимость относительных потерь мощности от КНТ и КНУ, $\gamma = 0$

Уравнение (8) в координатах $k_2, k_0, \Delta P^*$ представляет собой поверхность второго порядка (параболоид вращения). Вершина параболоида (рис. 1) имеет координаты (0,0,1). Каждое из трех уравнений системы (10) – также поверхность второго порядка, но эллиптического параболоида. Значения абсциссы и ординаты в уравнении (9) и в системе уравнений (10) изменяются в интервале $0 \div 1$, а значения аппликаты – от 1 до 3; 4,5; 6; 9 соответственно (рис. 2).

Пусть отношение модуля ТОП к модулю ТНП

$$\alpha = I_2 / I_0. \quad (11)$$

В этом случае решение уравнения (9) относительно I_2

$$I_2 = \alpha I_0. \quad (12)$$

Значение модуля ТОП из выражения (12) подставим в формулу (6) для модуля КНТ. Она примет вид:

$$k_2 = \alpha I_0 / I_1. \quad (13)$$

Учтем выражение (7) для модуля КНУ, тогда из равенства (13) следует, что

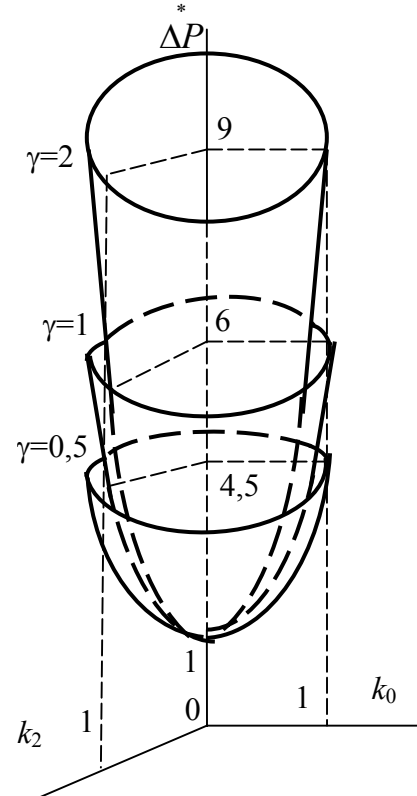


Рис. 2. Зависимости относительных потерь мощности от КНТ и КНУ, $\gamma = 0,5; \gamma = 1; \gamma = 2$

$$k_2 = \alpha k_0; \quad (14)$$

$$k_2^2 = \alpha^2 k_0^2. \quad (15)$$

Подставим значение квадрата модуля КНТ из выражения (15) в правую часть уравнения (8), тогда

$$\Delta P^* = 1 + \alpha^2 k_2^2 + (1 + 3\gamma)k_0^2. \quad (16)$$

После приведения подобных формула (16) примет вид

$$\Delta P^* = 1 + (1 + 3\gamma + \alpha^2)k_0^2. \quad (17)$$

Если режим симметричный и уравновешенный, то $k_2 = 0$, $k_0 = 0$ одновременно. В случае, когда $k_2 = 0$, $k_0 \neq 0$, дело имеет с неуравновешенным режимом. Когда же $k_2 \neq 0$, $k_0 = 0$, режим уравновешенный, но несимметричный. Для системы несимметричных токов это значит, что сумма комплексных линейных токов равна нулю, а ток в нулевом проводе отсутствует, и нет необходимости иметь нулевой провод. Если векторы линейных токов переместить на комплексной плоскости так, что начало последующего будет совпадать с концом предыдущего, то линейные токи образуют замкнутый треугольник.

Для линейных токов в общем случае $\alpha=1$, когда $k_2 = k_0$, следовательно, и $I_2 = I_0$, а также в двух частных случаях:

- а) вся нагрузка трехфазной радиальной линии включена в одну фазу;
- б) однофазные нагрузки в трех фазах имеют одинаковый характер (при амплитудной несимметрии).

Для случая б) имеет место только равенство модулей ТОП и ТНП, т.е. $I_2 = I_0$. Для случая же а) равны модули не только ТОП и ТНП, но и ТПП, т.е. $I_1 = I_2 = I_0$. При этом модуль каждой из ССТ для основной фазы А равен одной трети модуля однофазной нагрузки, включенной в конце радиальной трехфазной сети. Аргумент каждой из ССТ для фазы, в которую включена однофазная нагрузка в конце радиальной линии, равен ее аргументу.

Если $I_2 = 0$, $I_0 \neq 0$, то $\alpha = 0$, $k_2 = 0$. Когда $0 \leq k_2 \leq 1$, $0 \leq k_0 \leq 1$, то $\alpha > 1$ при условии, что $k_2 > k_0$, и наоборот.

О соотношении нулевой и обратной составляющих в несимметричных системах линейных токов

При расчетах несимметричных режимов в сетях 0,4 кВ принимается допущение о том, что присоединенные к ним однофазные нагрузки имеют одинаковый характер [2, 3]. В этом случае модули нулевой и обратной составляющих несимметричных токов (напряжений) равны друг другу [2-4].

В подавляющем большинстве случаев обследованных электрических сетей 0,4 кВ с несимметричными нагрузками [2] оказалось, что в них обратная составляющая меньше, чем нулевая. Определим условия, при которых имеет место неравенство

$$I_2 \leq I_0 \quad (18)$$

модулей токов обратной и нулевой составляющих соответственно.

Если комплексы токов заданы в фазных координатах, то

$$|\dot{I}_2| = \frac{1}{3} |\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c|; \quad (19)$$

$$|\dot{I}_0| = \frac{1}{3} |\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c|, \quad (20)$$

где комплексы линейных токов фаз А, В, С соответственно равны:

$$\dot{I}_a = I_a e^{-j\varphi_a}; \quad \dot{I}_b = a^2 I_b e^{-j\varphi_b}; \quad \dot{I}_c = a^2 I_c e^{-j\varphi_c}. \quad (21)$$

В формулах (19), (21) использованы обозначения: $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – углы сдвигов линейных токов по отношению к напряжениям своих фаз (не путать с аргументами токов); a, a^2 – операторы поворота векторов на 120 и 240° против часовой стрелки. С учетом системы уравнений (21) уравнения (19), (20) модулей ТОП и ТНП и неравенство (18) примут вид:

$$|\dot{I}_2| = \frac{1}{3} |I_a e^{-j\varphi_a} + I_b e^{j(120^\circ - \varphi_b)} + I_c e^{j(240^\circ - \varphi_c)}|; \quad (22)$$

$$|\dot{I}_0| = \frac{1}{3} |I_a e^{-j\varphi_a} + I_b e^{j(240^\circ - \varphi_b)} + I_c e^{j(120^\circ - \varphi_c)}|; \quad (23)$$

$$|I_a e^{-j\varphi_a} + I_b e^{j(120^\circ - \varphi_b)} + I_c e^{j(240^\circ - \varphi_c)}| \leq |I_a e^{-j\varphi_a} + I_b e^{j(240^\circ - \varphi_b)} + I_c e^{j(120^\circ - \varphi_c)}|. \quad (24)$$

Заменим комплексные величины, представленные в неравенстве (24) в показательной форме, на комплексные величины в алгебраической форме. Сложим порознь, соответственно, вещественные и мнимые составляющие комплексов под знаком модуля в правой и левой половине неравенства. Возведем в квадраты, мнимые и вещественные, части вновь полученных комплексов. Корни квадратные из суммы квадратов мнимых и вещественных их частей есть модули комплексов правой и левой частей неравенства (24). Полученное иррациональное неравенство заменим алгебраическим. В левой и правой частях этого неравенства выполним приведение подобных положительных значений сумм квадратов модулей линейных токов, а также деление оставшихся после приведения левой и правой частей неравенства на общий множитель 2. В результате получим неравенство:

$$\begin{aligned} & I_a I_b \cos \varphi_a \cos(120^\circ - \varphi_b) + I_a I_c \cos \varphi_a \cos(240^\circ - \varphi_c) + I_b I_c \cos(120^\circ - \varphi_b) \times \\ & \times \cos(240^\circ - \varphi_c) - I_a I_b \sin \varphi_a \sin(120^\circ - \varphi_b) + I_a I_c \sin \varphi_a \sin(240^\circ - \varphi_c) + \\ & + I_b I_c \sin(120^\circ - \varphi_b) \sin(240^\circ - \varphi_c) \leq I_a I_b \cos \varphi_a \cos(240^\circ - \varphi_b) + I_a I_c \cos \varphi_a \times \\ & \times \cos(120^\circ - \varphi_c) + I_b I_c \cos(240^\circ - \varphi_b) \cos(120^\circ - \varphi_c) - I_a I_b \sin \varphi_a \times \\ & \times \sin(240^\circ - \varphi_b) + I_a I_c \sin \varphi_a \sin(120^\circ - \varphi_c) + I_b I_c \sin(240^\circ - \varphi_b) \sin(120^\circ - \varphi_c). \end{aligned}$$

После алгебраических и тригонометрических преобразований оно примет следующий вид:

$$I_a I_b \sin(\varphi_a - \varphi_b) + I_b I_c \sin(\varphi_b - \varphi_c) + I_c I_a \sin(\varphi_c - \varphi_a) \leq 0. \quad (25)$$

Левая часть неравенства (25) по своей сути есть сумма модулей векторных произведений попарно взятых линейных токов в системе ортогональных координат так, что последующий ток отстает от предыдущего в порядке прямого следования фаз. Его можно записать в более компактной форме

$$\begin{cases} \sum I_i I_j \sin(\varphi_i - \varphi_j) \leq 0; \\ i = a, b, c; \quad j = b, c, a. \end{cases}$$

Поскольку синус – нечетная функция, то при обратном чередовании фаз неравенство (25) принимает противоположный смысл.

Таким образом, если линейные токи при прямом чередовании фаз удовлетворяют неравенству (25), то модуль ТОП всегда меньше модуля ТНП.

Пример. Пусть однофазные нагрузки, подключаемые в конце радиальной линии, заданы в системе ортогональных координат в условных единицах:

$$\dot{I}_a = 1; \dot{I}_b = 2e^{-j45^\circ}; \dot{I}_c = 3e^{-j30^\circ}. \quad (26)$$

Рассмотрим все возможные 6 способов их подключения к фазам сети. Вычислим значения ТОП, ТНП и левой части неравенства (25). Результаты вычислений представлены в таблице.

Таблица

Значения ТОП и ТНП

Однофазные нагрузки в системе ортогональных координат при их подключении на фазы сети			Значения составляющих		Значения левой части неравенства (25)
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	ТОП	ТНП	
1	$2e^{-j45^\circ}$	$3e^{-j30^\circ}$	0,388	0,884	-1,6387
$3e^{-j30^\circ}$	1	$2e^{-j45^\circ}$	0,388	0,884	-1,6387
$2e^{-j45^\circ}$	$3e^{-j30^\circ}$	1	0,388	0,884	-1,6387
$2e^{-j45^\circ}$	1	$3e^{-j30^\circ}$	0,884	0,388	1,6387
$3e^{-j30^\circ}$	$2e^{-j45^\circ}$	1	0,884	0,388	1,6387
1	$3e^{-j30^\circ}$	$2e^{-j45^\circ}$	0,884	0,388	1,6387

При амплитудной несимметрии $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, поэтому модули ТОП и ТНП равны друг другу.

В четырехпроводной радиальной линии 0,4 кВ, активные сопротивления каждого из линейных проводов которой равны между собой, а линейные токи – несимметричны, потери активной мощности рассчитывают по формуле (1).

Модуль ТПП при амплитудно-фазовой несимметрии определяют по формуле [2]:

$$\begin{cases} I_1 = \sqrt{\sum I_i^2 + 2\sum I_i I_j \cos(\varphi_i - \varphi_j)} ; \\ i = a, b, c; \quad j = b, c, a. \end{cases}$$

Для значений линейных токов, заданных системой уравнений (26), он равен 1,9323.

При амплитудной несимметрии $\varphi_i = \varphi_j$, поэтому

$$I_1 = (I_A + I_B + I_C)/3. \quad (27)$$

Из формулы (1) следует, что потери активной мощности в линии с несимметричной нагрузкой определяются симметричными составляющими (ССТ) линейных токов и активными сопротивлениями проводов. Но уменьшение ТПП связано со снижением нагрузки потребителей, поэтому оно нецелесообразно. Из уравнения (1) также следует особая значимость ТНП и нулевого провода четырехпроводной линии. Потери от ТНП $3I_0^2 R_F(1+3\gamma)$ как в линейных проводах, так и в нулевом проводе, в отличие от потерь от тока обратной последовательности $-3I_2^2 R_F$, которые только в фазных проводах.

Если сечение нулевого провода в 2 раза меньше, чем сечение линейного провода, то $\gamma = 2$. Для этого сечения нулевого провода и значений линейных токов, заданных системой уравнений (26), в случае прямого следования фаз

$$k_2 = 0,2; \quad k_0 = 0,4547; \quad \Delta P^* = 2,487,$$

для обратного чередования фаз

$$k_2 = 0,4547; \quad k_0 = 0,2; \quad \Delta P^* = 1,487.$$

В частном случае, когда модули ТНП и ТОП равны, относительные потери активной мощности от токов нулевой последовательности превышают потери от токов обратной последовательности в $(1+3\gamma)$ раз.

Как с технической, так и с экономической точки зрения при коррекции несимметричных режимов в распределительных сетях 0,4 кВ предпочтение следует отдавать уравниванию ТНП, поскольку значения их модулей равны или превышают значения модулей ТОП.

Как видно из таблицы, модули ТОП и ТНП отличаются примерно в 2,3 раза. В случае прямого следования фаз относительные потери активной мощности за счет несимметрии и неуравновешенности линейных токов в 1,67 раза больше, чем в случае обратного их следования.

Между коэффициентами, численно характеризующими несимметрию и неуравновешенность систем токов, и коэффициентами, численно характеризующими несимметрию и неуравновешенность систем напряжений, существует зависимость.

Для конкретной сети необходимо всякий раз выполнять подробные исследования этой зависимости.

Однако можно утверждать, что значения коэффициентов, характеризующих несимметрию и неуравновешенность системы несимметричных токов, в 3-7 раз больше, чем для системы несимметричных напряжений.

Конкретное значение этого параметра внутри указанного интервала зависит от типа нагрузки (двигательная, смешанная, без двигателей). Поэтому результаты, полученные в данном разделе для системы несимметричных токов, применимы и для системы несимметричных напряжений. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности зависит только от величины междуфазных напряжений.

В случае, когда коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} равен нулю, а коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности k_{0U} не равен нулю, дело имеет с неуравновешенным режимом. Для системы напряжений это означает, что междуфазные напряжения симметричны. Источником является система бесконечно большой мощности. При этом оказываются симметричными и фазные относительно несмещенной нейтрали напряжения. Однако напряжения фаз относительно смещенной нейтрали – несимметричны. Когда $k_{2U} \neq 0$, $k_{0U} = 0$, то режим – уравновешенный, хотя и несимметричный. Нейтраль у системы напряжений в этом случае не смещена, а векторы напряжений фаз, как и междуфазных напряжений, если их векторно сложить образуют соответствующие замкнутые треугольники.

В силу того, что в РФ все сети объединены в ЕЭС, треугольник линейных напряжений является жесткой конструкцией. В то время как система напряжений фаз относительно смещенной нейтрали довольно сильно зависит от несимметрии нагрузок. Этим очевидно и объясняется тот факт, что в обследованных сетях 0,4 кВ республик Адыгея и Калмыкия преобладает нулевая составляющая по отношению к обратной составляющей напряжения.

Когда в системе ортогональных координат для линейных токов имеет место неравенство (25), то модуль их обратной последовательности всегда меньше модуля нулевой последовательности.

Потери мощности и электроэнергии в линии станут меньше, если поменять схему подключения однофазных нагрузок так, что неравенство (2) изменит смысл. В этом случае не нужно использовать симметрирующие устройства.

Когда однофазные нагрузки имеют одинаковый характер, то в этом случае модуль тока прямой последовательности равен среднему значению модулей линейных токов, а КНЗ суть относительные потери активной мощности в ВЛ 0,4 кВ при амплитудной несимметрии линейных токов [2]. Данное утверждение справедливо при условии (27). В этом заключается физический смысл КНЗ.

Чтобы понять, как влияют соотношение сечений нулевого и фазного проводов γ , а также отношение модуля тока обратной последовательности к модулю тока нулевой последовательности α на величину потерь ак-

тивной мощности в радиальной линии, исследуем уравнение (17). Будем считать γ , α переменными величинами, значения КНУ – фиксированными, а КНЗ равным значению относительных потерь активной мощности.

Наиболее широко используются в инженерной практике сети, у которых значение $\gamma=2$, прежде всего это распределительные сети 0,4 кВ промышленных предприятий. Сечение нулевого провода в них в 2 раза меньше сечения фазного провода.

В коммунальных распределительных сетях стали использовать сети, у которых нулевой и фазный провод имеют одинаковое сечение, т.е. $\gamma=1$, а в зарубежной практике при использовании сетей с несущими нулевыми проводами сечение нулевого провода принимают даже в 2 раза больше сечения фазного провода ($\gamma=0,5$).

Если КНУ равен нулю, то $k_3=1$. В этом случае КНЗ не зависит от соотношений сечений нулевого и фазного проводов, а также от отношения КНТ к КНУ. Когда линейные токи симметричны, эти факторы не имеют никакого значения.

Для самого тяжелого случая несимметричного режима, когда вся нагрузка – однофазная и включена в одну из фаз трехфазной сети, $k_0=1$, зависимость КНЗ от α и γ

$$k_3 = 2 + 3\gamma + \alpha^2 \quad (28)$$

представляет собой уравнение поверхности второго порядка.

Уравнение общего вида поверхности второго порядка

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{31}zx + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + 2a_{44} = 0$$

где

$$a_{ik} = a_{ki}; i, k = 1, 2, 3, 4,$$

имеет следующие инварианты, не меняющиеся при переносе начала и повороте координатных осей:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \mathbf{a}_{14} \\ a_{21} & \mathbf{a}_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & \mathbf{a}_{43} & \mathbf{a}_{44} \end{vmatrix}; \quad \delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & \mathbf{a}_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}; \quad S = a_{11} + \mathbf{a}_{22} + a_{33};$$

$$T = \mathbf{a}_{22} a_{33} + a_{33} a_{11} + a_{11} a_{22} - a_{23}^2 - a_{31}^2 - a_{12}^2.$$

Примечание: для уравнения (28) выделены жирно имеющие ненулевые значения члены, остальные члены инвариантов равны 0.

Условие распадаемости поверхности второго порядка на две плоскости для уравнения (28)

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \mathbf{a}_{14} \\ a_{21} & \mathbf{a}_{22} & a_{24} \\ \mathbf{a}_{41} & a_{42} & \mathbf{a}_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} & \mathbf{a}_{14} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \\ \mathbf{a}_{41} & \mathbf{a}_{43} & \mathbf{a}_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{a}_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & \mathbf{a}_{34} \\ a_{42} & \mathbf{a}_{43} & \mathbf{a}_{44} \end{vmatrix} = 0$$

не выполняется: хотя второе слагаемое в матричном уравнении равно 0, первое и третье слагаемые не равны 0. Действительно

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{14}^2 \cdot a_{22} \neq 0; \quad \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = -a_{34}^2 \cdot a_{22} \neq 0.$$

В силу этого, так как $\Delta = 0$; $\delta = 0$; $T = 0$; $S = 1$, уравнение (28) – уравнение параболического цилиндра с осями 0α , 0γ , $0k_3$. Тангенс его угла φ наклона к оси 0γ равен 3. Поскольку γ и α не могут принимать отрицательных значений, то физический смысл имеет лишь полость $a, b, c, 2$ параболического цилиндра, расположенная в первом октанте (рис. 3).

Если $k_0=0,5$, то уравнение (17) примет вид:

$$k_3 = 1,25 + 0,75\gamma + 0,25\alpha^2. \quad (29)$$

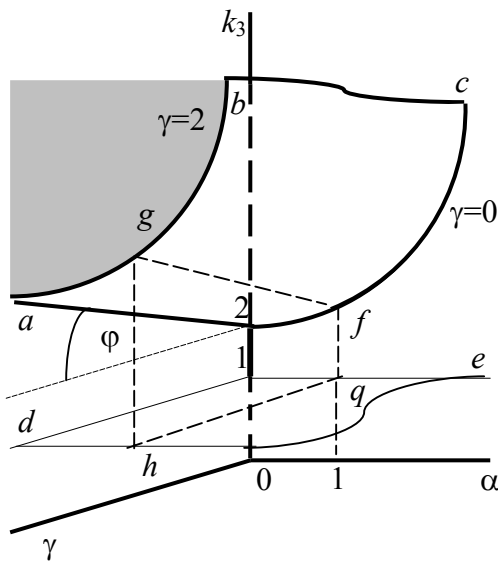


Рис. 3. Зависимость КНЗ от γ и α

Как следует из последнего уравнения параболического цилиндра, тангенс его угла φ наклона к оси 0γ уменьшился и стал равен 1,25. Для симметричного режима условию $k_0=0$ на рис. 3 соответствует часть плоскости $1, d, h, e$, параллельной координатной плоскости $\gamma, 0, \alpha$ и расположенной в первом октанте.

На рис. 3 в пространстве между полостью $a, b, c, 2$ и частью плоскости $d, e, 1$ в первом октанте для фиксированных значений k_0 , в интервале от 0 до 1, располагается множество поверхностей второго порядка (наклоненных к оси 0γ параболических цилиндров).

Полость $a, b, c, 2$ при условии перехода от крайнего случая несимметричного режима (вся нагрузка трехфазной сети включена на одну фазу) к симметричному режиму (нагрузка равномерно распределена между фазами или парами фаз сети) как бы скользит по оси $0k_3$ вниз от $k_3=2$ до $k_3=1$. При этом полости параболических цилиндров становятся все более пологими по мере приближения их к плоскости $d, e, 1$, а тангенс угла φ наклона направляющих параболических цилиндров уменьшается. При $k_0=0$ параболический цилиндр вырождается в плоскость.

Влияние на потери активной мощности соотношений ТОП и ТНП

При подстановке в формулу (28) значений

$$\gamma=2; \quad \gamma=1; \quad \gamma=0,5; \quad \gamma=0 \quad (30)$$

получим соответственно семейство парабол (рис. 4):

$$\left. \begin{aligned} k_3 &= 8 + \alpha^2 ; \\ k_3 &= 5 + \alpha^2 ; \\ k_3 &= 3,5 + \alpha^2 ; \\ k_3 &= 2 + \alpha^2 . \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

На рис. 4 показана зависимость КНЗ от α при фиксированных значениях γ , когда $k_0=1$. Представлены следы на плоскостях, параллельных плоскости $k_3, 0, \alpha$, спроецированные на нее.

Область между отрезками прямой $k_3=1$, параллельной оси абсцисс, и верхней параболы из системы уравнений (31) является областью изменения всех возможных значений КНЗ в зависимости от отношения тока обратной последовательности к току нулевой последовательности α .

Она охватывает все бесконечное множество режимов линейных токов, от симметричного режима до режима, когда вся нагрузка включена в одну из фаз трехфазной сети. С увеличением сечения нулевого провода она сужается. При этом значения γ уменьшаются.

При подстановке в формулу (28) значений из системы (30) получим соответственно семейство парабол:

$$\left. \begin{aligned} k_3 &= 2,75 + 0,25 \alpha^2 ; \\ k_3 &= 2 + 0,25 \alpha^2 ; \\ k_3 &= 1,625 + 0,25 \alpha^2 ; \\ k_3 &= 1,25 + 0,25 \alpha^2 . \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Из рис. 4 и систем уравнений (31) и (32) видно, что относительные потери активной мощности на участке четырехпроводной сети существенно зависят от соотношения ТОП и ТНП. Причем главенствующая роль в этом соотношении принадлежит ТНП.

Влияние сечения нулевого провода на потери активной мощности

При амплитудной несимметрии $k_2=k_0$, поэтому уравнение (8) примет вид

$$k_3 = 1 + (2+3\gamma)k_0^2. \quad (33)$$

Если система линейных токов уравновешена, то

$$k_0 = 0, \text{ а } k_3 = 1. \quad (34)$$

Когда же $k_0=1$ (нагрузка включена на одну фазу), то

$$k_3 = 3(1+\gamma). \quad (35)$$

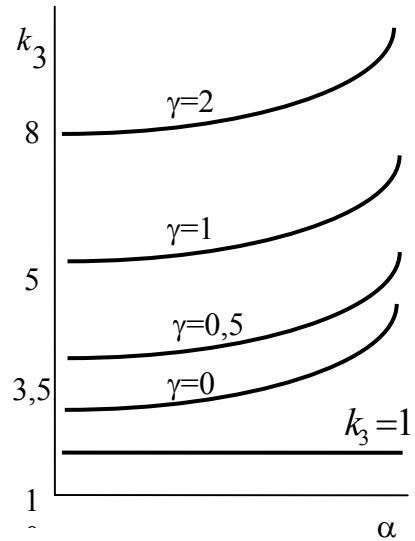


Рис. 4. Зависимость КНЗ от α

Равенство (35) представляет собой уравнение прямой. Если γ изменяется в интервале 0–2, то k_3 – в интервале 3–9. Заштрихованная область между отрезками прямых (35) и (34) на рис. 5 в интервале изменений γ от 0 до 2 представляет собой область всех возможных значений k_3 для соответствующих им значений γ и k_0 . Графики уравнений (34) и (35) являются естественными границами значений k_3 для симметричной нагрузки и предельной несимметричной нагрузки (все однофазные приемники включены на одну фазу) при различных γ . На рис. 5 по оси ординат отложены значения КНЗ, по оси абсцисс – γ . Причем значения $\gamma > 2$ не было смысла брать для рассмотрения в силу требований ПУЭ к нулевым проводам ВЛ 0,4 кВ.

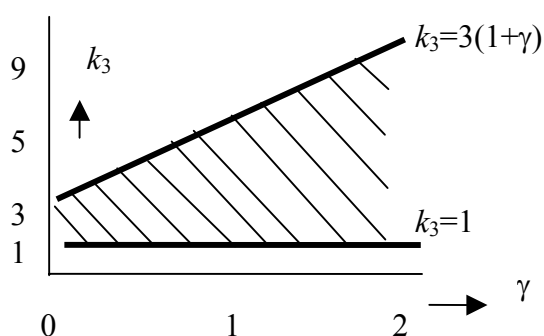


Рис. 5. Зависимость потерь от сечения нулевого провода

Реально сопротивление нулевого провода ВЛ 0,4 кВ не может иметь значение, равное нулю, поэтому у графиков семейства характеристик $k_3(\gamma)$ не показано их пересечение с осью ординат. Тем не менее, можно отметить, что ордината точки пересечения прямой (35) с осью 0γ равна трем, а ордината точки пересечения прямой (34) с осью ординат равна единице.

На рис. 5 рассмотрен случай, когда зафиксировано значение $\alpha=1$, но изменяются значения γ и k_0 . По своей сути, на рис. 5 представлены проекции на координатную плоскость $k_3, 0, \gamma$ следов плоскости f, g, h, q (см. рис. 3) при ее пересечении плоскости $de1$ и полости $a, b, c, 2$ параболического цилиндра.

С уменьшением несимметрии нагрузок наклон отрезков прямых $k_3(\gamma)$ уменьшается пропорционально отношению утроенного значения квадрата модуля тока в нулевом проводе к квадрату суммы линейных токов фаз на головном участке ВЛ 0,4 кВ. Место нахождения отрезков прямых $k_3(\gamma)$ внутри заштрихованной области определяется также величиной квадрата отклонения среднеквадратичного тока фаз на головном участке ВЛ 0,4 кВ к их среднему значению. Чем круче наклон отрезков прямых $k_3(\gamma)$, тем больше абсолютное значение k_3 для одного и того же γ . Поскольку $k_3 \equiv \gamma$, то одним из целесообразных мероприятий по экономии электроэнергии в сетях 0,4 кВ с несимметричными нагрузками следует признать увеличение проводимости нулевых проводов до величины, равной или даже больше, чем у фазных проводов [5, 6]. Например, для предельного случая включения всей нагрузки на одну фазу $k_3=6$ при $\gamma=1$, $k=9$ при $\gamma=2$. В этом случае потери от несимметрии нагрузок (без перераспределения их между фазами) для $\gamma=1$ ($R_F=R_N$) на одну треть меньше, чем для $\gamma=2$ ($R_F=R_N/2$). Естественно, что вывод, сделанный здесь для максимального значения k_0 , можно распространить на всю заштрихованную область в интервале изме-

нения γ от 1 до 2. В проектной практике, как правило, берут сечение нулевого провода ВЛ 0,4 кВ, равным 50 % от сечения фазного провода, а следовательно, $\gamma=2$.

В подавляющем большинстве проектов ВЛ 0,4 кВ сельских сетей предусматривается подвеска голых проводов марок Ап, Апс, сечения которых – 16-35 мм², а средняя протяженность ВЛ 0,4 кВ – 1 км. Разница в стоимости проводов при переходе от одного сечения к следующему большому и стоимость монтажных работ по подвеске 1 км провода примерно одинаковы, а стоимость потерь электроэнергии до замены нулевого провода в полтора раза больше годовых затрат на мероприятия по замене провода на ближайшее большее сечение.

Поэтому уже на стадии проектирования у сельских ВЛ 0,4 кВ следует предусматривать установку нулевого провода такого же сечения, как у фазного. Благодаря незначительной разнице в стоимости проводов, отпадает необходимость иметь два сечения проводов, что является одним из неоспоримых преимуществ при производстве электромонтажных работ.

В работе [1] доказано, что при выполнении основных принципов внутреннего симметрирования однофазных нагрузок можно оптимальным распределением ПЭЭ между фазами сети добиться минимального значения потерь электроэнергии в этой сети. Однако при большом числе однофазных ПЭЭ и случайном процессе их включения и отключения практически выполнимым является только первый принцип – равномерное распределение ПЭЭ между фазами сети. Выполнение только одного из всех принципов внутреннего симметрирования не дает значительного эффекта по снижению потерь в сети 0,4 кВ от несимметрии нагрузок в ней. В этом случае увеличение сечения нулевого провода является гарантированным мероприятием по снижению потерь электроэнергии, вызванных несимметричными однофазными нагрузками.

Определение ТОП в сетях 0,4 кВ на основе ТНП

Если предположить, что в низковольтных сетях с нулевым проводом ТОП и ТНП практически одинаковы, как это считается в работе [3], то, исходя из данной посылки, можно определить ТОП, зная ТНП. Действительно, для этого достаточно измерить ток в нулевом проводе.

На практике токи в нулевых проводах при обследовании сетей 0,4 кВ определяют с помощью токоизмерительных клещей, подавляющее большинство из которых имеет класс точности 4. Погрешность подобных измерений относительно велика. Поэтому для ее уменьшения целесообразно выполнять измерения ТНП, например, с помощью устройства, предлагаемого в работе [7].

Ко вторичным обмоткам серийно выпускаемых трансформаторов тока каждой из трех фаз силовой сети (класс точности их, как правило, не более 0,2) подключают идентичные специальные трансформаторы, у которых первичная обмотка содержит 1-3 витка, а вторичная – такое число

витков, что на ее нагрузочном резисторе, при протекании по первичной обмотке тока 5 А, падение напряжения равно 10 В. С нагрузочных резисторов сигналы, пропорциональные соответственно линейным токам, поступают на вход сумматора, к выходу которого присоединен подстроечный резистор, а последовательно с ним – измерительный прибор, показания которого пропорциональны ТНП.

Существующие способы определения ТОП, как правило, основаны на применении фильтров ТОП, содержащих реактивные элементы и имеющих значительную погрешность при наличии высших гармоник. В силу этого идея измерения ТОП через ТНП весьма заманчива. Задача состоит в том, чтобы разобраться, на сколько отличаются ТОП и ТНП, какова погрешность измерений. Трудность решения в том, что понятий «больше» и «меньше» для комплексных чисел не существует. Условие, при котором ТОП и ТНП в фазе А равны, согласно [7], сводится по существу к равенству токов фаз В и С, когда они представлены в системе ортогональных координат, т.е.

$$I_b e^{j\varphi_b} = I_c e^{j\varphi_c}.$$

Из практических соображений есть смысл рассмотреть случай, когда равны только модули ТНП и ТОП. Он имеет место, когда в выражении (25) правая его часть равна нулю. Неравенство (25) в этом случае заменим уравнением, левая часть которого обращается в нуль, если:

- а) равны между собой фазы линейных токов ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$);
- б) равны фазы токов хотя бы в одной из трех пар: $\varphi_a = \varphi_b$; $\varphi_a = \varphi_c$; $\varphi_b = \varphi_c$;
- с) отсутствует ток в одной из фаз, а углы сдвигов двух других линейных токов к напряжениям своих фаз равны.

В общем же случае абсолютная погрешность измерений ТОП на основе ТНП в фазе А равна [7]:

$$\Delta = 1/\sqrt{3} \sqrt{I_b^2 + I_c^2 - 2I_b I_c \cos(\varphi_b - \varphi_c)}. \quad (36)$$

Из уравнения (36) следует, что модуль абсолютной погрешности измерений ТОП на основе ТНП в фазе А зависит от модулей токов в двух других фазах и от углов сдвигов по отношению к соответствующим напряжениям фаз, но не зависит от тока фазы А, т.е. ток в этой фазе может принимать значения от 0 до тока короткого замыкания.

Положим

$$I_b = \gamma I_c, \quad (37)$$

где γ – относительное значение модуля тока в фазе А в сравнении с модулем тока в фазе С. Из уравнения (36) с учетом обозначения (37) получим, что относительная погрешность (абсолютная погрешность измерений, отнесенная к току в фазе С)

$$\delta = 1/\sqrt{3} \sqrt{\gamma^2 - 2\gamma \cos \alpha + 1}. \quad (38)$$

Здесь

$$\alpha = \varphi_b - \varphi_c.$$

Для фиксированного значения $\cos\alpha$ минимальное значение относительной погрешности измерений δ_{\min} установим, взяв от правой части уравнения (38) первую производную по γ и приравняв ее к нулю. В результате получим

$$\gamma = \cos \alpha. \quad (39)$$

Подставим значение γ из равенства (39) в иррациональное уравнение (38), тогда

$$\delta_{\min} = 1/\sqrt{3} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}. \quad (40)$$

График уравнения (40) представляет собой эллипс с центром в начале координат и с вершинами, имеющими координаты: $(\pm 1, 0)$, $(0, \pm 1/\sqrt{3})$. Смысл имеет только его правая половина, расположенная в первом и четвертом квадрантах, поскольку $\gamma > 1$. Отношение модулей токов фаз В и С не может быть отрицательным. Погрешность измерений может быть как положительной, так и отрицательной, поэтому далее будем вести речь об изменении модуля относительной погрешности.

На рис. 6 приведено семейство зависимостей $\delta(\gamma)$ для различных значений $\cos \alpha$, минимальные значения которых представляют геометрическое место точек, принадлежащих эллипсу (40). Модуль относительной погрешности тем больше, чем больше разность углов сдвига токов в фазах В и С по отношению к напряжению этих фаз. Соотношение модулей линейных токов в фазах В и С неоднозначно влияет на модуль относительной погрешности. Он равен нулю только в одном случае, когда $\cos \alpha = 1$, $\gamma = 1$. Это значит, что токи в фазах В и С должны быть равны по модулю и иметь одинаковые углы сдвигов по отношению к напряжениям соответствующих фаз. В силу симметрии ТОП, хотя ТНП одинаковы для трех фаз, выводы сделанные для фазы А, справедливы и для других двух фаз. В уравнении (36) изменятся лишь индексы.

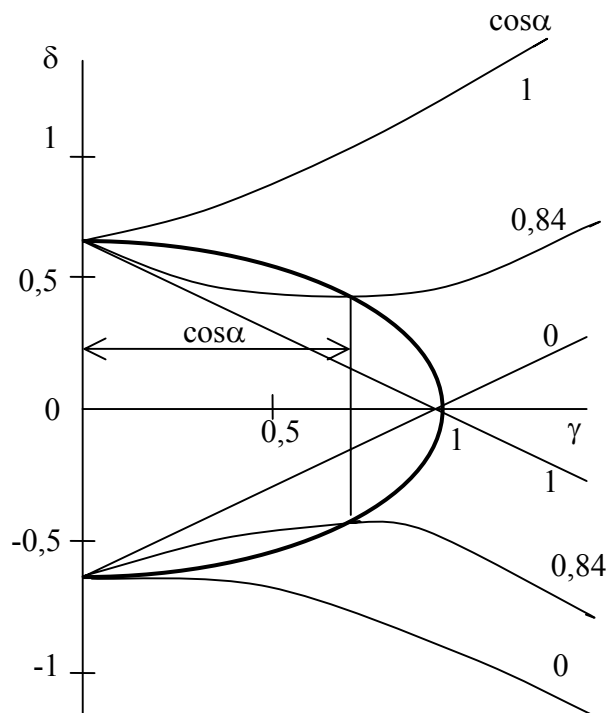


Рис. 6. Зависимость погрешности определения ТОП на основе ТНП

Если в сети 0,4 кВ с нулевым проводом режим работы только одной фазы отличается от режима двух других фаз, то возможна реализация идеи измерения ТОП через ТНП. При этом методическая погрешность будет равна нулю. Этот вывод следует уже непосредственно из условия, при котором комплексные ТОП и ТНП в фазе А равны.

Однако исследование случая, когда равны только их модули, а также исследование модулей абсолютной и относительной погрешностей измерений ТОП на основе ТНП позволили полнее рассмотреть возможности реализации затрагиваемой проблемы. В частности, модули ТОП и ТНП оказываются равными при амплитудной несимметрии токов, а также если равны фазы углов хотя бы двух токов любых фаз или одна из фаз не загружена, а углы сдвигов токов двух других фаз равны. Кроме того, эти исследования позволяют количественно оценить погрешность измерений, минимизировать ее.

Реализация идеи измерения ТОП одной из фаз сети с помощью ТНП принципиально возможна с учетом поправок согласно уравнению (36) с использованием программируемых контроллеров. При непосредственном использовании формулы (36) необходимо знать модули токов двух фаз и угол сдвига между ними. Как известно, инструментальная погрешность измерения углов на порядок выше, чем при измерении токов, что, как кажется на первый взгляд, ставит под сомнение решение затрагиваемой проблемы в общем случае. Для частных же случаев, отмеченных выше, определение ТОП на основе ТНП имеет реальную основу. При внимательном рассмотрении выражения под знаком радикала в правой части формулы (36) видим, что удвоенное произведение модулей токов двух фаз умножается на косинус угла между ними, т.е. дело имеем со скалярным произведением токов. Если токи задать в ортогональной системе координат, то их скалярное произведение можно определить как сумму попарно взятых произведений соответственно активных и реактивных составляющих токов двух фаз.

Литература

1. Троицкий А.И. Математическая модель потерь воздушной магистральной линии с несимметричной нагрузкой // Моделирование. Теория, методы и средства: Матер. междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 11 апр. 2001 г.: В 8 ч. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: Набл, 2001. – Ч. 5. – С. 7-11.
2. Троицкий А.И. Уравновешивание токов нулевой последовательности: Монография / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 170 с.
3. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
4. Троицкий А.И. Расчет коэффициента неравномерности загрузки фаз в сельских воздушных линиях электропередачи при несимметричной нагрузке // Изв. вузов. Электромеханика. – 1991. – № 7. – С. 105-108.
5. Троицкий А.И. О методической погрешности определения коэффициента неравномерности загрузки фаз // Изв. вузов. Электромеханика. – 2001. – № 2. – С. 73-75.
6. Троицкий А.И. Об увеличении проводимости нулевого провода в сельских сетях 0,4 кВ // Изв. вузов. Энергетика. – 1991. – № 1. – С. 78-88.
7. Троицкий А.И. Об определении в низковольтных сетях с нулевым проводом токов обратной последовательности на основе токов нулевой последовательности // Изв. вузов. Энергетика. – 1991. – № 8. – С. 21-25.

АНАЛИЗ РАНГОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

И.И. Надтока, С.Ю. Березкина

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Приведены результаты анализа потребления энергоресурсов в промышленности Ростовской области. Для моделирования структурных изменений в составе потребителей энергоресурсов использованы методы теории техноценозов. Показана взаимосвязь параметров кривых ранговых распределений и структурных изменений в промышленности области.

В соответствии с постановлением главы администрации Ростовской области в ЮРГТУ (НПИ) ведется работа по формированию информационного обеспечения информационно-аналитической системы (ИАС) по энергопотреблению и энергосбережению в Ростовской области. Одной из компонент информационного обеспечения ИАС являются статистические данные по потреблению электроэнергии, тепла, топлива и воды промышленными предприятиями области. В базе данных ИАС накоплена информация о потреблении энергоресурсов и воды, начиная с 1991 года. Объем статистической выборки составляет от 350 до 500 предприятий за год. В выборку попадают предприятия с установленной мощностью свыше 750 кВА.

За период с 1991 по 2004 годы в области происходили структурные изменения в экономике, что отразилось на потреблении энергоресурсов и воды предприятиями. Учитывая тот факт, что потребление энергоресурсов является одним из наиболее объективных и достоверных параметров, характеризующих работу предприятия, анализ структурных изменений в промышленности области можно проводить по данным годового энергопотребления.

Одним из методов анализа и моделирования структуры больших технических систем являются методы теории техноценозов проф. Б.И. Кудрина [1], которые применены в данной работе для анализа статистических данных. Основой указанного метода является представление статистических данных в виде ранговых распределений.

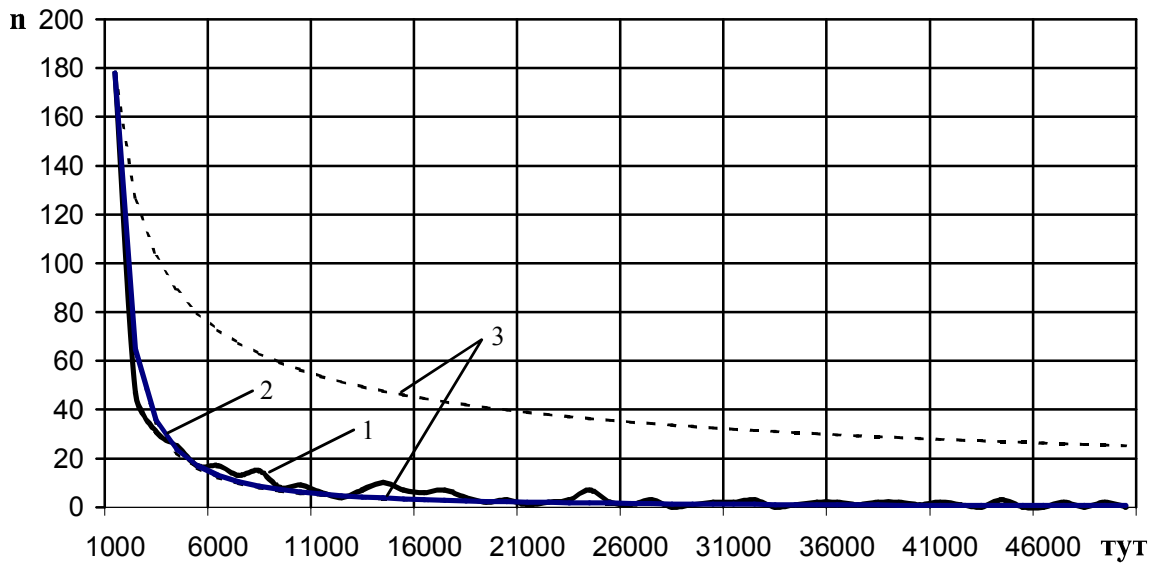
На рис. 1 показаны распределения предприятий по диапазонам годового энергопотребления за 1991 и 1999 годы, в которых диапазон (ранг) равен $\Delta W = 1000$ тонн условного топлива (тут) (кривые 1).

В соответствии с [1, 2] статистические распределения моделировались кривой рангового распределения вида:

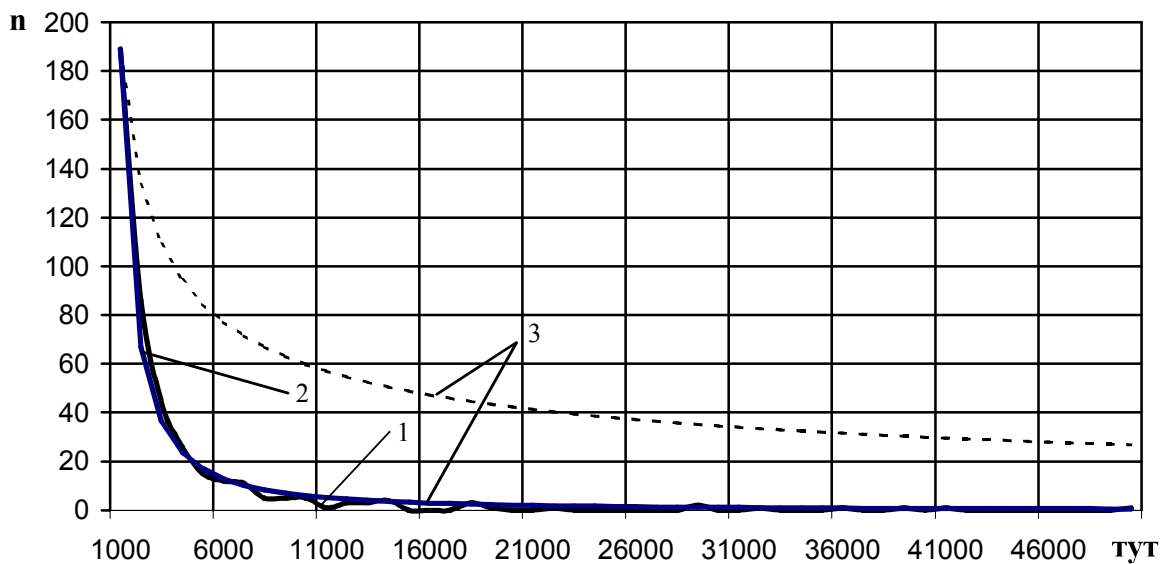
$$H(W) = \frac{n_1}{W^\alpha},$$

где n_1 – количество предприятий, имеющих годовое энергопотребление в диапазоне первого ранга, т.е. от 0 до 1000 тут; α – параметр распределения, получаемый по методу наименьших квадратов.

За указанный период параметр рангового распределения изменился от $\alpha = 1,46$ в 1991 году до $\alpha = 1,5$ в 1999 году.



а)



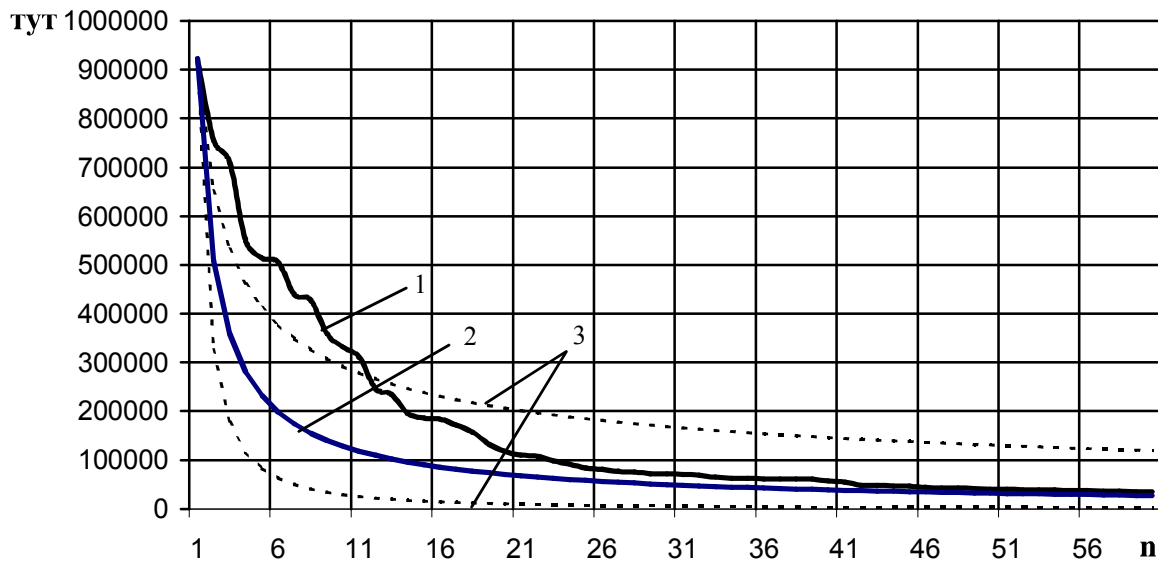
б)

Рис. 1. Ранговое распределение количества предприятий по диапазонам энергопотребления: а — за 1991 г.; б — за 1999 г.; 1 — статистические данные; 2 — теоретическая кривая; 3 — границы рангового распределения для $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 1,5$

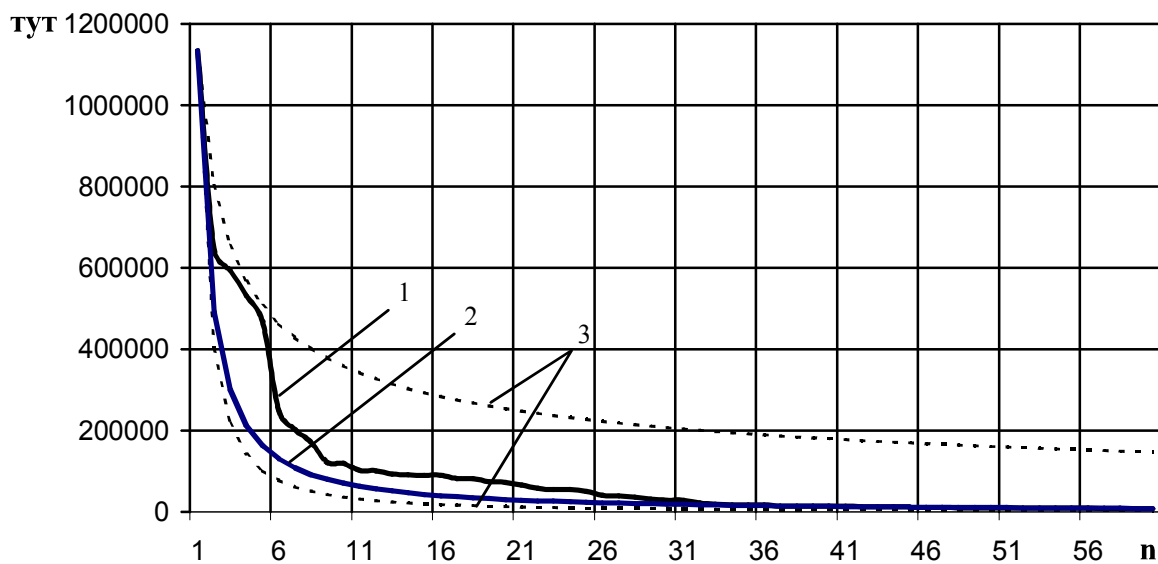
На рис. 2 приведены ранговые распределения предприятий, в которых рангом является номер предприятия в ряду, упорядоченном по объему годового энергопотребления

$$H(r) = \frac{W_1}{r^\alpha},$$

где W_1 — энергопотребление предприятия с рангом $r = 1$, т.е. предприятия, имеющего наибольшее годовое энергопотребление.



а)



б)

Рис. 2. Ранговое распределение предприятий по убыванию энергопотребления:
 а – за 1991 г.; б – 1999 г.; 1 – статистические данные; 2 – теоретическая кривая;
 3 – границы рангового распределения для $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 1,5$

Анализ ранговых распределений, показанных на рис. 1, 2, за период с 1991 по 1999 годы показывает влияние структурных изменений в экономике на структуру техноценоза, представляющего совокупность промышленных предприятий области. Так, например, характеристический параметр рангового распределения α в распределении $H(r)$ имеет резкие изменения в 1994 году (после событий октября 1993 года) и в 1998 году (дефолт).

Таким образом, анализ параметров ранговых распределений позволяет делать выводы о происшедших изменениях в структуре техноценоза и прогнозировать дальнейшее развитие системы. Кроме этого, по данным параметрам можно оценивать устойчивость больших технических систем

(техноценозов по [1-3]). Тот факт, что статистические распределения $H^*(W)$ за период с 1991 по 1999 годы находятся в диапазонах, ограниченных теоретическими кривыми $H(W)$ с характеристическими параметрами $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 1,5$, говорит об устойчивости техноценоза, представляющего собой совокупность обследованных промышленных предприятий Ростовской области.

На рис. 2 кривая статистического распределения $H^*(r)$ за 1991 год (кривая 1 на рис. 2,а) выходит из диапазона $\alpha = 0,5 \div 1,5$, а в 1999 году находится в пределах данного диапазона, что свидетельствует о переходе в устойчивое состояние техноценоза к 1999 году.

Литература

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. – Томск: Издание ТГУ, 1993. – 552 с.
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. – Калининград: КВИ ФПС РФ – ЗНЦ НТ РАЕН, 2003.
3. Ценологическое определения параметров электропотребления многономенклатурных производств / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин, О.Е. Лагуткин, М.Г. Ошурков. – Тула: Приокское книжное изд-во, 1994. – 123 с.

УДК 621.311

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХРОМАТОГРАФИИ

В.М. Левин, О.В. Емельянов

Новосибирский государственный технический университет

Предложен подход к построению модели индикации дефектов в силовых масляных трансформаторах, основанный на применении теории классификации и распознавания образов. Информационной средой задачи являются данные хроматографического анализа растворенных в масле газов. В качестве исходных диагностических признаков использованы относительные концентрации измеренных газов. Полученная модель позволяет облегчить процедуру индикации дефектов, а также повысить достоверность оценки текущего состояния трансформатора в пространстве диагностических признаков.

Введение. Опыт применения в электроэнергетике метода хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов (ХАРГ), подтверждает его высокую информативность для упреждающего диагностирования. Как правило, оценка текущего состояния трансформатора производится по измеренным значениям концентраций диагностических газов и их нормативам. Высокая частота применения метода (два раза в год) позволяет формировать представительные выборки данных, содержащие ценную для диагностики информацию по отдельно взятому трансформатору, их группе и в целом по энергопредприятию. Однако в практике эксплуатации данная информация слабо востребована либо вовсе не используется. Отчасти это связано с недостаточным развитием

моделей и методик, формализующих процедуру втягивания данной информации в процесс формирования диагноза. В связи с этим отмечается необходимость совершенствования моделей, использующих статистическую информацию, и в частности, модели нормально работающего (бездефектного) трансформатора.

Разработка подобных моделей в особенности актуальна для решения задачи индикации дефектов силовых масляных трансформаторов (СМТ), срок эксплуатации которых приближается или превысил нормативный. Индикация дефектов СМТ в рабочих режимах (без отключения под рабочим напряжением) позволит сократить количество единиц оборудования, направляемого на учащенный контроль и комплексное диагностическое обследование, а следовательно, уменьшить эксплуатационные издержки энергопредприятия.

Особенности индикации дефектов СМТ по результатам ХАРГ. Хроматографический анализ растворенных в масле газов является одним из основных методов оценки состояния СМТ. Методика этой оценки изложена в [1] и рекомендует определять трансформаторы с возможными развивающимися дефектами по критерию граничных концентраций:

$A_i < A_{ГРi}$ – нет данных о наличии развивающегося дефекта;

$A_i > A_{ГРi}$ – возможно наличие развивающегося дефекта, ($i=1,...,n$).

Здесь A_i (%об) – измеренная концентрация i -го газа, выделяемого из пробы масла; $A_{ГРi}$ (%об) – граничная концентрация i -го газа; n – количество выделяемых газов (как правило, $n = 7$).

Рядом исследований [2, 3] обращается внимание на определенную степень нечеткости в оценке состояний по ХАРГ. Причины этого отчасти связаны с использованием некорректных значений некоторых граничных концентраций, а также со сложностью учета большего числа внешних факторов, оказывающих влияние на условия эксплуатации конкретного объекта.

Различают следующие исходы при оценке состояния СМТ по ХАРГ (таблица).

Таблица

Возможные исходы при оценке состояния СМТ

Состояние СМТ	$A_i > A_{ГРi}$	Наличие дефекта
C_1	Нет	Нет
C_2	Да	Нет
C_3	Нет	Да
C_4	Да	Да

Очевидно, особый интерес для исследования представляют два возможных исхода C_2 и C_3 , которые фактически и формируют ошибку диагноза.

Таким образом, для минимизации ошибки диагноза необходимо свести к минимуму вероятности появления исходов C_2 и C_3 при индикации дефектов по имеющейся информации об измеренных концентрациях диагностических газов.

Формализация задачи распознавания образов. Формализация задачи распознавания образов основывается на объективно существующей общности свойств объектов одного и того же класса, часто определяемой термином «сходство» [4].

Под классом будем понимать множество объектов (параметров), объединяемых некоторым общим свойством. Интуитивное ассоциирование терминов «сходство» и «близость» приводит к предположению о правомерности сопоставления степени сходства объектов со степенью близости некоторых их параметров, называемых признаками. Такое предположение позволяет описывать объекты, подлежащие классификации, набором признаков, характеризующих эти объекты.

В геометрической постановке задачи распознавания образов каждый объект A может быть представлен вектором X в d -мерном евклидовом пространстве. Декартовы координаты конца вектора есть действительные числа x_1, x_2, \dots, x_d , являющиеся признаками объекта A . Совокупность действительных чисел x_k ($k=1, \dots, d$) иногда называют входным описанием объекта.

Таким образом, множеству входных описаний (иначе, множеству наборов признаков) вводится в соответствие множество векторов в d -мерном пространстве признаков, причем множество точек концов векторов, соответствующих объектам j -го класса, образуют область C_j ($j=1, \dots, N$), где N – число различаемых классов.

Обычно в теории распознавания образов о совокупности точек, принадлежащих одному классу, высказывается гипотеза компактности [4], то есть гипотеза о включении всех объектов каждого класса в одно подмножество, состоящее из конечного числа связанных областей. Таким образом, гипотеза о компактности предполагает адекватность терминов «сходства» объектов одного класса и их «геометрической близости», проявляющейся в объединении их в одно связанное подмножество в пространстве признаков.

При таком подходе задача распознавания образов в детерминистской постановке может быть сведена к разбиению пространства признаков на ряд областей, каждая из которых содержит точки, принадлежащие только одному классу объектов.

Произвести разбиение пространства признаков означает: тем или иным способом построить совокупность поверхностей, разделяющих области смежных классов. Разделяющие поверхности могут быть полностью определены N дискриминантными функциями: $G_1(X), G_2(X), \dots, G_N(X)$, которые выбираются таким образом, чтобы для любого, предъявляемого к распознаванию объекта $A \in \{A_j\}$, где $\{A_j\}$ – множество объектов j -го класса, выполнялось неравенство

$$G_j(X) > G_v(X); \quad j, v = 1, 2, \dots, N; \quad j \neq v.$$

Тогда поверхность, разделяющая области C_j и C_v , описывается уравнением:

$$S(X) = G_j(X) - G_v(X) = 0.$$

В общем случае дискриминантные функции, а следовательно, и уравнения разделяющих поверхностей, могут быть произвольного вида, однако для линейно разделяемых подмножеств можно ограничиться рассмотрением линейных дискриминантных функций вида

$$G(X) = WX + w_0 = \sum_{k=1}^d w_k x_k + w_0, \quad (1)$$

где X – вектор признаков с координатами x_1, x_2, \dots, x_d ; W – весовой вектор с координатами w_1, w_2, \dots, w_d ; w_0 – скаляр (обычно рассматривается как $(d+1)$ -я компонента весового вектора); WX – скалярное произведение векторов.

При этом граница раздела есть гиперплоскость, определяемая уравнением

$$S(X) = \sum_{k=1}^d (w_{kj} - w_{kv}) x_k + (w_{0j} - w_{0v}) = 0.$$

Если распознаванию подлежат только объекты двух классов ($N=2$), то классификацию объектов удобно производить по знаку разделяющей функции

$$S(X) = G_1(X) - G_2(X).$$

При этом решающее правило имеет простой вид:

$$\begin{aligned} A &\in \{A_1\}, \text{ если } S(X) > 0 \\ A &\in \{A_2\}, \text{ если } S(X) < 0. \end{aligned}$$

Таким образом, задача синтеза процедуры классификации заключается в построении по некоторому алгоритму разделяющей поверхности, которая удовлетворяет системе указанных неравенств.

Статистическая модель индикации дефектов в СМТ. В общем случае процедура классификации в многомерном пространстве признаков представляется весьма сложной, а результат не гарантирует исключения указанных ошибок распознавания. Поэтому, используя возможности теоретической базы, следует произвести преобразование многомерного пространства признаков в двумерное пространство состояний объекта, то есть фактически на плоскость.

Поскольку задача индикации дефектов в СМТ требует различения двух классов состояний, условно разделим все множество возможных состояний силового трансформатора на два подмножества: Π_1 (класс нормальных состояний) и Π_2 (класс состояний с отклонениями от нормы).

Каждая точка исходного пространства признаков представляет собой вектор A , компонентами которого являются относительные концентрации диагностических газов

$$a_i = A_i / A_{\text{ГР}i} \quad (i = 1, \dots, 7).$$

В данном случае компоненты вектора признаков характеризуются одинаковой размерностью и информативностью, так как представляют собой результаты единичных измерений соответствующих концентраций газов, выделенных из масляной пробы.

Входным описанием объектов при построении модели является статистика по измеренным концентрациям диагностических газов для группы (98 единиц) однотипных трансформаторов 110 кВ одного из электросетевых предприятий за 8 лет их эксплуатации. В данную группу входят СМТ номинальной мощностью от 10 до 40 МВА и различного возрастного состава. На диаграмме (рис. 1) показан возрастной состав трансформаторов исследуемой группы.

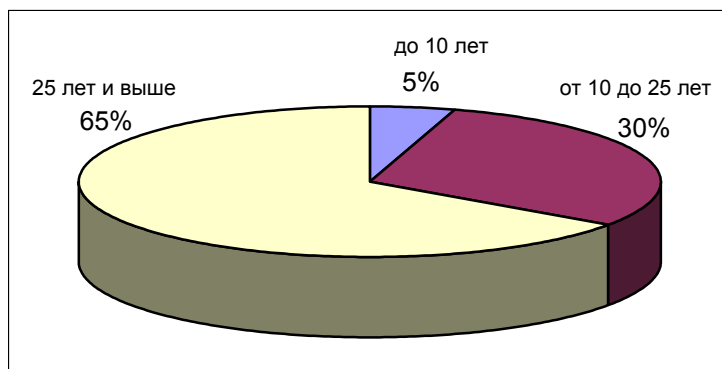


Рис. 1. Возрастной состав СМТ исследуемой группы

В результате предварительной экспертизы исходная выборка была скорректирована. Из нее исключались измерения, достоверность результатов которых подвергалась сомнению. Полученная выборка удовлетворяла основным требованиям – однородности и представительности.

Взаимно-однозначное соответствие d -мерного пространства признаков и плоскости состояний СМТ достигается введением дискриминантной (весовой) функции вида (1):

$$G(A) = WA + w_0 = \sum_{k=1}^d w_k a_k + w_0. \quad (2)$$

Здесь w_i – вес i -го диагностического газа, определяемый как отношение его концентрации к сумме концентраций всех выделенных из пробы газов; $w_0 = 0$.

В данном случае поверхность, разделяющая области Π_1 и Π_2 , описывается уравнением:

$$S(A) = G_{\Pi_1}(A) - G_{\Pi_2}(A) = 0. \quad (3)$$

При этом решающее правило имеет следующий вид:

$$A \in \{\Pi_1\}, \text{ если } S(A) < 0$$

$$A \in \{\Pi_2\}, \text{ если } S(A) > 0.$$

Области различных классов Π_1 и Π_2 в пространстве признаков, согласно [1], являются не пересекающимися (рис. 2.). Это должно обеспечивать однозначность диагноза (отнесения текущего состояния трансформатора к одному из классов). В действительности нечеткость оценки состояния трансформаторов наблюдается в пограничной зоне классов (при значениях признака a_i , близких к единице). При этом возрастает вероятность

принятия ошибочного решения (ложного пропуска дефекта либо ложного определения дефекта при его отсутствии).

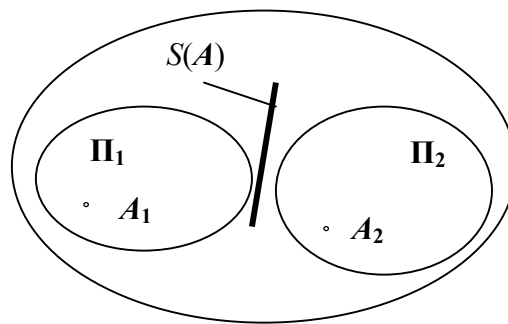


Рис. 2. Множество классов в пространстве признаков дефектов СМТ

В целях снижения вероятности ложного диагноза и минимизации связанного с этим риска в работе проведен статистический анализ случайной величины $G(A)$, рассчитанной для скорректированной выборки данных. Получены оценки статистических моментов распределения $G(A)$, а также эмпирические функции и плотности распределения случайной величины отдельно для подмножеств Π_1 и Π_2 . Так, например, установлено, что распределение $G(A)$ в подмножестве Π_1 может быть описано законом, близким к нормальному, с математическим ожиданием $M_G = 0,3495$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_G = 0,1546$. Значительно сложнее подобрать определенный закон для распределения $G(A)$ в подмножестве Π_2 . На рис. 3 изображена корреляционная зависимость весовой функции G от максимального выборочного значения признака $a_{i \max}$, по которой возможно оценить степень соответствия исходного и полученного критериев индикации дефектов СМТ.

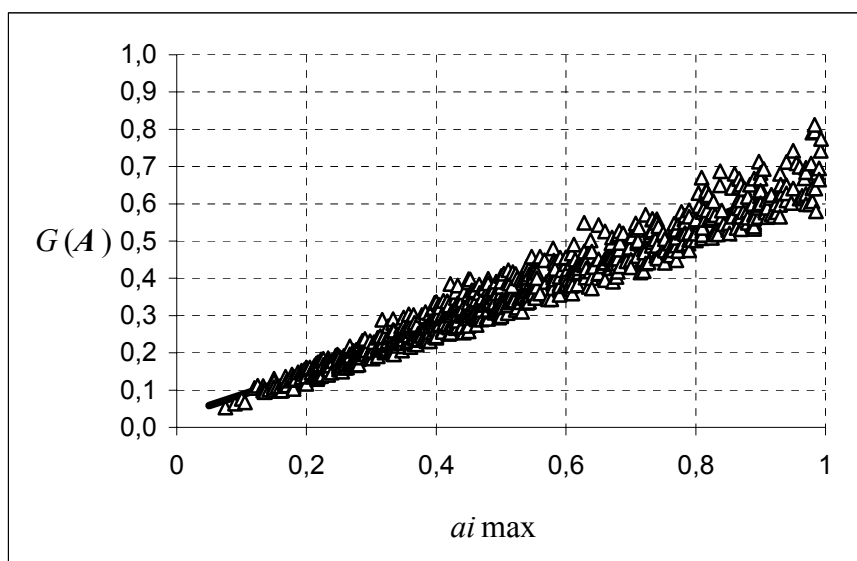


Рис. 3. Корреляционная зависимость весовой функции $G(A)$ от максимального значения признака $a_{i \max}$

Анализ показал, что интервалы изменений $G(A)$ для Π_1 и Π_2 накладываются один на другой, образуя достаточно узкую общую зону, характеризующую возможную ошибку диагноза (рис. 4). Статистически с доверительной вероятностью 0,97 определено граничное значение весовой функции $G_{\text{ГР}}(A) = M_G + 2 \cdot \sigma_G = 0,66$, соответствующее условию (3) перехода трансформатора из класса нормальных состояний Π_1 в класс состояний с отклонением от нормы Π_2 (рис. 5).

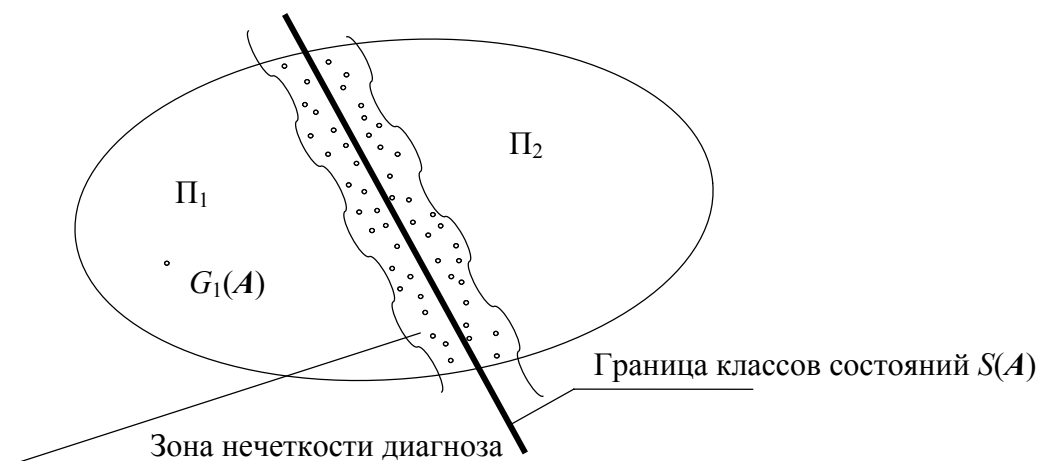


Рис. 4. Области классов на плоскости состояния СМТ

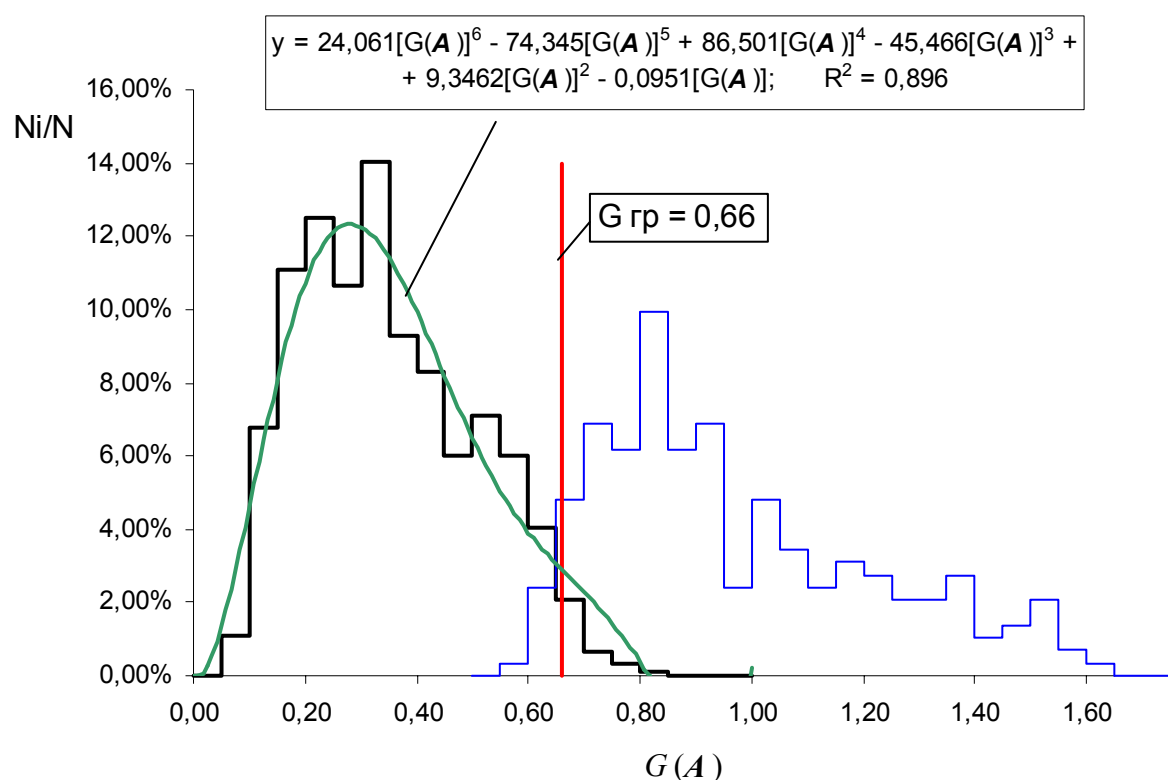


Рис. 5. Эмпирическая функция распределения $G(A)$

Верификация полученной модели по ретроспективной информации подтвердила, что вероятность возможной ошибки диагноза для рассмотренной группы оборудования не превышает 3 %.

Таким образом, если для текущего измерения концентраций диагностических газов по результатам ХАРГ $G(A) < G_{гр} (S(A) < 0)$, то состояние трансформатора следует отнести к классу нормально работающих (бездефектных) и проводить очередной контроль по графику, то есть через 6 месяцев. В противном случае трансформатор необходимо взять под контроль с последующим учащенным отбором проб масла для ХАРГ и формированием нового диагноза.

Выводы:

1. Получена статистическая модель для индикации дефектов СМТ по данным ХАРГ, основанная на методах теории классификации и распознавания образов.

2. Применение разработанной модели повышает эффективность процедуры индикации дефектов СМТ по ХАРГ и позволяет уменьшить вероятность ложного диагноза.

3. Предложенный подход может быть использован для построения подобного класса моделей применительно к другим типам маслonaполненного оборудования, например вводам ВН.

Литература

1. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РД 153-34.0-46.302-00. – М.: АО ВНИИЭ, 2001. – 41 с.
2. Давиденко В.И., Комаров В.И. Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов // ЭЛЕКТРО. – 2003. – № 1. – С. 37-41.
3. Попов Г.В. Об оценке состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа // ЭЛЕКТРО. – 2003. – № 3. – С. 36-40.
4. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов – М.: Наука, 1974. – 415 с.

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, т. (3832)461362,
e-mail: Levin@dfen.power.nstu.ru.

УДК 62-835(06)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Е.В. Крутиков

Шахтинский институт Южно-Российского государственного технического университета
(Новочеркасского политехнического института)

Рассмотрена роль уравнения нестационарной диффузии в моделировании химических источников тока, оговариваются условия применения уравнения. Применен математический пакет Matlab для численного расчета такого уравнения при заданных граничных и начальных условиях.

Моделирование, как инструмент изучения различных явлений, занимает прочное место в методике исследовательской работы. Построение адекватной реальности модели требует знаний не только методов моделирования, но и собственно моделируемого явления, в силу чего отдельные модели, разработанные специалистами в той или иной области, ограничены некоторой областью тех или иных физических явлений. Однако реальные технические системы часто содержат в своем составе элементы различной физической природы. В таких случаях требуется состыковка неаналогичных в принципе моделей для получения адекватного модельного описания рассматриваемой системы. Такова ситуация для систем тягового электропривода с автономным питанием, где полная модель содержит описание электропривода, химического источника тока и, при системном рассмотрении, характера нагрузки. В такой постановке наиболее сложным элементом модели является химический источник тока. Попытки аналитического описания отдельных стадий работы аккумуляторов относятся к началу XX века [1], но и до последнего времени в периодической печати публикуются работы по моделированию аккумуляторных батарей. Полное системное описание работы аккумуляторной батареи на основе макрооднородной модели пористого электрода выполнено в работе [2]. Как в классическом подходе, где аналитически исследуются отдельные стадии работы химического источника тока, так и в модельном подходе одну из ключевых позиций занимает анализ диффузионных процессов, имеющих место в объеме электролита, у поверхности электрода, в глубине пористого электрода.

Аналитическое описание диффузионных явлений выполняется первым и вторым законами Фика, второй из которых также называют уравнением нестационарной диффузии. В одномерной постановке эти законы выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$N = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x},$$

где D – коэффициент диффузии; N – поток частиц; c – концентрация частиц; t – время; x – координата по оси, перпендикулярной площадке, через которую проходит диффузионный поток.

Решение уравнения (1) дает полное описание концентрационного поля на рассматриваемом участке пространства для любого момента времени. Вид решения зависит от типа граничных и начальных условий. Аналитические решения уравнения (1) выполнены для различных начальных и граничных условий еще в начале прошлого века в приложении к задачам электрохимической кинетики Ф. Коттреллом для потенциостатических условий, Ф. Крюгером и Е. Варбургом при прохождении синусоидального тока, Х. Вебером для гальваностатических условий при отсутствии конвекции, У. Лоренцем для поверхностной диффузии при кристаллизации атомов и другими авторами [1].

Вебер и Занд интегрировали уравнение (1) при граничных условиях:

$$\frac{i \cdot \nu_j}{n \cdot F} = -D_j \cdot \left(\frac{\partial c_j}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \text{и} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} c_j(x, t) = \bar{c}_j,$$

где F – число Фарадея
и при начальном условии:

$$c_j(x, 0) = \bar{c}_j,$$

где i – ток, проходящий через систему электрод-раствор; ν_j – стехиометрический коэффициент j -го компонента электрохимической, последующей или предшествующей химических реакций; n – валентность электрохимической реакции; D_j – коэффициент диффузии j -го компонента; c_j – текущее значение концентрации; \bar{c}_j – значение концентрации j -го компонента на бесконечно удаленном расстоянии от электрода.

Результатом интегрирования по Занду для обеднения раствора j -й компонентой у поверхности электрода является уравнение [1]:

$$c_j(x, t) = \bar{c}_j - \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D_j}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4D_j t}} \cdot dt.$$

Тогда для концентрации на левой границе $x = 0$ получаем:

$$c_j(0, t) = \bar{c}_j - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{i \cdot \nu_j}{n \cdot F \cdot \sqrt{D_j}} \cdot \sqrt{t},$$

и картина изменения концентрации с течением времени на поверхности электрода показана на рис. 1.

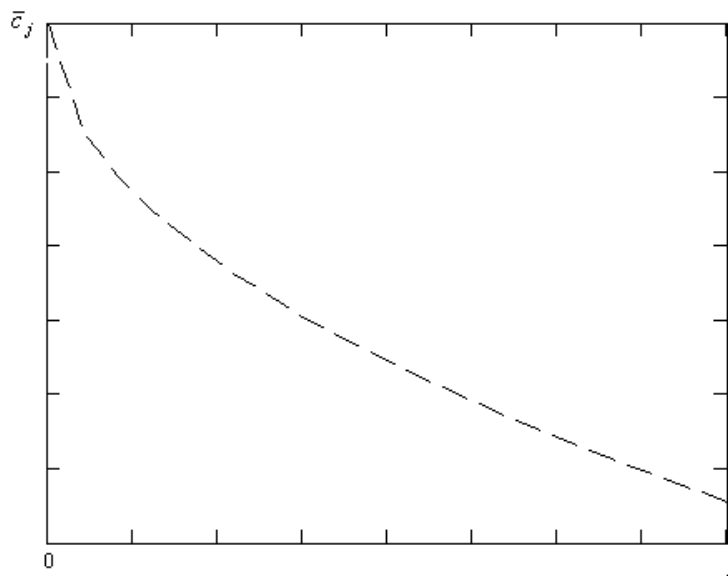


Рис. 1. Величина концентрации компонента на поверхности электрода как функция времени

Та же задача для синусоидального тока аналитически была решена Варбургом и Крюгером при граничных условиях:

$$\frac{I \cdot v_j}{n \cdot F} \cdot \sin(\omega t) = -D_j \cdot \left(\frac{\partial c_j}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \text{и} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} c_j(x, t) = \bar{c}_j,$$

где I – амплитудное значение тока; ω – циклическая частота.

Начальное условие остается без изменений. В качестве решения уравнения (1) при таких граничных условиях Крюгер получил уравнение концентрационной волны:

$$c_j(x, t) = \bar{c}_j + \frac{I \cdot v_j}{n \cdot F \cdot \sqrt{D_j \cdot \omega}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}} \cdot x} \cdot \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \cdot x - \frac{\pi}{4}\right).$$

Величина перенапряжения диффузии, определяемая из уравнения Нернста по величине концентрации $c_j(0, t)$, меняется во времени синусоидально. Далее при допущении малости амплитуды концентрационной волны по сравнению с величиной концентрации в объеме раствора $\Delta c_j \ll \bar{c}_j$ с хорошим приближением дается формула

$$\eta_d = \frac{I \cdot R \cdot T \cdot v_j^2}{n^2 \cdot F^2 \cdot \bar{c}_j \cdot \sqrt{D_j \cdot \omega}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right).$$

Как видно из данной формулы, перенапряжение диффузии не содержит постоянной составляющей, что, однако, становится несправедливым для концентрационной волны с амплитудой, меньшей на порядок или сопоставимой с величиной концентрации в объеме.

Как показано в работе [2], уравнение (1) с позиций макрооднородной модели пористого электрода может быть применено для расчета распределения электрохимического процесса, в результате которого происходит заряд, по глубине пористого электрода. Уравнение (1) применительно к поляризации асимметричным переменным током решалось относительно напряжения поляризации, вызванной замедленным транспортом ионов в глубину пористого электрода. Найденное для некоторых начальных и граничных условий аналитическое решение использовалось для определения потока компоненты электрохимической реакции, образующейся при заряде, по глубине электрода.

Таким образом, по результатам работ [1, 2] можно сделать вывод о востребованности уравнения (1) как в задачах, связанных с определением поляризации диффузии на гладком электроде, так и для изучения процессов распределения в пористом электроде.

На современном этапе с развитием полупроводниковых приборов, в том числе и силовых, широким распространением электроприводов с импульсным регулированием скорости, получающих питание от аккумуляторной батареи, актуальным становится вопрос изучения особенностей работы химического источника тока при его импульсном разряде и заряде, в частности, для режимов тяги и рекуперативного торможения в тяговых электроприводах с импульсным регулированием. Рассмотрение физико-химических процессов в аккумуляторе даже в простейшем случае при на-

личии лишь одного вида поляризации и отсутствии конкурирующих электрохимических реакций аналитически весьма сложная задача. Однако современный уровень развития вычислительной техники позволяет получать решение уравнения (1) численными методами. Возможно нахождение решения для самых различных граничных условий, в том числе и для задаваемых импульсными режимами работы.

Исходными данными для численного решения уравнения (1) в большинстве математических пакетов, работающих на базе персонального компьютера, являются само уравнение (1), граничные и начальные условия, представленные в соответствующей форме. Для анализа импульсных режимов работы аккумулятора необходима аналитическая формулировка для величины импульсного тока, подставляемая в граничное условие. Силовые импульсные последовательности для их аналитической записи требуют разложения в ряд (обычно по Фурье), первых нескольких членов которого вполне достаточно для аналоговой формулировки импульсной последовательности.

Численное решение уравнения (1) для прямоугольной импульсной последовательности частотой 500 Гц и с коэффициентом заполнения 0,5 было выполнено в среде Matlab 6, его результаты приведены в виде концентрационного поля по осям времени и координате по оси, нормальной к поверхности электрода (рис. 2).

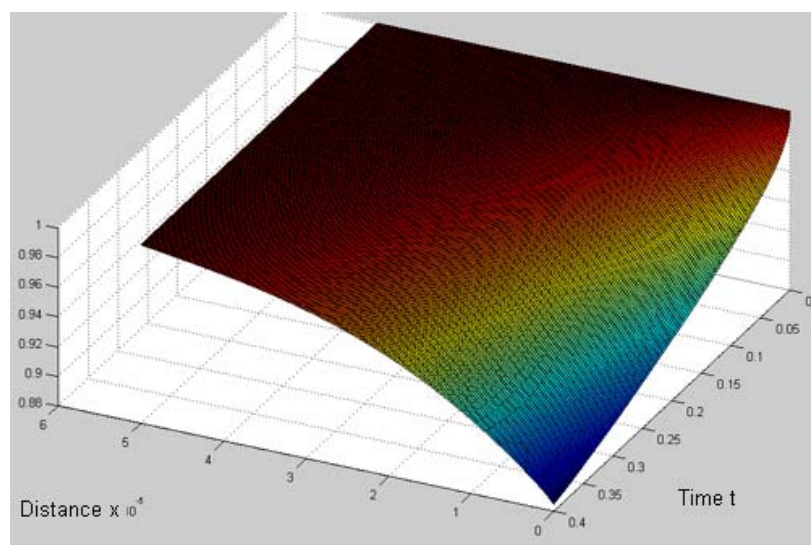


Рис. 2. Концентрационное поле вблизи электрода в осях времени и координаты по нормали к электроду

Допущения, сделанные при расчете следующие:

- 1) электрод – гладкий;
- 2) диффундирует одна компонента;
- 3) коэффициент диффузии не зависит от концентрации;
- 4) лимитирующей стадией электрохимического процесса является диффузия;
- 5) гальванодинамические условия.

Картина распределения концентраций аналогична такой же при постоянном токе [1], что определяет и аналогию поляризационных характеристик при постоянном и импульсном токах. Такая предпосылка выдвигалась в работе [3] в качестве исходной при анализе работы аккумуляторной батареи в импульсном режиме. Как и для аналитических решений, рассмотренных выше, перенапряжение диффузии может быть вычислено по кривой $c(0,t)$. Модель с видоизмененными граничными условиями может быть использована для анализа процессов, для которых задана импульсная последовательность напряжения – потенциодинамические условия, более приближенные к реальным системам, где поляризующий источник энергии является источником напряжения, а не тока.

К реальным электрохимическим системам решение с рассмотренными выше допущениями, конечно же, не применимо. Одной из наиболее удобных для качественного анализа химических источников тока является электротехническая модель аккумуляторной батареи и для количественных характеристик – построенная на ее основе феноменологическая модель [2], где уравнение вида (1) используется для выяснения картины распределения поляризации разряда, определяемой удалением электрохимического процесса от поверхности в объем активной массы электрода.

Литература

1. Феттер К. Электрохимическая кинетика. – М.: Изд-во «Химия», 1967. – 856 с.
2. Галушкин Н.Е. Моделирование процессов распределения в пористом электроде при поляризации асимметричным переменным током: Дис. ... канд. техн. наук / НПИ. – Новочеркасск, 1989.
3. Рашевиц К.К. Работа железо-никелевых аккумуляторов в импульсных режимах // Известия Академии наук Латвийской ССР. Серия физических и технических наук. – 1967. – № 5. – С. 119-126.

346500, г. Шахты, пер. Сквозной, 73, 5, (88636) 25-70-20, e-mail: cnofns2@inbox.ru

УДК 621.313.532

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МГД-НАСОСА

Г.К. Смолин, А.А. Шапуров

Российский государственный профессионально-педагогический университет,
г. Екатеринбург

Представлена математическая модель электромагнитных процессов в однофазном МГД-насосе на основе детализированной магнитной схемы замещения.

Однофазный МГД-насос с кольцевым каналом [1] и внешним магнитным полем, меняющимся по гармоническому закону, прост по конструкции и удобен в эксплуатации. МГД-насос может широко использоваться для транспорта высокотемпературных металлов в МГД-приводе с большой подачей.

На стадии проектирования МГД-насоса возникает необходимость математического моделирования как пространственного распределения электромагнитного поля в МГД-насосе, так и его интегральных характеристик. Для осуществления моделирования применена математическая модель на основе детализированной магнитной схемы замещения (рис. 1). Математическая модель строилась по основным принципам построения математических моделей индукционных устройств на основе схем замещения, изложенных в [2]. По аналогии с [2] структура математической модели однофазного МГД-насоса включает два блока уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа, для короткозамкнутой электрической цепи вторичного элемента (металла в канале) и магнитной цепи. Например, для контуров 31 и 32 (рис. 1) уравнения магнитного и электрического равновесия по второму закону Кирхгофа записываются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{31}(R_{t31} + R_{t32} + R_{n31} + R_{n41}) - \Phi_{32}(R_{t32}) &= I_{31}, \\ \Phi_{32}(R_{t32} + R_{t33} + R_{n32} + R_{n42}) - \Phi_{31}(R_{t32}) &= F_3 + I_{32}, \\ I_{31} \cdot R_{эл31} &= -(d\Phi_{31}/dt) - (v_z/2t)(\Phi_{41} - \Phi_{21}), \\ I_{32} \cdot R_{эл32} &= -(d\Phi_{32}/dt) - (v_z/2t)(\Phi_{42} - \Phi_{22}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_z – скорость вторичного элемента.

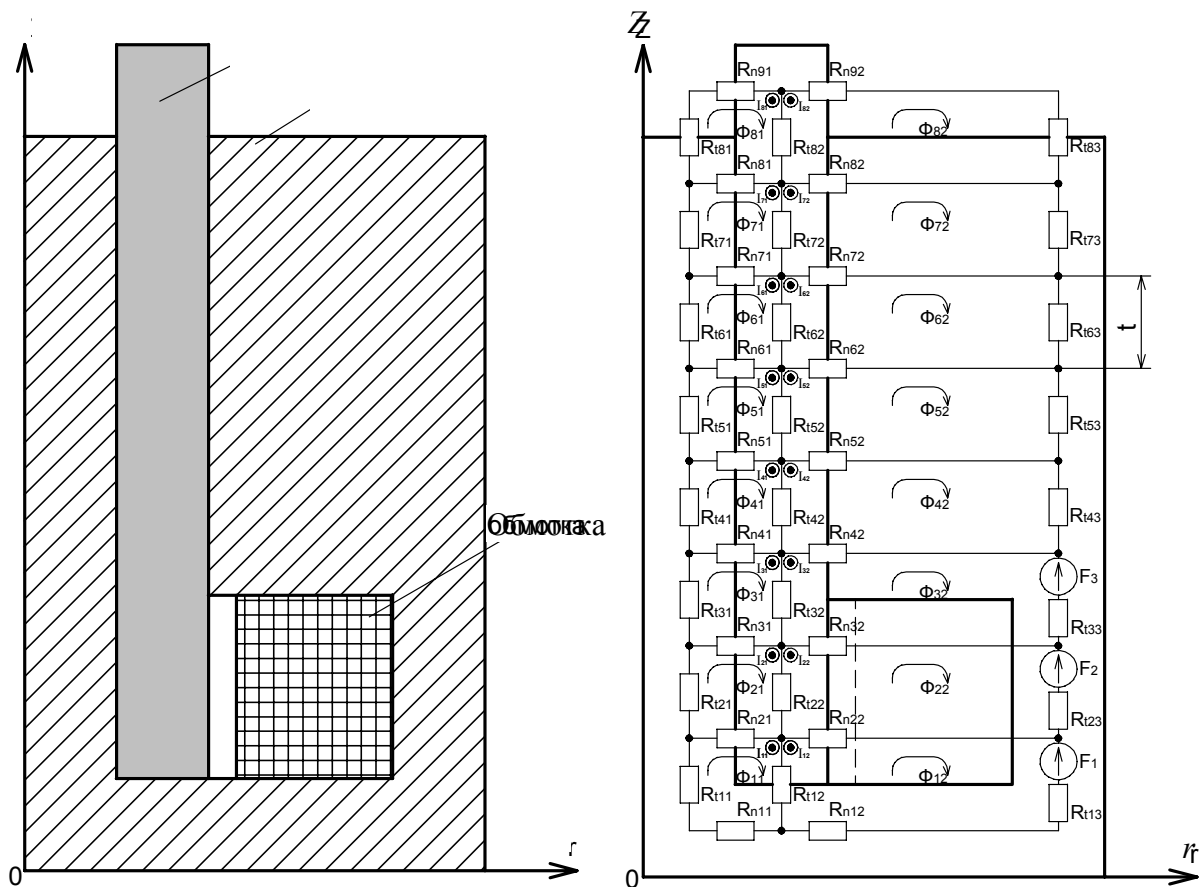


Рис. 1. Конструкция МГД-насоса и его магнитная схема замещения

Такие уравнения записываются для всех контуров магнитной схемы замещения и всех участков вторичного элемента. Полученная система уравнений решается относительно контурных магнитных потоков. Непосредственно на их основе находятся азимутальные токи в участках вторичного элемента. Аксиальные (тяговые) и радиальные электромагнитные усилия находятся как произведение азимутальных токов вторичного элемента на радиальные и аксиальные компоненты индукции, соответственно.

Программная реализация математической модели была выполнена в системе MATLAB6, причем программа была написана так, что степень детализации магнитной цепи можно менять в широких пределах, тем самым достигая нужную степень точности расчета.

Результаты расчета внутренних гидромеханических характеристик однофазного МГД-насоса при питании его от источника напряжения с использованием предложенной модели представлены на рис. 2.

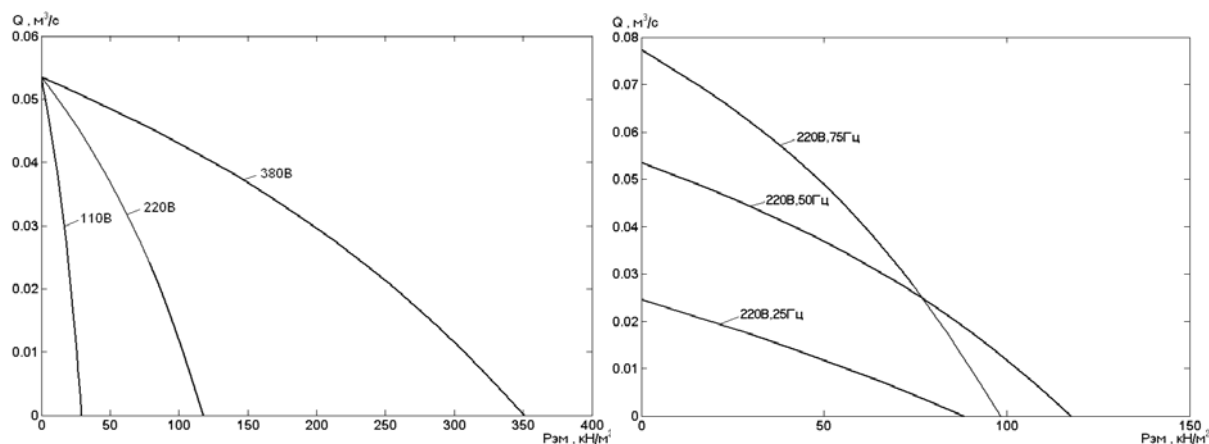


Рис. 2. Внутренние гидромеханические характеристики МГД-насоса

Литература

1. А.с. 1612365 СССР, МКИ Н 02 К 44/00. Устройство для обработки расплавленного металла / Я.Г. Смолин, Г.К. Смолин.
2. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 236 с.

УДК 622.625-83:681.3.00.57(06)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ СИЛОВОЙ ЧАСТИ В СРЕДЕ *MATLAB*

Ю.П. Сташинов, Е.В. Крутиков

Шахтинский институт Южно-Российского государственного технического университета
(Новочеркасского политехнического института)

Представлены результаты разработки компьютерной модели для исследования переходных режимов работы тягового электропривода с изменяемой структурой сило-

вой части. Результаты моделирования показывают, что предложенная модель качественно адекватно описывает функционирование рассматриваемого электропривода и может быть использована для исследования разнообразных режимов его работы.

Для тягового электропривода наиболее предпочтительной является мягкая механическая характеристика при повышенных нагрузках и жесткая, с автоматическим ограничением скорости, в области малых и отрицательных нагрузок [1]. Такую характеристику можно получить при подпитке обмотки возбуждения тягового электродвигателя последовательного возбуждения от низковольтного источника. Один из возможных вариантов такого технического решения [2] представлен на расчетной схеме замещения (рис. 1).

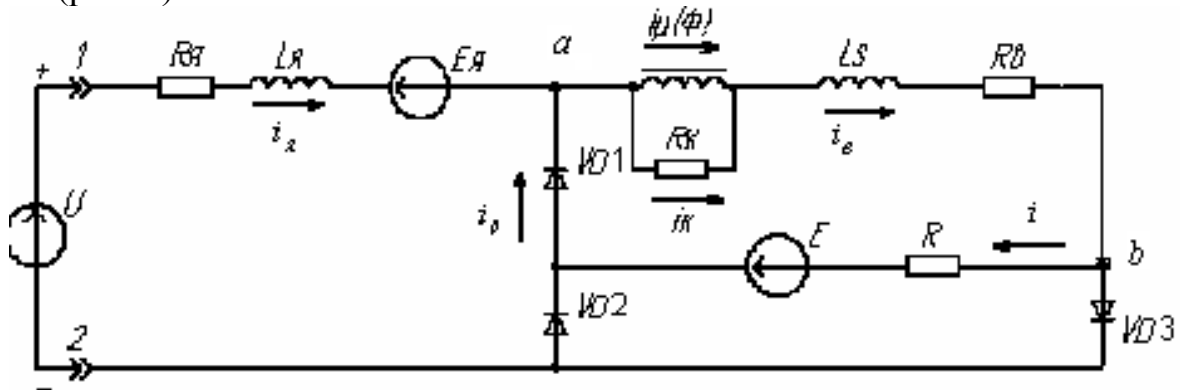


Рис. 1. Схема замещения электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в системе электропривода с изменяемой структурой силовой части: R_k – сопротивление контура вихревых токов; i_b, i_a, i, i_d – токи обмотки возбуждения, подпитки, якоря и рекуперативного торможения; R_a, R_b, R – сопротивление якорной обмотки, обмотки возбуждения и источника подпитки; E – ЭДС источника подпитки; U – питающее напряжение; L_a, L_s – индуктивности якорной обмотки и рассеяния обмотки возбуждения; $i_\mu(\Phi)$ – ток намагничивания в функции магнитного потока

Механическая характеристика рассматриваемого привода представлена на рис. 2.

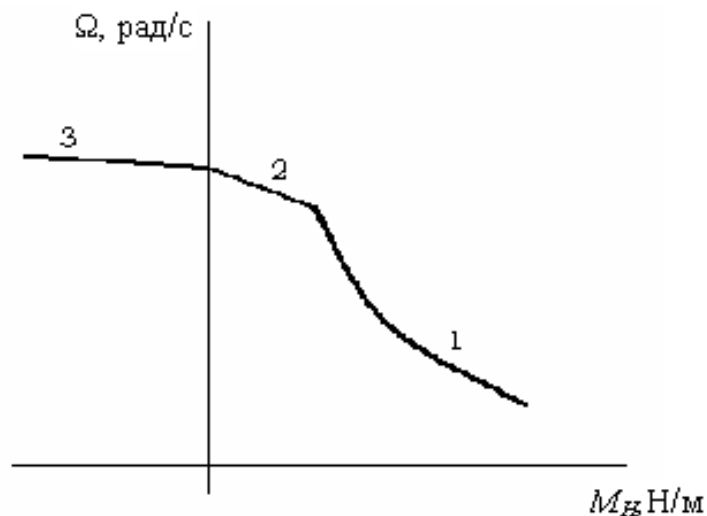


Рис. 2. Механическая характеристика тягового электропривода с изменяемой структурой силовой части

Первый участок механической характеристики соответствует структуре привода с двигателем последовательного возбуждения, когда разность потенциалов между точками a и b на схеме замещения превышает ЭДС источника подпитки, и диод $VD1$ заперт. Переход на второй участок происходит при снижении якорного тока до величины, когда разность потенциалов между точками a и b становится меньше ЭДС источника подпитки, и ток возбуждения равен сумме якорного тока и тока подпитки, протекающего через диод $VD1$. Третий участок соответствует режиму рекуперативного торможения, когда ЭДС вращения якоря $E_{\text{я}}$ превышает напряжение питания U . В этом случае якорный ток проходит через диоды $VD1$, $VD2$, и двигатель работает с независимым возбуждением от источника подпитки.

Работа схемы в переходных режимах осложнена наличием инерционностей в системе и может быть изучена методами компьютерного моделирования. Удобные возможности для моделирования предоставляет приложение *Simulink* в составе *Matlab*, которое позволяет вести численный расчет системы по ее схеме замещения. Визуальное представление компьютерной модели рассматриваемой системы привода, построенной на основе схемы замещения, с учетом механической инерционности приведено на рис. 3.

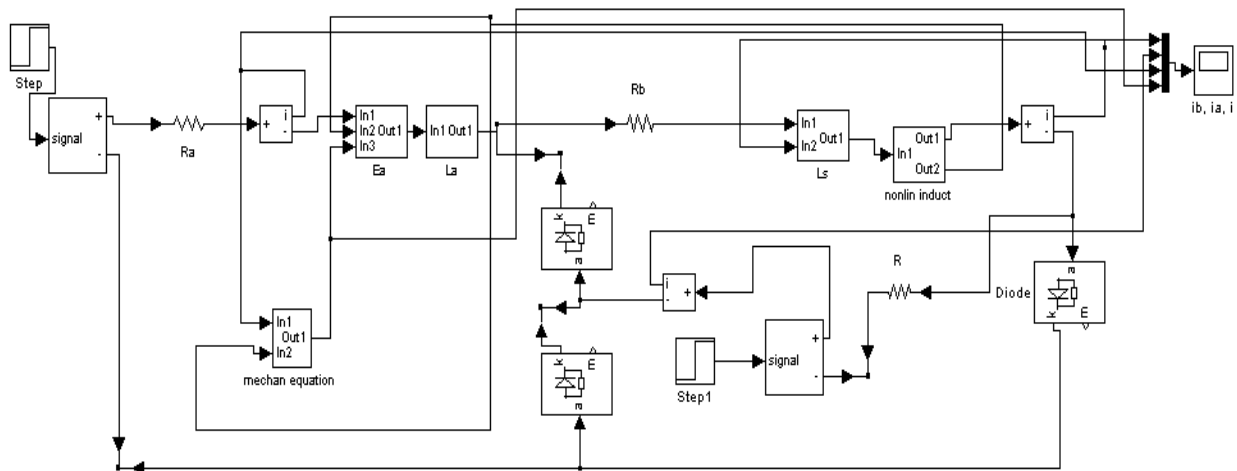


Рис. 3. Компьютерная модель привода в среде *Matlab* 6

Модель содержит решающий блок *mechan equation*, описывающий уравнение динамики механической части привода, элементы $La, Ea, i_{\mu}(\Phi) - Rk, Ls$ представлены отдельными подсистемами, соответственно, $La, Ea, nonlin induct, Ls$. На рис. 4-8 представлена каждая из подсистем в развернутом виде.

Величина намагничивающего тока $i_{\mu}(\Phi)$ вычисляется блоком *Look-up-table* (рис. 7), по данным таблицы, с использованием кусочно-линейной аппроксимации указанной зависимости [3].

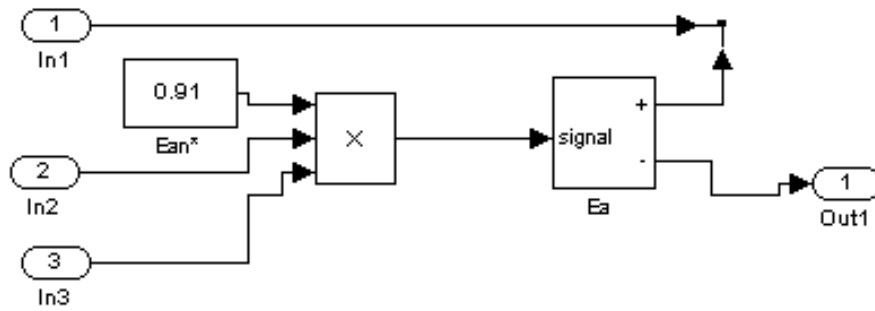


Рис. 4. Подсистема, моделирующая изменение противоЭДС якоря

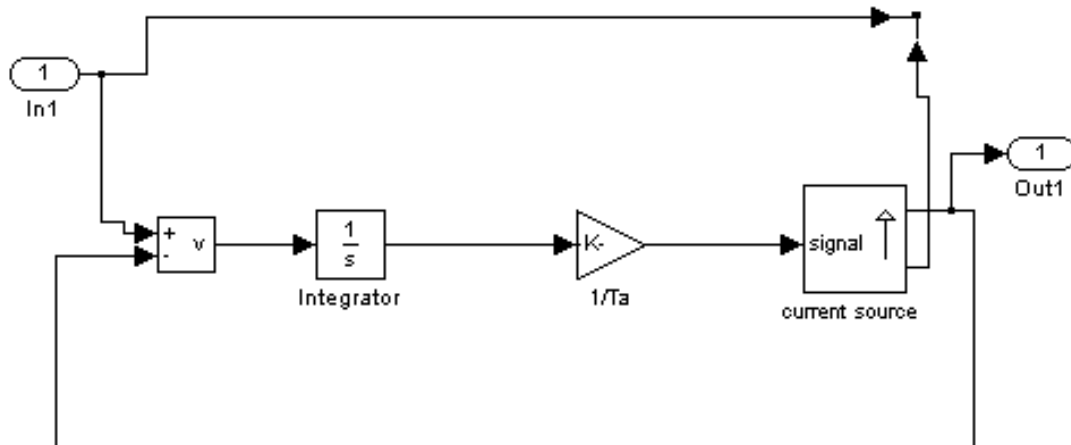


Рис. 5. Подсистема, моделирующая индуктивность якоря

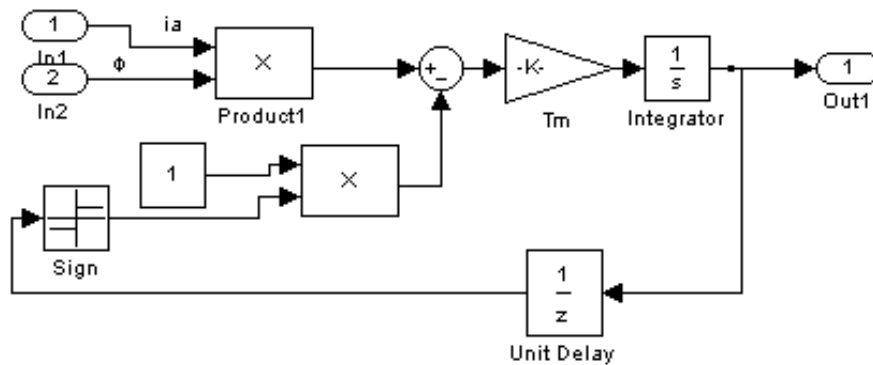


Рис. 6. Подсистема, моделирующая механическую инерционность привода

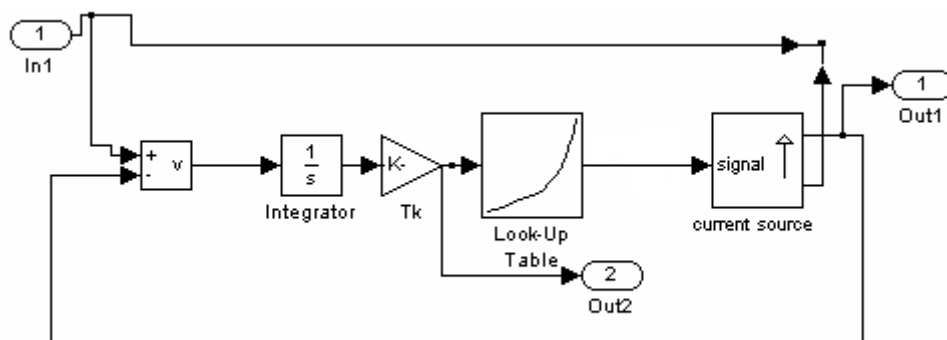


Рис. 7. Подсистема, моделирующая зависимость тока намагничивания от величины магнитного потока с учетом вихревых токов

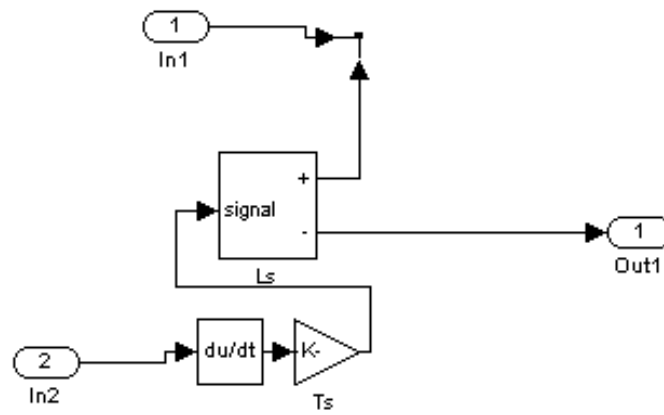


Рис. 8. Подсистема, моделирующая индуктивность рассеяния обмотки возбуждения

Таблица

Универсальная обращенная кривая намагничивания тягового двигателя [3]

Φ	0,05	0,22	0,39	0,55	0,68	0,76	0,83	0,88	0,93	0,97	1,0	1,05	1,09	1,12	1,15
i_μ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8

Присутствующие в схеме нелинейности в виде диодов $VD1$, $VD2$, $VD3$ при численном интегрировании не должны образовывать разрывы искоемых функций тока и магнитного потока и сохранять их свойство аналитичности, в силу чего идеализированная однонаправленная модель диода неприменима, и к использованию принята модель, приведенная на рис. 9.

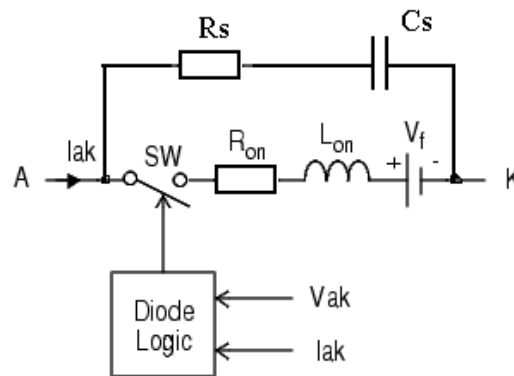


Рис. 9. Модель полупроводникового диода в среде *Matlab*

Общая модель привода составлена в относительных единицах в базе величин: $R_\delta = 1$ Ом, $I_\delta = I_H$, $\Omega_\delta = \Omega_H$, $\Phi_\delta = \Phi_H$, $U_\delta = I_\delta R_\delta$, где I_H , Φ_H , Ω_H – номинальные значения тока, магнитного потока и угловой скорости тягового электродвигателя, $T_\alpha = L_\alpha / R_\delta$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи электродвигателя, $T_k = W\Phi_\delta / U_\delta$ – постоянная времени контура вихревых токов, $T_s = L_s / R_\delta$ – постоянная времени от потоков рассеяния обмотки возбуждения, $T_m = J\omega_\delta / M_\delta$ – электромеханическая постоянная времени двигателя [4].

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 10, 11, все величины выражены в относительных единицах.

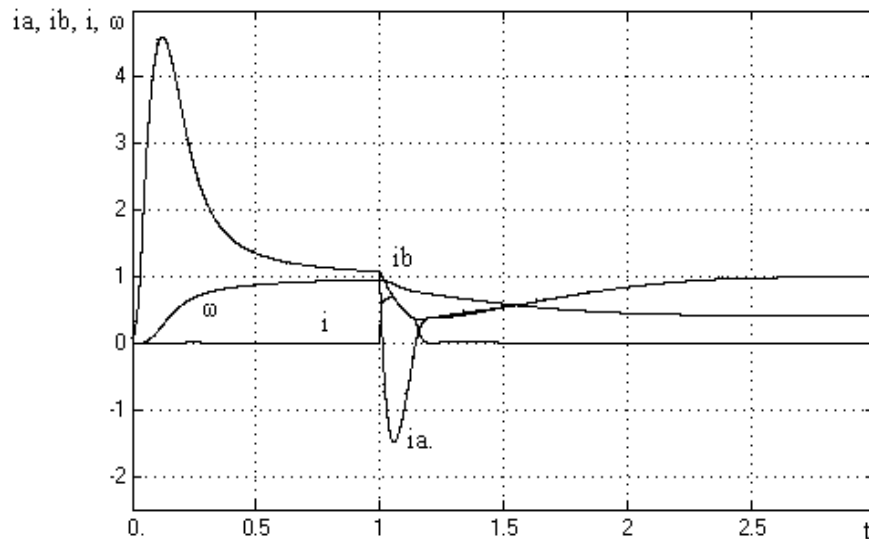


Рис. 10. Запуск при номинальном напряжении и моменте и последующий сброс питающего напряжения до половины номинала:

i_a – ток якоря, i_b – ток возбуждения, i – ток подпитки, ω – угловая скорость

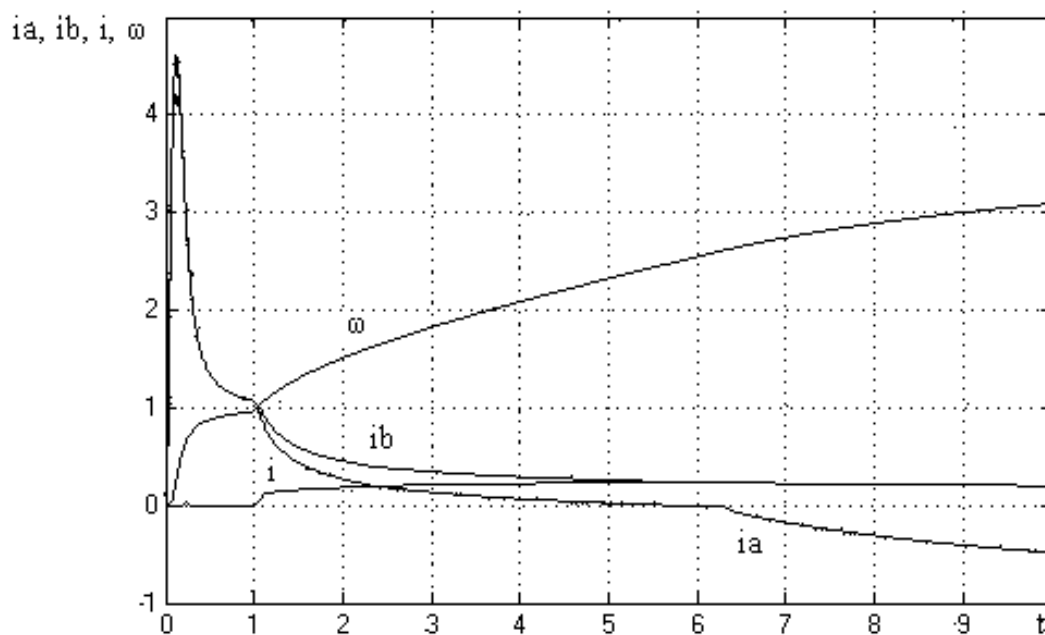


Рис. 11. Разгон при номинальных значениях напряжения питания и момента с последующим сбросом нагрузки до $-0,3 M_H$

Результаты моделирования показывают, что предложенная компьютерная модель качественно адекватно описывает работу электропривода с изменяемой структурой силовой части и может быть использована для исследования разнообразных режимов его работы.

Литература

1. Духопельников В.Д., Сташинов Ю.П. Совершенствование тяговых характеристик рудничных электровозов // Горная электромеханика и автоматика. – Харьков. – 1966. – № 6. – С. 124-129.

2. А.с. № 352806 (СССР) М. кл. В 60 L 7/12. Устройство для рекуперативного торможения электроподвижного состава / Ю.П. Сташинов; Оpubл. в бюл. «Изобретения, открытия, промышленные образцы, товарные знаки», 1972, № 29.
3. Сташинов Ю.П., Сташинова Л.Ф. Уравнения динамики и схемы замещения электроприводов рудничных аккумуляторных электровозов с рекуперативным торможением // Исследования в области горной электромеханики: Сб. науч. тр. – Новочеркасск: НПИ, 1975. – Т. 306. – С. 9-16.
4. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1965. – 232 с.

346500, г. Шахты, Ростовская область, пр. Чернокозова, 144, кв. 8,
т. (88636)-25-95-23, e-mail: Stashinov@itsinpi.ru

УДК 622.272.001.57

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

И.Ю. Иванов, Д.Н. Шурыгин

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Рассмотрен алгоритм построения функции распределения оседаний земной поверхности для произвольной формы выработки. В качестве искомой функции распределения была использована линейная комбинация элементарных функций распределения, коэффициенты которой были найдены методом наименьших квадратов.

Сдвигения и деформации земной поверхности при разработке угольных месторождений рассчитываются по методикам Правил охраны сооружений и природных объектов ... [1] в направлении главных сечений: вкрест простирания пласта и по простиранию пласта. При необходимости сдвигения и деформации можно определить по тем же Правилам и в произвольных точках мульды сдвигения. Но такие расчеты, как показано в работах [2, 3], выполняются некорректно. Кроме того, они не могут быть выполнены для выработок, имеющих форму, отличную от прямоугольника, и не приспособлены для случаев совместного расчета сдвигений и деформаций для двух лав, располагающихся уступом.

Поэтому расчет деформаций по всей площади (т.е. получение достоверных карт деформаций) на основе Правил невозможен, тем более, если выработка по своей форме отлична от прямоугольной.

Эта задача может быть решена, не отходя от принципов типовых кривых, принятых в Правилах охраны ... [1], но с использованием других путей реализации этого принципа.

Один из способов решения этой задачи был предложен в работе [4], но точность построения поверхности оседаний составила 5 %. Учитывая, что поверхности деформаций наклонов и кривизны будут строиться дифференцированием поверхности оседаний, их погрешность заметно возрастет. Поэтому в данной работе сделана попытка усовершенствования методики построения поверхности оседания с более высокой точностью.

В качестве исходной модели, как и в работе [4], возьмем оседание земной поверхности, описываемое функцией распределения [5]

$$S(z) = e^{-6,2z^{2,5}}. \quad (1)$$

Поставим задачу нахождения значений оседания земной поверхности в мульде сдвижения от выработок произвольной формы для случая горизонтального залегания пласта (рис.1). Пусть координаты вершин выработки заданы в виде двумерного массива точек. Достроим исходную выработку до прямоугольной формы с вершинами в точках $M(x_{\min}, y_{\min})$, $N(x_{\max}, y_{\min})$, $K(x_{\max}, y_{\max})$, $L(x_{\min}, y_{\max})$.

Здесь x_{\min} и x_{\max} соответственно минимальное и максимальное значения координат из исходного массива вершин выработки вкrest простирания; y_{\min} и y_{\max} – по простиранию (рис. 1).

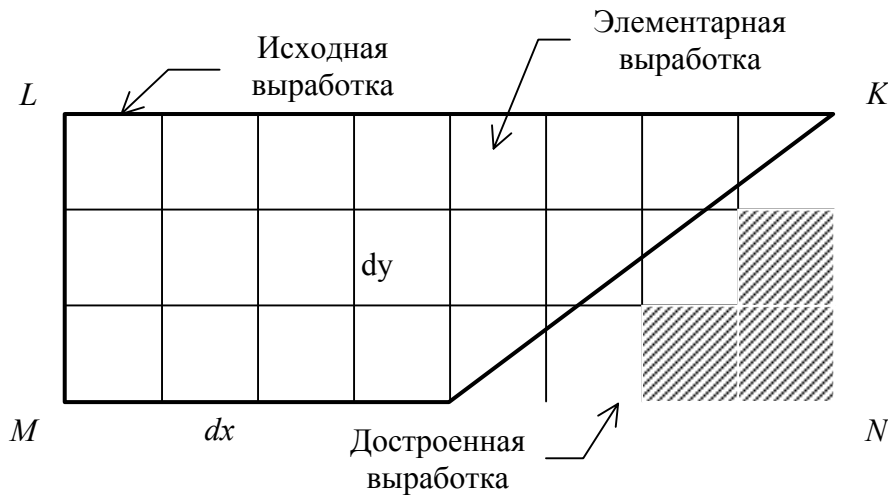


Рис. 1. Схема разбиения исходной и достроенной выработок

Для достроенной выработки прямоугольной формы можно найти параметры мульды сдвижения L_1, L_2, L_3 по известной методике [5]:

$$L_1 = (H + 0,5(y_{\max} - y_{\min}) \tan \alpha) / \tan \beta + 0,5(y_{\max} - y_{\min}) - H / \tan \theta,$$

$$L_2 = (H - 0,5(y_{\max} - y_{\min}) \tan \alpha) / \tan \gamma + 0,5(y_{\max} - y_{\min}) + H / \tan \theta,$$

$$L_3 = 0,5(x_{\max} - x_{\min}) + H / \tan \delta.$$

В нашем случае для горизонтального залегания пласта $L_1 = L_2$. Далее разбиваем исходную выработку на элементарные выработки с заданными шагами разбиения вкrest простирания (dx) и по простиранию (dy). Каждой элементарной выработке будет соответствовать элементарная мульда сдвижения, как это описано в работе [4]. Значения параметров мульды сдвижения l_1, l_2, l_3 находятся по описанным выше формулам, в которых производятся следующие изменения

$$l_1 = (H + 0,5dy \tan \alpha) / \tan \beta + 0,5dy - H / \tan \theta,$$

$$l_2 = (H - 0,5dy \tan \alpha) / \tan \gamma + 0,5dy + H / \tan \theta ,$$

$$l_3 = 0,5dx + H / \tan \delta .$$

Элементарные выработки расположены также горизонтально, поэтому $l_1 = l_2$. Для прямоугольной формы выработки известна функция распределения оседаний в мульде сдвижения, имеющая вид (1).

Следовательно, функции распределения можно найти для элементарных выработок $(F(z)_{el})$ и для выработки, достроенной до прямоугольной формы из исходной выработки произвольной формы $(F(z)_{teor})$.

Будем аппроксимировать функцию распределения $F(z)_{teor}$ линейной комбинацией элементарных функций распределения $F(z)_{el}$:

$$F(z)_{teor} = \sum_{j=1}^n k_j F_j(z)_{el} .$$

После нахождения коэффициентов k_j обнулим те значения коэффициентов, которые соответствуют элементарным выработкам, не принадлежащим исходной выработке произвольной формы (на рис. 1 такие выработки заштрихованы).

Рассмотрим поиск коэффициентов более подробно. Производить вычисление значений коэффициентов элементарных выработок будем методом наименьших квадратов (МНК). Очевидно, что на значения коэффициентов должно быть наложено условие их неотрицательности ($k_j > 0, \forall j$). Это следует из того, что коэффициенты k_j , отражающие вклад соответствующих элементарных мульд, не могут быть отрицательными. Для использования МНК создаются матрица *elem_value* и вектор *teor_value*.

Матрица *elem_value* содержит значения функций распределения элементарных мульд сдвижения в заданных точках мульды сдвижения исходной выработки (x_i, y_i) :

$$elem_value_{i,j} = e^{-6,2(z_{i,j})^{2,5}} ,$$

где $z_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{x_i - xcenter_j}{l_3}\right)^2 + \left(\frac{y_i - ycenter_j}{l_1}\right)^2}$; $xcenter_j, ycenter_j$ – координаты центра j -й элементарной выработки.

Вектор *teor_value* содержит значения функции распределения мульды сдвижения исходной выработки в тех же точках (x_i, y_i) :

$$teor_value_i = e^{-6,2(z_i)^{2,5}} ,$$

где $z_i = \sqrt{\left(\frac{x_i - x}{L_3}\right)^2 + \left(\frac{y_i - y}{L_1}\right)^2}$; x, y – координаты центра выработки

MNKL.

МНК находит значения коэффициентов k_j , минимизируя следующее выражение:

$$|elem_value\ k - teor_value| \rightarrow \min.$$

Для вычисления коэффициентов, учитывая их неотрицательность, была использована встроенная функция *lsqnonneg* математического пакета MATLAB6.5.

Последним этапом является обнуление коэффициентов k_j для тех элементарных выработок, которые не принадлежат исходной выработке произвольной формы. После этого находятся значения суммарной функции распределения для любых точек (x_s, y_s) по формуле

$$our_s = \sum_{j=1}^n k_j \cdot e^{-6,2z_{s,j}^{2,5}},$$

$$\text{где } z_{s,j} = \sqrt{\left(\frac{x_s - xcenter_j}{l_3}\right)^2 + \left(\frac{y_s - ycenter_j}{l_1}\right)^2}.$$

Пример расчета поверхности оседания для выработки непрямоугольной формы представлен на рис. 2.

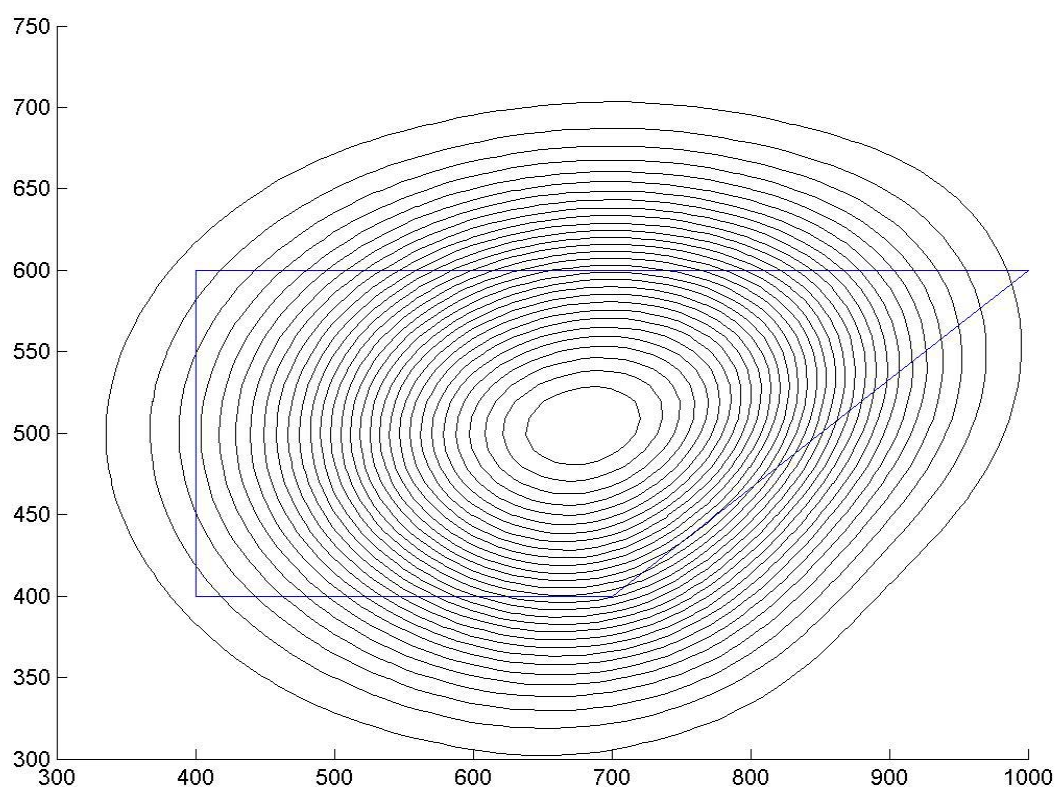


Рис. 2. Область мульды сдвижения для выработки непрямоугольной формы

Алгоритм построения функции распределения оседаний земной поверхности для выработки произвольной формы был реализован в виде программы, написанной в математическом пакете MATLAB 6.5.

Погрешность данного метода нахождения аппроксимируемой функции распределения оседаний от выработки произвольной формы для функции распределения мульды сдвижения не превышает 1,4 % для любых значений параметров выработки.

Литература

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок на угольных месторождениях. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – С. 290.
2. Расчет сдвижений и деформаций земной поверхности по площади при маркшейдерском обеспечении городских кадастров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ. – 2000. – № 6. – С. 42-44.
3. Медянцев А.Н., Иванов И.Ю. Расчеты сдвижений и деформаций земной поверхности в заданных точках мульды сдвижения полярным способом // Маркшейдерия и недропользование. – 2001. – № 1. – С. 32-34.
4. Иванов И.Ю., Шурыгин Д.Н. Расчет сдвижений и деформаций земной поверхности для горных выработок произвольной формы. Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы III междунар. науч.-практ. конф. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2003. – С. 50-53.
5. Борщ-Компониец В.И., Батугина И.М., Варлашкин В.М. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках. – М.: Недра, 1984. – С. 247.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 55-3-56,

e-mail: mdg@mdg.srstu.novoch.ru

УДК 624.131:519.2

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ТЕРРИТОРИИ Г. РОСТОВА-НА-ДОНУ

Э.И. Ткачук

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Получены многомерные статистические модели изменения полевого модуля общей деформации в зависимости от результатов простейших испытаний. Установлено, что информативность таких моделей на порядок выше информативности используемой в инженерно-геологической практике методики РостовДонТИСИЗа.

Модуль деформации (точнее, модуль общей деформации E_0) является одной из важнейших эмерджентных характеристик глинистых (в т.ч. лессовых) пород. Для определения этого показателя используются лабораторные и полевые методы. Последние выполняются преимущественно с помощью штампов диаметром 600 и 5000 см², а полученные результаты (значения модуля деформации $E_{ш}$, в частности, E_{600} и E_{5000}) принято считать эталонными. Однако высокая стоимость и техническая сложность полевых испытаний приводят к многочисленным исследованиям зависимостей $E_{ш}$ от косвенных характеристик (показателей состава, состояния и физических свойств). В частности, на базе таких исследований созданы таблицы нормативных значений E_0 [1]. Однако эти значения пригодны лишь

для нелессовых глинистых пород, имеющих степень влажности $S_r \geq 0,8$. Для огромных пространств глинистых (в т.ч. лессовых) пород, характеризующихся значениями $S_r < 0,8$, такие значения отсутствуют. Исключением является «Новый подход к определению модуля общей деформации грунтов» [2], который положен в основу методики РостовДонГИСИЗа, но характеризуется существенными недостатками интерпретации экспериментальных данных [3]. Поэтому предпринята попытка восполнить упомянутый пробел и показать возможность достаточно надежного решения поставленной задачи.

В основу исследований положены результаты 76 штампоопытов (38 – установкой КРУ-600 в скважинах и 38 – с помощью штампов площадью 5000 см^2 в шурфах), полученные А.К. Меркуловой в процессе инженерно-геологического изучения глинистых (преимущественно эолово-делювиальных лессовых, лессовидных и лессоподобных) отложений.

Упомянутые результаты, охарактеризованные значениями влажности W , %, коэффициента пористости e , пределов W_L , W_p и числа пластичности I_p (%), степени влажности S_r , показателя текучести I_L , показателя уплотненности K_d , компрессионного E_k , лабораторного E_L и штампового $E_{ш}$ (E_{600} и E_{5000} , МПа) модулей деформации, охватывают широкий спектр показателей свойств. Так, результаты штампоопытов, выполненных в скважинах на глубинах H от 1 до 12 м, характеризуются значениями W от 14 до 36 %, e – от 0,63 до 1,18, I_p – от 8 до 26 %, S_r – от 0,44 до 1,00, I_L – от -0,50 до 0,62 и т.д. Результаты штампоопытов в шурфах на глубинах от 1,7 до 5 м охарактеризованы более узким диапазоном изменения упомянутых показателей. Например, значения W изменяются от 15 до 25 %, W_L – от 27 до 50 %, S_r – от 0,55 до 0,93, I_L – от -0,4 до 0,04.

Основные результаты статистической обработки полученных данных приведены в таблице, где X – среднее значение показателя x ; σ_x – его стандарт; $m_k = E_{ш}/E_k$ – коэффициент перехода от E_k к $E_{ш}$.

Таблица

**Оценки основных статистических параметров распределения
и взаимосвязей результатов штампоопытов и других
показателей физико-механических свойств глинистых пород
территории г. Ростова-на-Дону**

x	X	σ_x	Коэффициенты корреляции r с показателями x							X	σ_x
			W	e	W_L	W_p	$\lg E_{ш}$	$\lg E_k$	$\lg m_k$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W	22,3	6,00	*	0,50	0,61	0,67	-0,65	-0,30	-0,14	18,8	2,86
e	0,83	0,146	0,65	*	0,17	0,42	-0,16	0,11	-0,21	0,68	0,081
W_L	36,6	8,45	0,78	0,60	*	0,81	-0,62	-0,23	-0,19	40,8	4,82
W_p	21,0	4,35	0,74	0,58	0,97	*	-0,39	-0,17	-0,10	22,0	2,40
$\lg E_{ш}$	1,06	0,207	-0,61	-0,68	-0,41	-0,32	*	0,29	0,38	1,50	0,158
$\lg E_k$	0,67	0,178	-0,53	-0,61	-0,31	-0,32	0,62	*	-0,77	0,99	0,231

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\lg m_k$	0,39	0,171	-0,20	-0,19	-0,16	-0,05	0,57	-0,29	*	0,51	0,240
I_p	15,6	4,39	0,77	0,58	0,97	0,87	-0,46	-0,29	-0,26	18,8	3,21
S_r	0,73	0,157	0,68	-0,11	0,43	0,40	-0,14	-0,10	-0,07	0,76	0,099
I_L	0,08	0,285	0,52	0,12	-0,07	-0,16	-0,43	-0,36	-0,15	-0,17	0,115
K_d	0,30	0,416	0,36	-0,17	0,66	0,65	0,17	0,21	-0,01	0,82	0,214
$E_{ш}$	12,5	5,30	-0,50	-0,62	-0,24	-0,15	0,97	0,59	0,55	33,5	10,42
E_k	5,05	2,05	-0,42	-0,54	-0,22	-0,22	0,58	0,96	-0,30	11,2	5,47
m_k	2,62	1,04	-0,11	-0,20	-0,10	0,01	0,52	-0,32	0,97	3,78	2,54
H	5,75	2,70	-0,04	-0,41	0,02	0,07	0,47	0,21	0,36	3,39	1,02

Примечание: левая нижняя часть матрицы характеризует результаты штампо-опытов в скважинах, правая верхняя – в шурфах.

Анализ таблицы позволяет отметить статистически существенное различие обобщенных значений показателей физических свойств (W , e) и состояния пород (S_r , I_L , K_d) изученных двух групп наблюдений при более близких значениях некоторых показателей состава (например, W_p). В наибольшей мере различаются показатели деформационных свойств: в шурфах они в 2,2-2,7 раза выше, чем в скважинах. Это объясняется меньшей пористостью, влажностью и большей уплотненностью пород: среднее значение K_d равно 0,82 в шурфах, а для монолитов, отобранных из скважин, $K_d = 0,30$. Кроме того, отмеченное обстоятельство может быть обусловлено проявлением масштабного эффекта I рода и отражает существенно большую эмерджентность E_{5000} по сравнению с E_{600} и E_k .

Стандарты показателей состава, состояния и физических свойств пород в скважинах значительно (в 1,4-2,5 раза) больше стандартов этих показателей в шурфах в связи с большим диапазоном глубины опробования. В то же время стандарты показателей деформационных свойств ($E_{ш}$, E_k) в 2-2,7 раза больше в шурфах. Это обусловлено логнормальным законом распределения плотности вероятностей значений $E_{ш}$ и E_k , при котором дисперсии значений x увеличиваются с ростом x . Коэффициенты вариации $E_{ш}$ в шурфах меньше (31 %), чем в скважинах (42 %), меньшим является также стандарт $\lg E_{ш}$, что свидетельствует о проявлении масштабного эффекта II рода. Однако коэффициенты вариации E_k и стандарты $\lg E_k$, полученные по результатам испытаний монолитов, отобранных из шурфов, больше соответствующих показателей, полученных на монолитах, отобранных из скважин. Такое обстоятельство может быть обусловлено относительно большим количеством макропор на малых глубинах, а отсюда – большим разбросом результатов компрессионных испытаний.

Взаимосвязи показателей свойств линеаризованы, для чего значения E_0 и m_k заменены их логарифмами.

Как следует из таблицы, зависимости деформационных свойств от других характеристик, как правило, достоверные: абсолютные значения

коэффициентов корреляции r обычно превышают критическое $r_{кр} = 0,28$ (для 90 %-го уровня надежности), однако слабые ($|r| = 0,14 \dots 0,68$). Поэтому выполнен многомерный корреляционный анализ $\lg E_{600}$ и других показателей свойств. В частности, осуществлен последовательный ввод косвенных характеристик в соответствующую матрицу r по мере ослабления тесноты зависимостей $\lg E_{600}$ от этих характеристик ($e, W, H, I_p, I_L, W_L, W_p, \rho, K_d, S_r$). Установлено, что значения коэффициентов множественной корреляции R и коэффициентов детерминации R^2 при этом увеличиваются, остаточные стандарты $\lg E_{600}$ уменьшаются, однако незакономерно. Так, достоверность оценки $\lg E_{600}$, которая повышается уже при двух косвенных признаках ($R = 0,72$), заметно возрастает при учете H (R достигает 0,78), увеличивается с вводом в перечень аргументов I_L , после чего не изменяется (для 5, 6, 7 и 8 признаков $R = 0,816$) и несколько улучшается при дополнительном учете значений K_d и S_r (R достигает 0,84). Отмеченные особенности обусловлены тем, что H косвенно отражает степень литификации, а I_L, K_d и S_r – особенности поведения свойств глинистых пород как системных объектов. Однако значения последних являются в сущности функциями e, W, W_L и W_p . Поэтому в числе основных косвенных признаков оставлен комплекс e, W, W_L, W_p и H , дополненный $\lg E_k$, который по уровню эмерджентности значительно ближе к E_{600} , чем к E_{5000} . В итоге получена следующая вероятностная модель поведения значений E_{600} :

$$\lg E_{600}^* = 1,055 - 0,3e - 0,012W + 0,02H - 0,024W_L + 0,05W_p + 0,35\lg E_k. \quad (1)$$

Уравнение (1) характеризуется значением $R = 0,84$, близкой к ортогональной зависимостью $\lg E_{600}$ от $\lg E_{600}^*$ ($\lg E_{600} = 0,96\lg E_{600}^* + 0,04$), остаточным стандартом $\sigma_{\lg E_{600}^*} = 0,112$ и поправкой на смещение при переходе от среднегеометрических значений к среднеарифметическим, $A = 0,0145$. Отсюда для несмещенных оценок

$$E_{600}^* = 11,7E_k^{0,35} \cdot 10^{-0,3e-1,2W+0,02H-2,4W_L+5W_p}, \quad (2)$$

где W, W_L и W_p – в долях ед., E_{600} и E_k – в МПа.

Вероятностная модель (2) характеризуется условным стандартом частных значений E_{600} , $\sigma_E = 0,26E_{600}$. При этом зависимость фактических и прогнозируемых уравнением (2) значений E_{600} прямолинейная и также близка к ортогональной. Это позволяет оценивать E_{600} со среднеквадратичной погрешностью, равной $2,96 \approx 3$ МПа, что составляет 24 % среднего значения E_{600} . В случае, если детальность опробования соответствует нормативным требованиям (не менее 6 определений физико-механических свойств для каждого инженерно-геологического элемента), то упомянутая погрешность снижается до 11 %, т.е. удовлетворяет ГОСТ 20522-75, требующем 10-15 %-й точности оценки обобщенных значений E_0 .

При отсутствии сведений о результатах компрессионных испытаний можно использовать ограниченное число косвенных признаков:

$$\lg E_{600}^* = 1,614 - 0,8e - 0,015W - 0,024W_L + 0,056W_p; \quad R = 0,79. \quad (3)$$

Для уравнения (3) $\sigma_{\lg E_{600}^*} = 0,13$, $A = 0,03$, регрессия $\lg E_{600}$ по $\lg E_{600}^*$ ортогональная ($\lg E_{600} = 1,01 \lg E_{600}^* - 0,01$). Для несмещенных оценок

$$E_{600}^* = 43 \cdot 10^{-0,8e-0,015W-0,02WL+0,056Wp}. \quad (4)$$

Модель (4) характеризуется значением $\sigma_{E_{600}^*} = 0,29E_{600}$, что при необходимых не менее 10 определениях физических свойств для каждого инженерно-геологического элемента снижает погрешность оценки обобщенных показателей E_{600} до требуемых $0,1E_{600}$.

Значения E_{5000} очень слабо зависят от E_k (см. таблицу). Это обусловлено несоизмеримыми объемами определяющих областей экспериментов в шурфах и компрессионных приборах, что привело к относительно полной потере эмерджентности E_k :

$$\lg E_{5000} = 1,30 + 0,20 \lg E_k, r = 0,288. \quad (5)$$

Кроме того, E_{5000} не зависит от e ($r = -0,16$). Это в целом позволило получить следующую достаточно простую вероятностную модель:

$$\lg E_{5000}^* = 2,28 - 0,034W - 0,025W_L + 0,040W_p; R = 0,80, \sigma_{\lg E_{5000}^*} = 0,097, \quad (6)$$

откуда для несмещенных оценок

$$E_{5000}^* = 190 \cdot 10^{-0,034W-0,025W_L+0,04W_p}, \sigma_{E_{5000}^*} = 0,22E_{5000}^*: \quad (7)$$

точность косвенной оценки E_{5000} по результатам простейших испытаний с помощью модели (7) выше точности модели (4).

В связи со слабым влиянием E_k на E_{5000} , соответствующий корректирующий коэффициент m_k находится в тесной зависимости от E_k :

$$\lg m_k = 1,30 - 0,80 \lg E_k, r = -0,775. \quad (8)$$

Зависимость (8) представляет собой реализацию методики Ростов-ДонТИСИЗа. В конкретных условиях она несколько слабее зависимостей, предложенных разработчиками методики ($-0,97 \leq r \leq -0,84$) [2]. Однако это не препятствует сравнению эффективности моделей (6) и (8).

Учитывая, что $\lg m_k = \lg E_{5000} - \lg E_k$, из (8) найдем точное соответствие модели (5), для которой коэффициент детерминации, отражающий относительное снижение дисперсии E_{5000} , в 7,6 раза хуже, чем для модели (8). Более того, воспользовавшись возможностью отбраковки 7 % «неудобных» значений $\lg m_k$, как это сделано в [2], получим коэффициент корреляции $\lg m_k$ и $\lg E_k$, равный -0,88 и зависимость $\lg E_{5000}$ от $\lg E_k$ со значением $r = 0,205$, что увеличивает упомянутое различие до 15-кратного. В то же время, слабая зависимость $\lg m_k$ от $\lg E_k$, полученная по результатам штампоопытов в скважинах ($r = -0,29$), приводит к достоверной взаимосвязи $\lg E_{600}$ и $\lg E_k$ ($r = 0,62$, см. таблицу). В обоих случаях коэффициент множественной корреляции $\lg m_k$, $\lg E_{ш}$ и $\lg E_k$ равен 1,00: чем теснее зависимость $\lg m_k$ от $\lg E_k$, тем больше погрешность косвенной оценки $E_{ш}$.

Из сказанного следует, что «старый подход» к построению вероятностных моделей поведения модуля деформации, основанный на многомерном корреляционном анализе экспериментальных данных [4, 5], позволяет получать несравненно более точные прогнозы значений E_0 по сравнению с «новым подходом» [2], реализованным в методике РостовДонТИ-СИЗа. Последняя, таким образом, представляет собой лишь логическую ошибку интерпретации результатов исследований, использование которой еще для одного «нового подхода» [6] приводит в конечном итоге к значениям модуля деформации как функции случайных чисел [3].

Литература

1. Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. СНиП 2.02.01-83. – М.: Стройиздат, 1985. – 40 с.
2. Текучев Ю.Б., Литвинов В.Е. Новый подход к определению модуля общей деформации грунтов по результатам компрессионных испытаний // Инженерная геология. – 1991. – № 6. – С. 129-133.
3. Ткачук Э.И. «Новый подход к определению модуля общей деформации грунтов» и его последствия // Проблемы геологии, полезных ископаемых и рационального природопользования: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 28 нояб. 2003 г. /Юж-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2003. – С. 33-37.
4. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. Е.М. Сергеева, Р.С. Зиянгирова. – М.: Недра, 1986. – 254 с.
5. Ткачук Э.И. Статистические методы при решении инженерно-геологических задач. – Новочеркасск: НПИ, 1975. – 98 с.
6. Конашинская Е.П., Текучев Ю.Б. Определение модуля общей деформации лессовых грунтов по результатам статического зондирования // Современная гидрогеология на рубеже веков: Матер. междунар. конф. – Новочеркасск-Ростов-на-Дону, 2001. – С. 74-76.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, ЮРГТУ (НПИ), каф. ГГиИГ,
т. 55-352, 2-78-23, e-mail: [e tkachuk@ramler.ru](mailto:tkachuk@ramler.ru)

УДК 622.27:519.86

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД

*В.А. Шестаков, Ю.И. Разоренов, Т.В. Литовченко,
В.Н. Шаляпин, А.С. Мусукаев*

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Разработаны соответствующие новым экономическим условиям критерии экономической оценки и экономико-математические модели сравнительной оценки вариантов открыто-подземной добычи руд.

Анализ научных работ, посвященных проблемам разработки рудных месторождений одновременно или последовательно (поочередно) открытым и подземным способами, позволяет судить о многообразии методических подходов к решению задач проектирования технологии горных

работ при открыто-подземном, открытом и подземном способах разработки, с помощью которых можно выбрать направления совершенствования и параметры, обеспечить снижение капитальных и эксплуатационных затрат, повышение качества и ценности добываемых полезных ископаемых.

Наиболее широко в литературе освещены научно-методические положения проектирования карьеров и рудников при рассмотрении их раздельно, исходя из положения обеспечения их индивидуальной экономической даже при открыто-подземном способе разработки.

Если проектирование карьера и рудника осуществляется на основе индивидуальной оценки эффективности их работы и обоснования параметров и технологии добычи и переработки, то в современных экономических условиях экономико-математическая модель разработки вновь осваиваемого рудного месторождения открыто-подземным способом имеет следующий вид (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_c+t_p} \Pi_{prt} = \sum_{t=1}^{t_p} A_{kt} (\Pi_{dkl} - c_{dkl}) / (1+E)^{t_p-1} + \sum_{t=1}^{t_p} A_{pt} (\Pi_{dpt} - c_{dpt}) / (1+E)^{t_p-1} - \sum_{t=1}^{t_{ck}} K_{kt} (1+E_k)^{t_{ck}} - \sum_{t=1}^{t_{cp}} K_{pt} (1+E_k)^{t_{cp}} - \sum_{t=1}^{t_{co}} K_{ot} (1+E_k)^{t_{co}}, \quad (1)$$

где t_{ck} , t_{cp} , t_{co} и t_p – срок строительства предприятия (карьера, рудника, обогатительной фабрики) и время разработки месторождения (или другой расчетный срок сравнительной оценки вариантов), лет; A_{kt} и A_{pt} – производственная мощность карьера и рудника в t -й год, т/год; Π_{dkl} и c_{dkl} – извлекаемая ценность рудной массы, добываемой на карьере и эксплуатационные затраты на ее добычу и обогащение в t -й год, руб./т; Π_{dpt} и c_{dpt} – извлекаемая ценность рудной массы, добываемой на руднике и эксплуатационные затраты на ее добычу и обогащение в t -й год, руб./т; K_{kt} , K_{pt} , K_{ot} – величина капиталовложений для строительства карьера, рудника и обогатительной фабрики в t -й год, руб.; E_k – коэффициент, характеризующий величину процентной ставки за кредит для строительства предприятия, доли ед.;

E – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени, доли ед.

Если освоение месторождения осуществляется поочередно сначала карьером, а затем, спустя какое-то время, рудником, то критерий оценки такого варианта будет иметь вид (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_{kp}+t_{ck}} \Pi_{prt} = \sum_{t=1}^{t_k} A_{kt} (\Pi_{dkl} - c_{dkl}) / (1+E)^{t_k-1} - \sum_{t=1}^{t_{ck}} K_{kt} (1+E_k)^{t_{ck}} - \sum_{t=1}^{t_{co}} K_{ot} (1+E_k)^{t_{co}} + \frac{1}{(1+E)^{t_k}} \sum_{t=1}^{t_p} A_{pt} (\Pi_{dpt} - c_{dpt}) / (1+E)^{t_p-1} - \sum_{t=1}^{t_{cp}} K_{pt} \frac{(1+E_k)^{t_{cp}}}{(1+E)^{t_k-t_{cp}}}, \quad (2)$$

где $t_{kp} = t_{ck} + t_{ck} + t_p$, лет; t_{ck} – время строительства карьера, лет; t_k и t_p – время эксплуатации карьера и рудника, лет; t_o – время строительства обогатительной фабрики, лет; A_{kt} и A_{pt} – производственная мощность карьера и рудника в t -й год; Π_{dkl} и c_{dkl} – извлекаемая ценность добываемой рудной

массы карьера и затраты на ее добычу и обогащение в t -й год, руб./т; K_{kt} и K_{pt} – капиталовложения в строительство карьера и рудника в t -й год, руб.; K_{ot} – капиталовложения в строительство обогатительной фабрики в t -й год, руб.; E – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени, доли ед.; E_k – коэффициент, характеризующий величину процентной ставки за кредиты для капитальных работ, доли ед.

Если освоение месторождения осуществляется поочередно сначала рудником, затем карьером (фактически по тем же запасам повторно), то критерий оценки варианта будет иметь вид (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_{кр}+t_{ср}} \Pi_{прт} = \sum_{t=1}^{t_p} A_{pt} (\Pi_{дрт} - c_{дрт}) / (1+E)^{t-1} - \sum_{t=1}^{t_{ср}} K_{pt} (1+E_k)^{t_{ср}} - \sum_{t=1}^{t_{со}} K_{ot} (1+E_k)^{t_{со}} +$$

$$+ \frac{1}{(1+E)^{t_p}} \sum_{t=1}^{t_k} A_{kt} (\Pi_{дкт} - c_{дкт}) / (1+E)^{t_k-1} - \sum_{t=1}^{t_{ск}} K_{kt} \frac{(1+E_k)^{t_k}}{(1+E)^{t_p-t_{ск}}}. \quad (3)$$

При этом варианте обычно карьером дорабатываются запасы, которые остались после работы рудника, поэтому содержание металлов в добываемой рудной массе карьера значительно меньше, чем в рудной массе рудника. Практически это вариант повторной разработки месторождения открытым способом. Анализируя эти три варианта, можно отметить, что самым малоэффективным является третий вариант. Если месторождение залегает неглубоко, то более эффективным по сравнению с третьим вариантом является второй вариант, поскольку карьером и рудником разрабатываются запасы примерно одинакового качества. Первый вариант при прочих равных условиях более предпочтителен по сравнению со вторым и третьим вариантами, благодаря тому, что он обеспечивает более высокую производственную мощность горно-обогатительного предприятия, а следовательно, более низкую себестоимость добычи и переработки рудной массы при меньших удельных капиталовложениях на строительство карьера, рудника и обогатительной фабрики. Вместе с тем при обычно применяемом индивидуальном рассмотрении карьера и рудника даже при первом варианте одновременной разработки месторождения карьером и рудником, но с раздельной оценкой рудной массы карьера и рудника, так же как и при последовательной отработке запасов карьером и рудником или рудником и карьером, упускается возможность шихтовки бедной рудной массы карьера и богатой рудника и обеспечения более высокого среднего извлечения металлов при обогащении. Поскольку обычно содержание металлов в рудной массе карьера значительно меньше, чем в рудной массе рудника (а часто даже в 2-4 раза), то более предпочтителен второй вариант совместной добычи и переработки рудной массы карьера и рудника благодаря обеспечению более высокого среднего извлечения металлов при обогащении. Это увеличение извлечения при обогащении тем больше, чем больше разница в содержании металлов в рудной массе карьера и рудника.

В качестве критерия экономической оценки эффективности вариантов технологической схемы комплекса: «карьер – рудник – обогатитель-

ная фабрика» наиболее полно может служить сумма дисконтированной прибыли за какой-то расчетный период времени за вычетом капитальных затрат на строительство карьера, рудника и обогатительной фабрики с учетом величины банковских процентов за кредиты. В частности, применительно к условиям вновь строящихся горно-обогатительных предприятий критерий эффективности за период совместной работы карьера и рудника в общем виде может быть представлен формулой (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_c+t_p} \Pi_{prt} = \sum_{t=1}^{t_p} (A_{kt} + A_{pt}) (\Pi_{дпт} - c_{дпт}) / (1+E)^{t_p-1} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{t_{ci}} K_{it} (1-E_k)^{t_{ci}} - \\ - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{t_p} K_{pit} \frac{(1+E_k)^{t_p}}{(1+E)^{t_p-1}},$$

где t_p – время совместной работы рудника и карьера, лет; n – число объектов технологической схемы предприятия (в данном случае $n=3$, т.е. рудник, карьер, и обогатительная фабрика); A_{pt} и A_{kt} – производственная мощность рудника и обогатительной фабрики в t -й год, т/год; $\Pi_{дпт}$ и $c_{дпт}$ – извлекаемая ценность добываемой и обогащаемой рудной массы и затрат на ее добычу и обогащение, руб./т; t_{ci} – срок строительства i -го объекта технологической схемы предприятия до начала его эксплуатации, лет; K_{it} – капиталовложения в строительство i -го объекта технологической схемы предприятия в t -й год, руб./год; E – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени, доли ед.; E_k – коэффициент, учитывающий величину процентной ставки за кредит, доли ед.

В условиях действующих предприятий на карьере и руднике капиталовложения требуются только на вскрытие и подготовку новых запасов и реконструкцию или техническое перевооружение, а на обогатительной фабрике – на ремонт, реконструкцию или техническое перевооружение в период работы предприятия (или какой-то расчетный период времени). В этом случае критерий оценки будет иметь вид (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_c+t_p} \Pi_{prt} = \sum_{t=1}^{t_p} (A_{kt} + A_{pt}) (\Pi_{дпт} - c_{дпт}) / (1+E)^{t_p-1} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{t_p} K_{pit} \frac{(1+\gamma_6 E_k)^{t_p}}{(1+E)^{t_p-1}},$$

где γ_6 – доля капитальных затрат за счет банковских кредитов, доли ед.

Определение входящих в эти формулы показателей извлекаемой ценности добываемой на карьере и руднике и перерабатываемой совместно на обогатительной фабрике рудной массы и затрат на ее добычу и переработку, представляет определенную трудность.

Следует иметь в виду, что карьер и рудник добывают, как правило, рудную массу разного качества. Если содержание какого-то полезного компонента в балансовых запасах руды карьера равно c_k , а разубоживание при добыче равно P_k , то в рудной массе с карьера содержание полезного компонента будет равно

$$a_k = c_k(1-P_k).$$

Аналогично содержание полезного компонента в добытой рудной массе рудника после ее перепуска через рудоспуски определится по формуле

$$a_p = c_p(1 - P_p),$$

где c_p – содержание полезного компонента в руде балансовых запасов рудника, %, г/т; P_p – разубоживание руды при добыче на руднике, доли ед.

Средневзвешенное содержание какого-то полезного компонента в рудной массе, поступающей на обогатительную фабрику, будет равно (%, г/т):

$$a_{cp} = \frac{A_k c_k (1 - P_k) + A_p c_p (1 - P_p)}{A_k + A_p}.$$

Содержание вредного для флотации компонента в рудной массе будет равно (%):

$$b_{cp} = \frac{A_k b_k + A_p b_p}{A_k + A_p},$$

где b_k – содержание вредного для флотации компонента в рудной массе карьера, %; b_p – содержание вредного компонента в рудной массе рудника, %; A_k и A_p – производственная мощность карьера и рудника (и обогатительной фабрики), т/год.

Средневзвешенное разубоживание руды карьера и рудника определится по формуле (доли ед.):

$$P = \frac{A_p P_p + A_k + P_k}{A_p + A_k},$$

а средневзвешенные эксплуатационные затраты (руб./т):

$$C_{dkp} = \frac{A_k C_{dk} + A_p C_{dp}}{A_k + A_p} + C_{до},$$

где C_{dk} , C_{dp} , $C_{до}$ – себестоимость добычи на карьере и руднике и переработки на обогатительной фабрике, руб./т.

УДК 622.015/016

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОТКРЫТОГО И ПОДЗЕМНОГО СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*В.А. Шестаков, Ю.И. Разоренов, Т.В. Литовченко,
И.Г. Тутушкин, М.А. Земляной*

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Применительно к условиям угольной промышленности разработаны критерии экономической оценки и экономико-математические модели для сравнительной оценки открытого и подземного способов разработки угольных месторождений.

На современном этапе благодаря успехам горного машиностроения открытые горные работы оснащены высокопроизводительным горно-транспортным оборудованием и их объемы, и удельный вес в добыче почти всех полезных ископаемых резко возросли. Так, в последние годы удельный вес открытого способа в добыче угля составил около 60 %, железной руды более 85 %, руд цветных металлов 67 %, горно-химического сырья 40 % и почти 100 % в добыче нерудных полезных ископаемых и строительных материалов.

В целом направление на преимущественное развитие открытых горных работ в соответствующих горно-геологических и экономических условиях несомненно правильно, так как открытый способ имеет ряд неоспоримых преимуществ. Это, прежде всего, более высокий уровень производительности труда по горной массе (в 4-6 раз больше, чем на подземном) и безопасности работ (травматизм в 5-6 раз меньше, чем на подземном). В ряде случаев открытый способ обеспечивает и более полное извлечение запасов месторождений. Поэтому он должен и в будущем развиваться высокими темпами.

Однако в определенных горно-геологических и экономических условиях открытый способ добычи угля имеет существенные недостатки. Так, в большинстве случаев качество добываемого разрезами угля существенно ниже, чем угля подземной добычи как в силу природных особенностей (верхние части месторождений), так и в силу особенностей технологии, когда вместе с углем добываются породные прослойки больших размеров. Примерами может служить работа Экибастузских и Красноярских разрезов, добывающих уголь, в котором зольность достигает 50 % и больше. На многих угольных разрезах добывается уголь, теплота сгорания которого не превышает 4-4,5 тыс. ккал/ кг, в то время как теплота сгорания условного топлива принята равной 7 тыс. ккал/ кг, а теплота сгорания угля от подземной добычи, например на некоторых шахтах Восточного Донбасса, составляет от 8 до 8,5 тыс. ккал/кг, а уголь шахты «Тацинская» (уничтоженной как нерентабельная, потому что себестоимость добычи была равна 250 руб./т) имел теплотворную способность, равную 9 тыс. ккал/кг. Поэтому для правильного решения задачи сравнительной оценки открытого и подземного способов разработки и выбора стратегии на преимущественное развитие того или иного способа разработки угольного бассейна, необходимо применять критерии оценки, наиболее полно учитывающие не только разницу в капитальных и эксплуатационных затратах на строительство и эксплуатацию горного предприятия, как это принято до сих пор, но и качество добываемого, перерабатываемого и транспортируемого угля. Потому что чем ниже качество добываемого угля, тем меньше конкурентоспособность угля из карьера по сравнению с углем подземной добычи. Следует также иметь в виду, что с глубиной разработки преимущества угольных разрезов снижаются, а недостатки растут. Увеличивается также ущерб окружающей среде, который значительно больше, чем при подземном способе.

Особенно тщательно должен решаться вопрос о выборе способа разработки на крупных объектах. Потому что чем больше производственная мощность карьера, тем больше расстояние транспортирования угля при его реализации, что при низком качестве угля не может быть экономически выгодным. Из-за неправильной оценки того или иного способа разработки при больших масштабах горных работ подчас наносится огромный, иногда непоправимый ущерб.

В большинстве случаев для решения задачи о выборе того или иного способа разработки и границах его применения необходимы детальные технико-экономические расчеты. Вопрос может стоять так: какую часть месторождения отрабатывать открытым способом, а какую часть – подземным, и в какой очередности их применять (сначала один, потом другой или наоборот, если одновременно, то при какой степени совмещения их во времени и пространстве).

Если возможно применение какого-то одного способа разработки – открытого или подземного, то возникает задача сравнения этих способов. Если возможна отработка обоими способами вместе или в той или иной последовательности, то должна решаться задача об определении границ оптимального применения обоих способов.

Оценка эффективности открытого, подземного и открыто-подземного способов разработки и различных вариантов при разной последовательности отработки карьерных и шахтных полей или разной степени одновременной и совместной работы угольного разреза и шахты может быть определена на основе нового комплексного методического подхода, учитывающего все положительные и отрицательные последствия их работы. В связи с изменением экономических условий в стране, в частности, в сфере финансирования капитальных работ, дефицитности инвестиций, введением платности недр, изменения многих цен и тарифов и др. необходимо решать все задачи с учетом этих особенностей при обязательном учете качества добываемого угля, направлений его использования и стадий переработки.

Поскольку открытый и подземный способы отличаются практически по всем технико-экономическим показателям, их сравнение может быть правильно осуществлено лишь при комплексной оценке с учетом всех различий по текущим и капитальным затратам, по расходу рабочей силы, производственной мощности предприятия, качеству добываемого полезного ископаемого, по величине потерь и разубоживания, по ущербу окружающей среде и т.п. с учетом экономических последствий на всех стадиях добычи, транспортирования, обогащения и других стадий переработки и использования.

Применительно к условиям угольной промышленности сравнительная оценка способов разработки может быть осуществлена на основе критерия суммы дисконтированной прибыли за вычетом капитальных затрат (с учетом времени строительства и процентной ставки за кредиты).

Для подземного способа критерий имеет вид (руб.):

$$\sum_{t=1}^{t_{\text{сп}}+t_{\text{рп}}} \Pi_{\text{рпт}} = \sum_{t=1}^{t_{\text{рп}}} A_{\text{пт}} (\Pi_{\text{дпт}} - c_{\text{дпт}}) / (1+E)^{t_{\text{рп}}-1} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{t_{\text{сп}i}} K_{\text{пт}i} (1+E_{\text{к}})^{t_{\text{сп}i}},$$

для открытого способа:

$$\sum_{t=1}^{t_{\text{со}}+t_{\text{по}}} \Pi_{\text{рот}} = \sum_{t=1}^{t_{\text{по}}} A_{\text{от}} (\Pi_{\text{доот}} - c_{\text{доот}}) / (1+E)^{t_{\text{по}}-1} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{t_{\text{со}i}} K_{\text{от}i} (1+E_{\text{к}})^{t_{\text{со}i}},$$

где $t_{\text{ро}}$ и $t_{\text{рп}}$ – расчетные сроки эксплуатации месторождения открытым и подземным способами, лет; $t_{\text{со}i}$ и $t_{\text{сп}i}$ – сроки строительства предприятия i -й стадии добычи и переработки при открытом и подземном способах разработки, лет; $A_{\text{пт}}$ и $A_{\text{от}}$ – производственная мощность предприятия при подземном и открытом способах разработки в t -й год, т/год; $K_{\text{пт}i}$ и $K_{\text{от}i}$ – капиталовложения в строительство предприятия i -й стадии добычи и переработки в t -й год при подземном и открытом способе разработки, руб.; $\Pi_{\text{дпт}}$ и $\Pi_{\text{доот}}$ – извлекаемая ценность добываемого полезного ископаемого в t -й год при подземном и открытом способах разработки, руб./т; $c_{\text{дпт}}$ и $c_{\text{доот}}$ – эксплуатационные затраты на добычу и переработку в t -й год при подземном и открытом способах разработки, руб./т; E – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени, доли ед.; $E_{\text{к}}$ – коэффициент, характеризующий величину процентной надбавки за кредит, доли ед.

При построении экономико-математической модели сравнительной оценки способов разработки следует учитывать, прежде всего, различие в качестве добываемой горной массы. Необходимо иметь в виду, что, например, при открытом способе разработки, по сравнению с подземным, качество добываемой горной массы обычно меньше, чем при подземном, иногда в несколько раз меньше. Поэтому требуется строить обогатительные фабрики, мощность которых должна быть больше во столько же раз. И даже более, так как при меньшем качестве добываемой горной массы меньше выход концентрата при обогащении. А это значит, что при открытом способе на стадиях обогащения и других стадиях переработки и использования угля больше не только капитальные затраты на строительство обогатительной фабрики, но и эксплуатационные затраты на этих предприятиях. Коэффициент необходимого увеличения производственной мощности обогатительной фабрики при открытом способе разработки по сравнению с подземным способом для производства того же количества конечной продукции (концентратов) определится по формуле

$$K_{\text{оф}} = \frac{a_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{оп}}}{a_{\text{о}} \cdot \varepsilon_{\text{оо}}},$$

где $a_{\text{п}}$ и $a_{\text{о}}$ – содержание углерода в добытой горной массе при подземном и открытом способах, %; $\varepsilon_{\text{оп}}$ и $\varepsilon_{\text{оо}}$ – выход концентрата при обогащении угля подземной и открытой добычи, доли ед.

Коэффициент увеличения производственной мощности предприятия по переработке концентрата, например, коксохимического или металлургического завода, определится по аналогичной формуле

$$K_{мз} = \frac{\beta_n \cdot \varepsilon_{мп}}{\beta_o \cdot \varepsilon_{мо}},$$

где β_n и β_o – содержание углерода в концентрате при подземном и открытом подземном способах, %; $\varepsilon_{мп}$ и $\varepsilon_{мо}$ – выход кокса или металла при металлургическом переделе угольных концентратов от подземной и открытой добычи, доли ед. При этом коэффициенты сквозного извлечения полезного компонента будут равны:

$$K_o = K_{до} \cdot K_{оо} \cdot K_{по},$$

$$K_n = K_{дп} \cdot K_{он} \cdot K_{мп},$$

где $K_{до}$ и $K_{дп}$ – коэффициенты извлечения из недр при открытом и подземном способах, доли ед.

С учетом особенностей современного финансирования капитальных работ эффективность открытого способа разработки в ряде случаев может оказаться существенно ниже подземного, поскольку качество добываемой горной массы при открытом способе меньше, чем при подземном.

УДК 658.012.011.56.004.14:622

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В ПРОЕКТЕ СУС

И.Л. Коваленко, В.М. Калинин, И.Ю. Иванов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Показан путь создания системы автоматизированного календарного планирования горных работ на основе проекта СУС, разрабатываемого фирмой CYCORP INC. Проект предусматривает создание мультиконтекстуальной базы знаний в совокупности с машиной вывода, позволяющих интегрировать разнородные данные и интерпретировать их осмысленным образом в контексте решаемых задач.

Цели у проекта СУС две. Одна – такая же, как у любого исследовательского проекта – показать возможности новой технологии для решения поставленных задач. Этим исследовательский проект отличается от коммерческого. Специалистам, работающим в промышленности, при всех материальных преимуществах их положения, для этого обычно не хватает времени, свободы и технической эрудиции. Кроме того, на них давит груз традиций и проблем совместимости с ранее принятыми решениями.

Другая цель связана с особенностями конкретной выбранной технологии, а именно – системы представления знаний и логического вывода OpenCus. Она может быть сформулирована следующим образом: получение знаний о контексте решаемой задачи, представленных неким «надлежащим образом». Поясним это ниже.

Главная проблема, возникающая при построении сложных информационных систем – проблема интеграции. Большое количество подсистем взаимодействуют друг с другом, данные поступают из большого количества

ва разнородных источников, но для того, чтобы использовать эти данные, нужно сначала изучить язык, на котором они представлены. Для преодоления этих трудностей было предложено много разных способов: сюда относятся, в частности, популярный некоторое время назад язык XML, при помощи которого данные можно снабжать описанием их структуры; различные средства самоописания классов в ООП и многое другое. Создатели системы OpenCyc продвинулись в этом направлении дальше других. Преимущества созданного ими языка представления знаний CycL (являющегося расширением языка логики предикатов первого порядка) в совокупности с базой знаний настолько велики, что выдвигают его на роль эталона представления знаний. Вот некоторые из них:

- строго формальный характер языка, когда любые знания представляются в виде «микротеории», представляющей собой совокупность аксиом логики предикатов;
- возможность описания не только структуры данных, но и их смысл, в частности, соотношение данных с понятиями, актуальными в интерпретирующей системе;
- единый язык для всех областей знания;
- возможность использования системы компьютерами, например, для преобразования данных к другим существующим стандартам;
- повышение уровня постановки задач. Вместо того, чтобы предписывать системе какие действия она должна выполнить для решения задачи, ей сообщаются условия этой задачи. Как получить решение, она решает сама.

Таким образом, микротеория, созданная для решения какого-то класса задач в какой-то системе, может представлять ценность не только в рамках этой системы, но и самостоятельно. Знаменитый философ считал, что в любой науке столько науки, сколько в ней математики. Вероятно, в наше время он мог бы сказать, что науку можно считать таковой в той степени, в которой она сформулирована на CycL.

Рассмотрим проект более детально. На рис. 1 изображена общая структурная схема проектируемой системы, как она представляется на данный момент. Размещение системы на двух хостах представляется целесообразным (хотя и не является обязательным) по следующим причинам.

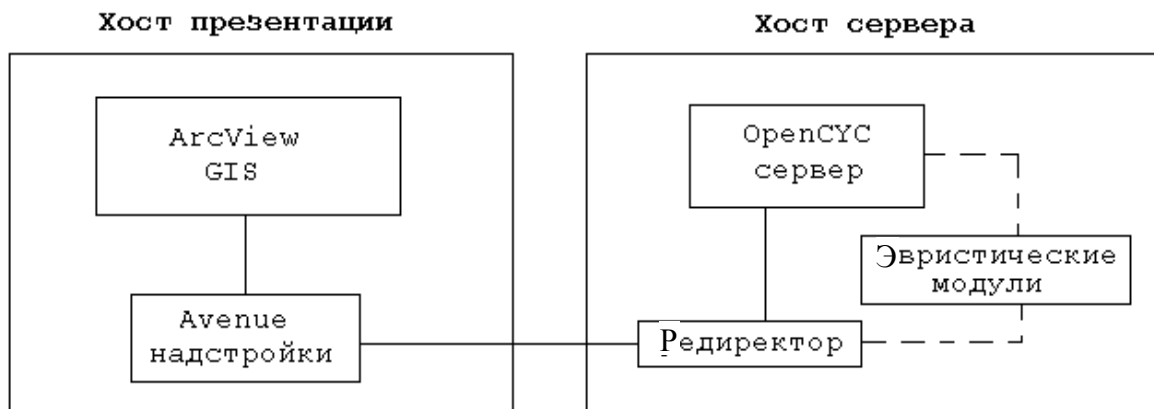


Рис. 1. Общая структурная схема проектируемой системы

Во-первых, для организации пользовательского интерфейса и для представления полученных решений предполагается использовать ГИС ArcView, в использовании которой на кафедре МДиГ ЮРГТУ (НПИ) накоплен некоторый опыт, а все известные версии этой ГИС работают на платформе Win32. Не исключен вариант использования другой ГИС или даже графического пакета более общего назначения, как TurboCAD или AutoCAD. Все такие пакеты также работают на Win32. В то же время сервер OpenCус, который будет выполнять содержательную часть задачи, целесообразно размещать на платформе Linux, так как это дает некоторые технические преимущества, связанные с возможностями подключения эвристических модулей (речь о них пойдет далее). Пока можно сказать, что эти преимущества связаны с единообразным представлением устройств, как файлов, в системах семейства Unix. Разумеется, следует принимать во внимание повышение производительности, связанное с параллельной работой разных подсистем на разных машинах, которое будет значительным, т.к. язык CусL, на котором формируются запросы к серверу и выполняется представление результатов, является языком очень высокого уровня, и соответственно затраты на обмен будут небольшими. Наконец, следует учитывать возможность подключения к серверу OpenCус нескольких пользовательских рабочих мест при работе в сети. Это тоже является аргументом в пользу размещения сервера под Linux, которая зарекомендовала себя как надежная платформа для сетевых серверов (чего пока нельзя сказать о существующих реализациях Win32).

Для того чтобы ГИС ArcView могла работать в предполагаемой роли, должны быть написаны к ней соответствующие настройки на языке Avenue.

Подключение клиента к серверу OpenCус выполняется по протоколу TCT/IP. Сервер работает только с запросами, приходящими с адреса localhost. Все, что имеется по этому поводу в документации, сводится к совету использовать редиректор. Написанный нами редиректор «обманывает» сервер, представляя информацию, приходящую извне, как свою. Трудности в его реализации связаны с асинхронным характером потоков ввода и вывода и непредсказуемостью инициативы сервера (как и клиента) в подключении и отключении от канала.

Построение информационных структур, представляющих решение каждой конкретной задачи календарного планирования, осуществляется сервером в виде совокупности формул на языке логики предикатов первого порядка; оптимизация выполняется в виде поиска по дереву возможных решений; то и другое может быть представлено в виде логического вывода в некоторой системе аксиом. Логический же вывод в OpenCус осуществляется при помощи двух механизмов. Одним из них является реализация классического принципа резолюции (дополненная, правда, эвристическими механизмами для оптимального выбора направления вывода) – это то, что можно назвать «чистой логикой». Другой механизм – это так называемые «эвристические модули». Они позволяют, используя особенности

предметов, о которых идет речь в обрабатываемых формулах – например, свойства входящих в формулы предикатов – получать новые формулы не путем последовательности логических шагов, а в виде некоего «озарения свыше». Накопленные эвристические модули вместе с базой знаний – главный капитал OpenCyc; они обеспечивают высокую эффективность вывода, намного превосходящую возможности конкурирующих систем.

Очень важно иметь возможность создавать собственные эвристические модули, это повышает на порядок степень владения системой. Как удалось установить, в сервере OpenCyc для этого имеются два способа. Можно создавать эвристические модули на языке SubL – «родном» языке сервера, некоем довольно урезанном подмножестве Common Lisp'a. В этом случае модуль является частью сервера. Чтобы определить, насколько эффективен таким образом созданный модуль, нужны дополнительные исследования. Второй способ – создавать внешние эвристические модули, которые в этом случае могут быть написаны на любом подходящем языке – Java, C или Common Lisp, и подключать их к серверу через интерфейс CYS API.

Таким образом, на данный момент выполнено следующее: развернут сервер OpenCyc; написан редиректор; установлены возможные способы создания эвристических модулей. Кроме того, найдены некоторые способы экспорта знаний из базы знаний OpenCyc – на случай, если окажется целесообразным использовать их в собственной машине вывода. Проведена также работа по извлечению, приведению в читабельный вид и сортировке по назначению и микротеориям констант и комментариев базы знаний OpenCyc.

Дальнейшая работа будет состоять в следующем: выбор констант базы знаний, релевантных решаемой задаче; построение микротеории; реализация системы представления и пользовательского интерфейса.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 55-3-56,
e-mail: mdg@mdg.srstu.novoch.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Троицкий А.И. Моделирование потерь активной мощности в радиальной линии при несимметрии линейных токов	4
Надтока И.И., Березкина С.Ю. Анализ ранговых распределений потребления энергоресурсов в Ростовской области	19
Левин В.М., Емельянов О.В. Модель для индикации дефектов силовых трансформаторов по результатам хроматографии	22
Крутиков Е.В. Моделирование химического источника тока в системе тягового электропривода с импульсным регулированием скорости	29
Смолин Г.К., Шапуров А.А. Математическое моделирование однофазного МГД-насоса	34
Сташинов Ю.П., Крутиков Е.В. Моделирование тягового электропривода с изменяемой структурой силовой части в среде <i>Matlab</i>	36
Иванов И.Ю., Шурыгин Д.Н. Построение поверхности распределения оседаний земной поверхности для выработки произвольной формы методом наименьших квадратов	42
Ткачук Э.И. Вероятностные модели поведения модуля деформации глинистых пород территории г. Ростова-на-Дону	46
Шестаков В.А., Разоренов Ю.И., Литовченко Т.В., Шаляпин В.Н., Мусукаев А.С. Экономико-математическая модель сравнительной оценки вариантов открыто-подземной добычи руд	51
Шестаков В.А., Разоренов Ю.И., Литовченко Т.В., Тутушкин И.Г., Земляной М.А. Экономико-математическая модель сравнительной оценки открытого и подземного способов разработки угольных месторождений	55
Коваленко И.Л., Калинин В.М., Иванов И.Ю. Система автоматизированного календарного планирования горных работ в проекте СУС	59

Научное издание

Моделирование. Теория, методы и средства

Материалы IV Международной научно-практической конференции
Часть 3

Редактор: Е.В. Кулыгина
Компьютерная верстка: М.К. Аверьянова

Подписано в печать 25.05.04 г.
Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Печ. л. 3,93. Уч.-изд. л. 4,35. Тираж 100 экз. Заказ 47-1737.

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)
Адрес университета и центра оперативной полиграфии:
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. 55-222

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

*Материалы
IV Международной научно-практической
конференции*

Часть 4

*9 апреля 2004 года
г. Новочеркасск*

Новочеркасск 2004

УДК 519.688
ББК 22.18 в6
М 74

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки РФ;
Северо-Кавказский научный центр высшей школы;
Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт);
Технический университет Ильменау (ФРГ);
Редакция журнала «Известия вузов. Электромеханика»;
Редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион.
Технические науки»;
Ростовский государственный медицинский университет

Оргкомитет конференции:

Н.И. Горбатенко (РФ), профессор – председатель;
Ю.А. Бахвалов (РФ), профессор;
Г. Вурмус (ФРГ), профессор;
Г. Йегер (ФРГ), профессор;
Е. Калленбах (ФРГ), профессор;
М.В. Ланкин (РФ), доцент – зам. председателя;
Н.Ф. Никитенко (РФ), профессор;
А.В. Павленко (РФ), профессор;
В.А. Плаксин (РФ), доцент;
В.Н. Чернов (РФ), профессор

Редакционная коллегия:

Н.И. Горбатенко, д-р техн. наук, профессор – ответственный редактор;
М.В. Ланкин, канд. техн. наук, доцент – зам. ответственного редактора;
В.А. Плаксин, канд. техн. наук, доцент

М 74 Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы IV Ме-
ждународ. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 9 апр. 2004 г.: В 4 ч. / Юж.-
Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – Ч. 4. – 64 с.

ISBN 5-88998-462-4

Сборник содержит материалы по нескольким научным направлениям. В четвер-
тую часть вошли материалы о математическом моделировании информационно-
измерительных и вычислительных систем; физическом моделировании в науке и технике;
учебно-методические вопросы преподавания основ моделирования в учебном процессе.

УДК 519.688

ISBN 5-88998-462-4

© Южно-Российский государственный
технический университет (НПИ), 2004
© Авторы, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт) – крупнейший вуз на юге России, имеющий вековой опыт исследований в различных отраслях науки и техники и обширные научно-технические контакты, – выступил инициатором проведения ряда Международных дистанционных научно-практических конференций. Такая форма проведения конференций стала возможной в результате широкого развития телекоммуникационных технологий, в том числе Internet.

В апреле 2004 года на базе ЮРГТУ (НПИ) проходила IV Международная научно-практическая конференция «Моделирование. Теория, методы и средства». В работе конференции приняли участие ученые и специалисты – представители высших учебных заведений, НИИ, научно-производственных предприятий Москвы, Екатеринбурга, Новосибирска, Краснодара, Иркутска, Ростова-на-Дону, Казани, Томска, Тулы, Оренбурга, Владивостока, Орла, Ставрополя, Таганрога, Перми, Ижевска, Новочеркасска, Шахты и других городов.

На конференцию представлено 72 доклада, которые вошли в сборник, состоящий из четырех частей, в соответствии с научными направлениями.

Первая часть содержит публикации о математических моделях в электротехнике и магнитной гидродинамике; математических моделях в теплотехнике и гидравлике; математическом моделировании социальных и экономических процессов; математических моделях в медицине, биологии и экологии.

Вторая часть содержит материалы, посвященные математическому моделированию технологических процессов; математическим моделям в строительстве, математическим моделям в химии и металлургии.

В третьей части рассмотрены вопросы математических моделей в энергетике и электромашиностроении; математических моделей в геологоразведочной и горнодобывающей отраслях.

В четвертую часть вошли материалы о математическом моделировании информационно-измерительных и вычислительных систем; физическом моделировании в науке и технике; учебно-методические вопросы преподавания основ моделирования в учебном процессе.

Организаторы выражают уверенность, что конференция послужит обобщению и распространению научных результатов, оказанию методической помощи молодым ученым и аспирантам, а также стимулированию контактов между учеными России и зарубежья, с благодарностью примут замечания и пожелания.

Оргкомитет

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА РАЗМНОЖЕНИЯ ОЦЕНОК

С.В. Токарева, А.И. Шерстобитов

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты

Рассмотрен способ уменьшения погрешности обработки результатов измерений при использовании метода размножения оценок. Введение предлагаемых изменений позволит уменьшить значение среднеквадратической ошибки выделения полезной составляющей при малых значениях среднеквадратического отклонения аддитивной шумовой составляющей.

В работе [1] рассмотрен новый подход к обработке результатов измерений при априорной неопределенности, который позволяет размножить единственную реализацию исходных данных. При увеличении числа размножения исходной реализации анализируемого процесса наблюдается рост ошибки выделения полезной составляющей [1], увеличение вероятности ложной тревоги и падение вероятности правильного обнаружения аномальных измерений [2]. Одна из причин увеличения ошибки связана с тем, что при аппроксимации исходной реализации на покрытиях по методу наименьших квадратов полиномом второй степени, которые получаются в результате разбиения исходной реализации случайными ранжированными числами, распределенными по равномерному закону, происходит «переворот» аппроксимирующей функции, т.е. неверное определение ее коэффициентов.

Модель исходной реализации результатов измерений можно представить в следующем виде:

$$Y(t) = S(t) + \eta(t), \quad (1)$$

где $S(t)$ – детерминированная составляющая полезного сигнала; $\eta(t)$ – аддитивная шумовая составляющая, распределенная по закону Гаусса.

При проведении исследований в качестве модели детерминированной составляющей $S(t)$ выбирались параболическая, синусоидальная и экспоненциальная зависимости.

На основе машинного моделирования было получено семейство зависимостей вероятности «переворота» аппроксимирующей функции от среднеквадратичного отклонения аддитивной шумовой составляющей – $\sigma_{\text{ш}}$ и длины покрытия L (рис. 1). Значения среднеквадратичного отклонения шумовой составляющей при этом изменялось от 0,01 до 1; длина покрытия L изменялась от 5 до 15. Каждое значение вероятности «переворота» определялось по 1000 реализациям исходной модели (1).

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 1, показал, что изменение $\sigma_{\text{ш}}$ от 0,01 до 0,45 приводит к экспоненциальному характеру роста вероятности «переворота» квадратичной аппроксимирующей функции. При $\sigma_{\text{ш}} > 0,45$ все зависимости семейства асимптотически стремятся к предельному значению вероятности «переворота», которое равно 0,5.

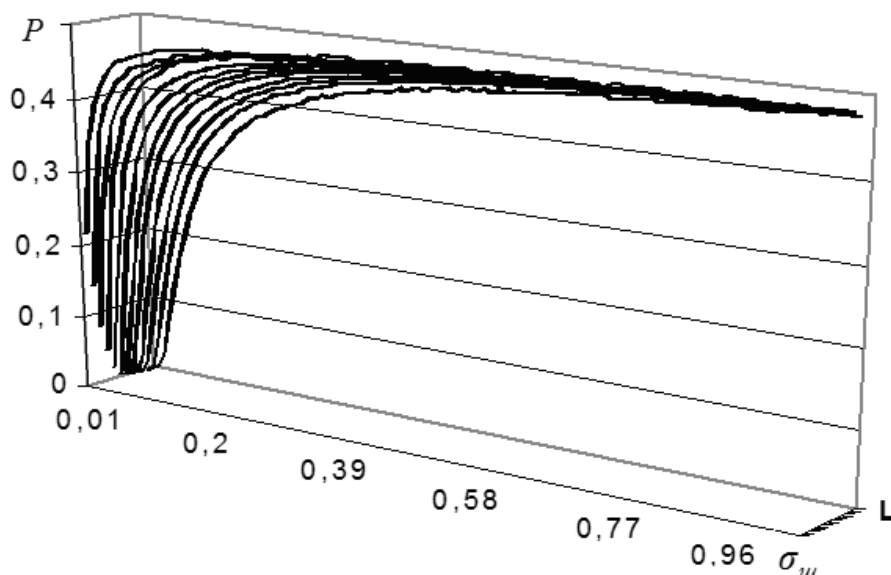


Рис. 1. График зависимости $P = f(\sigma_{ш} l)$

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Одной из основных причин роста среднеквадратичной ошибки выделения полезной составляющей является наличие «переворота» аппроксимирующей функции на покрытии.
- При различных длинах покрытий вероятность «переворота» сохраняет свою функциональную зависимость.
- Использование полинома более низкой степени (первой степени) позволяет существенно повысить точность выделения полезной составляющей методом разложения оценок при значении среднеквадратического отклонения шума более 0,45, что подтверждают результаты приведенные в работе [1].

Литература

1. Марчук В.И. Первичная обработка результатов измерений при ограниченном объеме априорной информации / Под ред. Румянцев К.Е. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 160 с.
2. Шерстобитов А.И., Токарева С.В. Сравнительный анализ модификации нового метода обнаружения аномальных измерений // Системный подход в науках о природе, человеке и технике: Материалы междунар. науч. конф. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 108 с.

346517, г. Шахты, ул. Достоевского, 70-а, кв. 42, e-mail: sh_s@mail.ru

УДК 681.324

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛИЗИЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

С.Б. Мальков, С.С. Макаров, В.И. Финаев

Таганрогский государственный радиотехнический университет

Рассматривается моделирование коллизий в информационно-вычислительных системах, применение совместного использования кабельных линий всеми компьютерами сети в режиме разделения времени, понижения вероятности возникновения коллизий.

При организации взаимодействия узлов в локальных вычислительных сетях основная роль отводится протоколу канального уровня. Наиболее популярный протокол канального уровня – Ethernet – рассчитан на параллельное подключение узлов сети к общей для них шине.

Для упрощения и удешевления аппаратных и программных решений разработчики локальных сетей остановились на совместном использовании кабеля всеми компьютерами сети в режиме разделения времени. Использование в локальных сетях очень простых конфигураций наряду с положительными имеет и негативные стороны, из которых наиболее неприятным является ограничение по производительности и надежности. Наличие только одного пути передачи информации, разделяемого всеми узлами сети, ограничивает пропускную способность сети тем, что только одна станция может передавать данные, а другие должны ждать окончания передачи. В случае, если канал связи оказывается свободным и несколько станций одновременно пытаются передать данные в него, то происходит наложение сигналов и соответственно искажение данных. Подобные ситуации принято называть коллизиями.

Для понижения вероятности возникновения коллизии применяют алгоритмы доступа к каналу связи. Существуют «непостоянный», «1-постоянный» и «р - постоянный» алгоритмы. Выбор того или иного из них зависит от конкретных параметров проектируемой сети, а выбранный вариант серьезно повлияет на пропускную способность и надежность сети.

Для решения задачи коллизий в канале связи наиболее применима теория систем массового обслуживания, так как канал связи – это прибор обслуживания, а множество станций образуют входной поток заявок.

Адресация сообщений между станциями задается матрицей интенсивностей адресных связей (МИАС). Матрица имеет следующий вид:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} 0 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & 0 & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \dots & 0 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где α_{ij} – интенсивность адресации от i -й станции к j -й станции.

Так как длина кадра определена в пределах от 64 до 1518 байт, то распределение длин сообщений зададим в виде матрицы:

$$B = \begin{vmatrix} 0 & \beta_{12} & \beta_{13} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & 0 & \beta_{23} & \dots & \beta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \beta_{n3} & \dots & 0 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где β_{ij} – средняя длина сообщения, адресованного i -й станцией к j -й станции.

Для канала связи плотность потока заявок определится по формуле:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \cdot \frac{\beta_{ij}}{speed}, \quad (3)$$

где *speed* – пропускная способность канала, выраженная в бодах.

Вероятность обнаружения канала связи занятым определится:

$$0. \quad (4)$$

Коллизия в канале связи может возникнуть за временной интервал Δt , равный передаче одного бита информации. Вероятность того, что в канал связи выйдет сразу k станций, определим по формулам Эрланга:

$$P_k = \frac{\rho^k}{k!} / \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!}. \quad (5)$$

Из (4) видно, что вероятность невыхода в канал ни одной станции будет равна:

$$P_0 = 1 / \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!}. \quad (6)$$

Размер коллизийного домена Mg определится как математическое ожидание событий, вызывающих коллизию:

$$Mg = \left(\sum_{i=2}^n P_i \right) / n.$$

Формулы (3)-(6) предусматривают ординарность потока заявок и если он не выполняется, то они дают неадекватные оценки.

Разработана имитационная модель для задач исследования возникновения коллизий в сетях с «непостоянным», «1-постоянным» и «р - постоянным» алгоритмами доступа к каналу связи. Входными данными для имитационной модели являются матрица интенсивностей адресных связей (1), матрица средних длин сообщений (2) и пропускная способность канала связи (*speed*). Заданы условия остановки процесса моделирования.

После выполнения моделирования отображаются: общее значение вероятности возникновения коллизии; вероятности возникновения коллизий, вызванных конкретным количеством станций; количество произведенных тактов моделирования.

УДК 517.958

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОТ НЕПРАВОМЕРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Ю.М. Брумштейн

Астраханский социальный институт

Рассмотрен состав объектов, входящих в компьютерные модели. Проанализированы средства защиты от неправомерной эксплуатации, корректировки, извлечения информации, а также применения однопользовательских версий как сетевых.

В разработку компьютерных моделей (КМ) вкладываются значительные средства, поэтому понятно стремление авторов защитить результаты своей интеллектуальной деятельности в условиях неполной и на практике неэффективной правовой защиты [1, 2]. КМ могут включать: программу (группу взаимосвязанных программ); базу (базы) данных (БД), в т.ч. библиотеки элементов; картографический материал и т.д.

Для защиты программ можно применить: ввод паролей при установке и привязку к конфигурации компьютера; запрос у разработчика «кодов авторизации» по выданной программой последовательности символов; применение «файла с лицензией», ограничивающей срок эксплуатации; счетчик числа запусков или календарной длительности использования; самопроверку программы при запуске на неизменность размера файла и его названия и т.д. Однако за счет средств декомпиляции эти виды защиты могут быть «взломаны». Наиболее надежное средство – электронные ключи (не всех типов!), но если программа проверяет ключ только в момент запуска, то с применением механических селекторов типа «4 компьютера – 1 принтер» можно однопользовательскую версию эксплуатировать как сетевую. Если программа при работе постоянно обращается к ключу, «обход» защиты иногда возможен с использованием «автоселекторов».

Даже если используется оригинальная структура хранения данных, БД модели могут быть «вскрыты», а информация извлечена для использования «вне модели». Поэтому эффективно хранение БД в зашифрованном виде с динамической расшифровкой по ходу работы (если шифрация «индивидуализирована для пользователя» и привязана к электронному ключу). Аналогичным образом может шифроваться: картографический материал (в т.ч. «многослойные» карты ГИС); библиотеки учитываемых эффектов и расчетных схем модели; если надо – содержание HELP-систем и др.

Литература

1. О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных – Закон РФ от 23.09.1992, №3523-1 (с изм. по ФЗ №177-ФЗ от 24.12.2002 г).
2. Об авторском праве и смежных правах – ФЗ от 09.07.1993 №5351-1 (в ред. 19.07.1995).

414040, г. Астрахань, пл. К. Маркса, д. 21, кв. 34, т. 8-8512-257120,
e-mail: brum2003@mail.ru.

УДК 681.3.067

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК, БАЗИРУЮЩАЯСЯ НА КОНЕЧНЫХ АВТОМАТНЫХ РАСПОЗНАВАТЕЛЯХ

В.А. Сердюк

«МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского

Описана математическая модель поведенческого метода, позволяющего обнаруживать информационные атаки путем выявления отклонений от штатного процесса функционирования автоматизированной системы.

За последние несколько лет наблюдается тенденция к увеличению числа информационных атак на ресурсы автоматизированных систем (АС). Это, в свою очередь, приводит к необходимости поиска новых методов их обнаружения. В настоящей работе приведено описание математической модели нового поведенческого метода выявления атак. Данный метод обеспечивает возможность обнаружения атак путем выявления отклонений от штатного режима сетевого взаимодействия между хостами АС. Примерами отклонений, являющихся признаками проведения сетевых атак, могут быть:

- наличие в АС сетевых запросов, синтаксис и семантика которых не соответствуют стандартам RFC, описывающих сетевое взаимодействие между хостами АС;
- наличие в АС сетевых запросов к несуществующим информационным ресурсам;
- наличие в АС сетевых запросов, обработка которых не поддерживается общесистемным и прикладным ПО, установленным в АС.

Разработанный метод обеспечивает возможность обнаружения сетевых атак путем выявления нарушений в синтаксисе и семантике автоматного языка L , позволяющего проводить описание процесса сетевого взаимодействия хостов АС по определенному протоколу. При этом язык L задается при помощи конечных автоматов-трансляторов следующего типа

$$A = \langle S, X, Y, s_0, \delta, \lambda, F \rangle,$$

где S – множество состояний; X – множество входных символов; Y – множество семантических операторов, выполняющих функции семантического анализа семантики данных, поступающих на вход автомата; $s_0 \in S$ – начальное состояние; $\delta: S \times X \rightarrow S$ – функция переходов; $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ – функция определения семантического оператора, который выполняется при анализе очередного входного символа; $F \subseteq S$ – множество заключительных состояний.

Рассмотрим модель поведенческого метода, основанного на конечных автоматах-трансляторах с использованием в качестве примера процедуры выявления сетевых атак на Web-серверы. Для этого первоначально опишем механизм сетевого взаимодействия между пользователем и Web-сервером. В основу такого механизма взаимодействия заложим запрос-ответную схему, построенную на базе протокола HTTP, который определен в стандарте RFC _____. В соответствии с этим стандартом пользователь, прежде чем начать взаимодействие с Web-сервером, формирует HTTP-запрос, формат которого показан на рис. 1.

```
<Метод запроса> <Идентификатор ресурса> <Параметры доступа> <Версия HTTP> <CRLF>
[<Параметр 1>:<Значение><CRLF>
<Параметр 2>:<Значение><CRLF>
...
<Параметр n>:<Значение><CRLF>]
<CRLF>
```

Рис. 1. Формат HTTP-запроса

Первая строка HTTP-запроса включает в себя следующие параметры:

- тип метода, на основе которого сформирован запрос. В стандарте RFC определены следующие базовые методы формирования HTTP-запроса: GET, POST, PUT и DELETE;
- идентификатор ресурса, которому направлен запрос. Идентификатор представляет собой строку формата URL;
- параметры доступа к ресурсу, используемые для передачи входных данных для программ, выполняемых на стороне Web-сервера (примерами таких программ являются ASP-сценарии, CGI-приложения, модули ColdFusion и др.). Параметры доступа указываются после символа «?» и представляют собой пары «<имя параметра> = <значение>», разделенные символом «&»;
- версию протокола HTTP, на основе которого сформирован запрос к Web-серверу. В настоящее время распространены две версии протокола HTTP – 1.0 и 1.1.

Первая строка запроса завершается символом «CRLF», обозначающим возврат и перевод каретки на новую строку. После первой строки в HTTP-запросе могут указываться дополнительные параметры, разделяемые символом «CRLF». Признаком завершения HTTP-запроса является два подряд идущих символа «CRLF».

Разработанный поведенческий метод обнаружения атак позволяет выявлять в потоке данных следующие типы HTTP-запросов, которые могут представлять опасность для Web-сервера:

- HTTP-запросы, синтаксис которых не соответствует требованиям стандарта RFC ____;
- HTTP-запросы, сформированные на основе методов, которые не поддерживаются прикладным ПО Web-сервера;
- HTTP-запросы, направленные к несуществующим ресурсам Web-сервера;
- HTTP-запросы, содержащие параметры, длина которых превышает заданные ограничения;
- HTTP-запросы, сформированные на основе версии протокола HTTP, которая не поддерживается ПО Web-сервера.

Выявление хотя бы одного из рассмотренных типов запросов означает обнаружение попытки проведения сетевой атаки на Web-сервер. Для обнаружения таких HTTP-запросов разработанный метод предполагает использование конечного автомата-транслятора A_{HTTP} . Для этого содержимое HTTP-запроса представляется в виде языка L_{HTTP} , цепочки которого содержат все возможные типы HTTP-запросов, которые могут быть посланы Web-серверу. На вход автомата A_{HTTP} поступает HTTP-запрос, представленный в виде последовательности символов X языка L_{HTTP} . Если в результате обработки входной цепочки символов автомат переходит в свое заключительное состояние, это означает, что анализируемый HTTP-запрос не представляет опасности для АС и не является сетевой атакой. В случае, если

автомат перейдет в одно из запрещенных состояний или же в результате выполнения одного из семантических операторов будет остановлена работа автомата, это будет означать выявление сетевой атаки в АС.

Структура конечного автомата A_{HTTP} , выполняющего функции распознавания языка L_{HTTP} , включает в себя четыре составных блока (рис. 2):

- блок распознавания и анализа типа метода формирования HTTP-запроса;
- блок распознавания и анализа идентификатора ресурса;
- блок распознавания и анализа параметров доступа к ресурсу;
- блок распознавания и анализа версии HTTP-протокола;
- блок распознавания и анализа параметров HTTP-запроса.

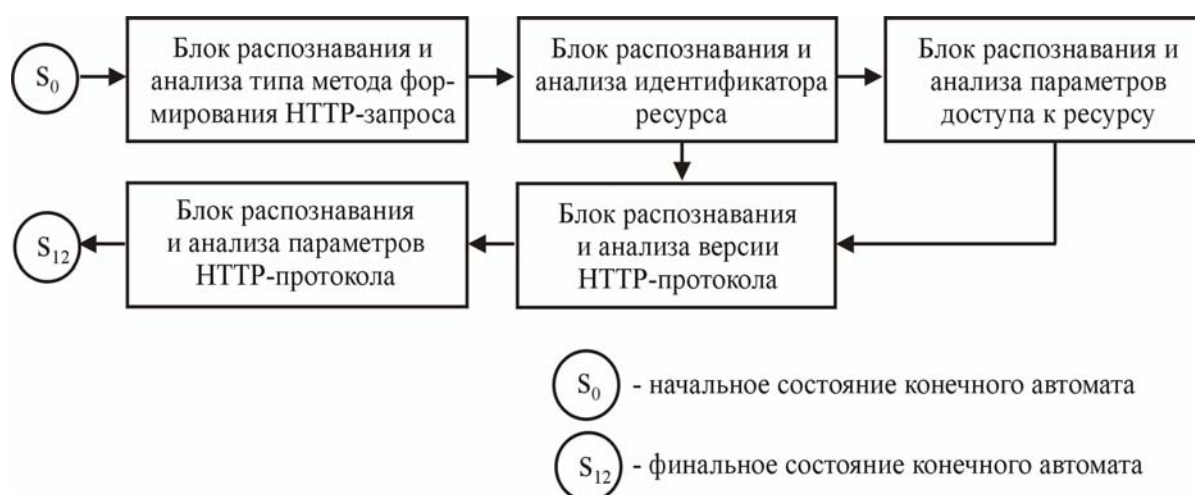


Рис. 2. Структура конечного автомата A_{HTTP}

Для выполнения семантических операций в процессе работы конечного автомата A_{HTTP} определяются следующие служебные переменные:

- S_{method} – одномерный строковый массив, элементы которого содержат символьные идентификаторы разрешенных методов формирования HTTP-запросов;
- L_{URL} – числовая переменная, определяющая максимальную длину идентификатора ресурса;
- S_{URL} – одномерный строковый массив, элементы которого содержат идентификаторы ресурсов, хранящихся на Web-сервере;
- L_{Nquery} – числовая переменная, определяющая максимальное количество параметров доступа к ресурсу;
- $L_{VarLentgh}$ – числовая переменная, определяющая максимальную длину строкового имени параметра доступа к ресурсу Web-сервера и параметра HTTP-запроса;
- $L_{ValLentgh}$ – числовая переменная, определяющая максимальную длину строкового значения параметра доступа к ресурсу Web-сервера и параметра HTTP-запроса;

- $L_{Nparams}$ – числовая переменная, определяющая максимальное количество параметров HTTP-запроса;
- $S_{Versions}$ – одномерный строковый массив, содержащий номера версий протокола HTTP, которые могут обрабатываться защищаемым Web-сервером;
- Z – служебная строковая переменная, предназначенная для временного хранения фрагментов анализируемого HTTP-запроса;
- i, j, k – служебные числовые переменные, которые используются в качестве счетчиков.

Значения переменных Z , i , j и k формируются в процессе работы конечного автомата, в то время как значения переменных L_{URL} , L_{query} , L_{Nquery} , $L_{VarLentgh}$, $L_{ValLentgh}$, $L_{Nparams}$ и $S_{Versions}$ должны задаваться оператором перед началом работы автомата с учетом стандарта RFC и специфики ПО Web-сервера.

Для наглядности графowego отображения блоков конечного автомата A_{HTTP} введем следующие обозначения:

- A – множество символов английского алфавита;
- N – множество, включающее в себя числовые символы от «0» до «9», а также символы «.», «/» и «%»;
- NOP – семантический оператор, не выполняющий никаких действий;
- «_» – пробельный символ;
- «CRLF» – символ, обозначающий возврат и перевод каретки на новую строку.

Обобщенная структура модели конечного автомата A_{HTTP} , предлагаемого для анализа HTTP-запросов, отображена на рис. 3.

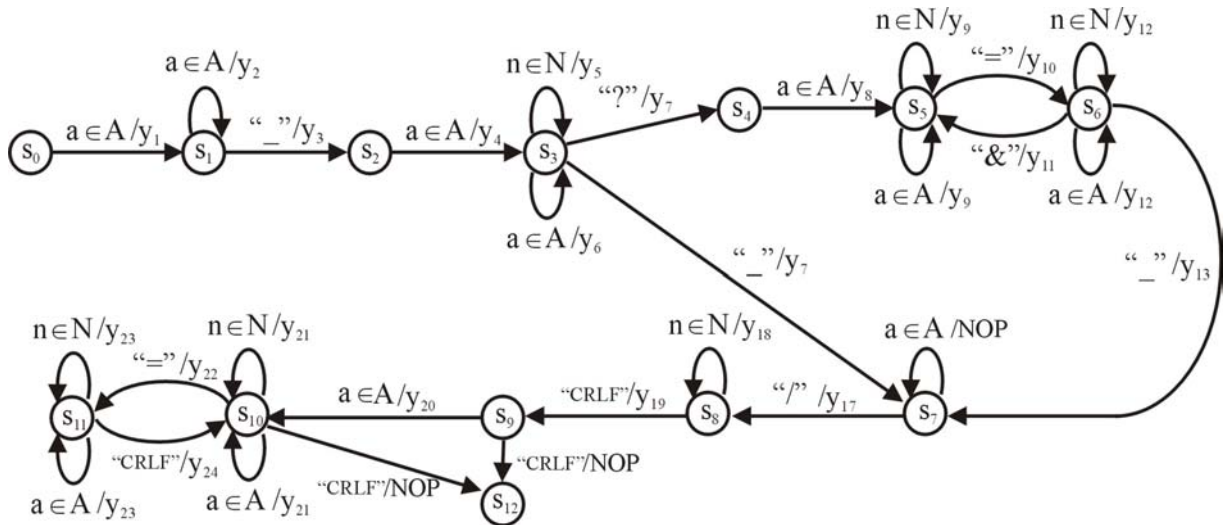


Рис. 3. Модель поведенческого метода выявления атак, базирующегося на конечном автомате A_{HTTP}

Предложенный автором подход к выявлению информационных атак на Web-серверы путем анализа поступающих НТТР-запросов может быть использован и для построения моделей защиты серверов других типов. В этом случае должны подвергаться анализу запросы, сформированные на основе тех протоколов, по которым осуществляется взаимодействие с серверами. Так, например, для защиты постовых серверов должны анализироваться запросы протоколов SMTP и POP3, а для защиты файловых серверов – запросы протокола FTP.

Литература

1. Schneier B. Modeling security threats // Dr. Dobb's Journal, December, 1999.
2. Gorodetski V., Kotenko I., Attacks against Computer Network: Formal Grammar-Based Framework and Simulation Tool. Conference proceedings // RAID, 2002.
3. Сердюк В.А. Сбор данных системами обнаружения атак // ВУТЕ/Россия. – 2003. – № 2(54).

Г. Москва, МАТИ, ул. Берниковская наб., д. 14, т. 915-01-96, e-mail: vicsmati@online.ru

УДК 62-50

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РОБАСТНЫХ СВОЙСТВ АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

А.Ю. Ощепков, В.В. Кирюшов

ФГУП ОКБ «Маяк», Пермский государственный университет

Излагаются результаты численного эксперимента, моделирующего работу цифровых регуляторов температуры. Эксперимент проводился средствами моделирования Matlab 6.5 с использованием пакета Simulink. В результате моделирования получены сравнительные характеристики нового адаптивного алгоритма и традиционного ПИ-алгоритма, а также исследованы робастные свойства нового алгоритма. Моделирование проводилось для системы первого порядка.

Широкое применение в автоматических системах управления получил пропорционально-интегральный (ПИ) алгоритм в силу своей простоты и возможности применения к различным системам. ПИ-регулятор требует настройки двух параметров: пропорционального и интегрального коэффициентов. Необходимо отметить, что данный алгоритм остается работоспособным при значительных изменениях указанных параметров, т.е. является робастным [1]. Увеличение вычислительной мощности микропроцессорных систем позволяет осваивать более сложные алгоритмы, которые превосходят традиционные по быстродействию и точности. При этом возникает проблема исследования границ устойчивости алгоритма, часто называемых в современной литературе областью робастности.

Адаптивный цифровой регулятор температуры, работающий на основе идентификации параметров системы с помощью методов регрессионного анализа и синтеза управления в реальном масштабе времени (да-

лее МНК-алгоритм [2]), как раз представляет собой систему, трудно поддающуюся аналитическому исследованию [3, гл. 12]. Реальные теплофизические эксперименты требуют длительного времени, поэтому были проведены численные эксперименты по синтезу управления непрерывной системой первого порядка с помощью дискретного МНК-регулятора. Моделирование производилось в среде MatLab 6.5 с использованием пакета Simulink.

Уравнение движения для параметра состояния X системы первого порядка имеет вид:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{\tau}X + u(t) + F_0. \quad (1)$$

Для регулятора температуры X представляет собой отклонение температуры объекта от заданного значения в безразмерных единицах.

Уравнение (1) моделируется *State-Space* блоком из библиотеки Continuous Simulink. Характерное время τ положено равным 2 единицам времени моделирования (внутреннее время Matlab).

Управляющее воздействие в методе МНК выглядит следующим образом:

$$u(t_n) = -K \cdot X(t_n) - F,$$

где коэффициент K напоминает пропорциональный коэффициент в ПИ-регуляторе, однако определяется, как и параметр F , по методу наименьших квадратов, матрицы в котором диагонализуются по процедуре Грамма-Шмидта ($|X\rangle, |U\rangle, |1\rangle$ – входные векторы размерности не менее 4):

$$\begin{aligned} |X_1\rangle &= |X\rangle + \mu_1 \cdot |1\rangle, \quad |U_1\rangle = |u\rangle + \nu_1 \cdot |X_1\rangle + \sigma_1 \cdot |1\rangle; \quad \mu_1 = -\frac{\langle 1|X\rangle}{\langle 1|1\rangle}, \quad \nu_1 = -\frac{\langle X_1|U\rangle}{\langle X_1|X_1\rangle}, \\ \sigma_1 &= -\frac{\langle 1|U\rangle}{\langle 1|1\rangle}; \quad K = \frac{1}{\langle X_1|X_1\rangle} \cdot \left(\langle X_1|Y\rangle \cdot \frac{\langle U_1|U_1\rangle}{\langle U_1|Y\rangle} - \langle X_1|U\rangle \right), \\ F &= \frac{1}{\langle 1|1\rangle} \cdot \left(\langle 1|Y\rangle \cdot \frac{\langle U_1|U_1\rangle}{\langle U_1|Y\rangle} - K \cdot \langle 1|X\rangle - \langle 1|U\rangle \right), \end{aligned} \quad (2)$$

скобки $\langle \dots | \dots \rangle$ символизируют скалярное произведение векторов. Процедура (2) хорошо программируется в Matlab.

Для расчетов составлен оригинальный блок, помещенный в рабочий модуль Simulink. Блок-диаграмма Simulink – модели приведена на рис. 1. Метод МНК позволяет получить управляющее воздействие только в дискретные моменты времени, разделенные интервалом Δt . Этот интервал дискретизации является важным (и единственным) параметром, выбираемым конструктором системы. Для формирования векторов $|X\rangle$, $|Y\rangle$ и $|U\rangle$ после пуска регулятора требуется специальный «разгонный» алгоритм с известными параметрами. В этом качестве использовался ПИ-алгоритм.

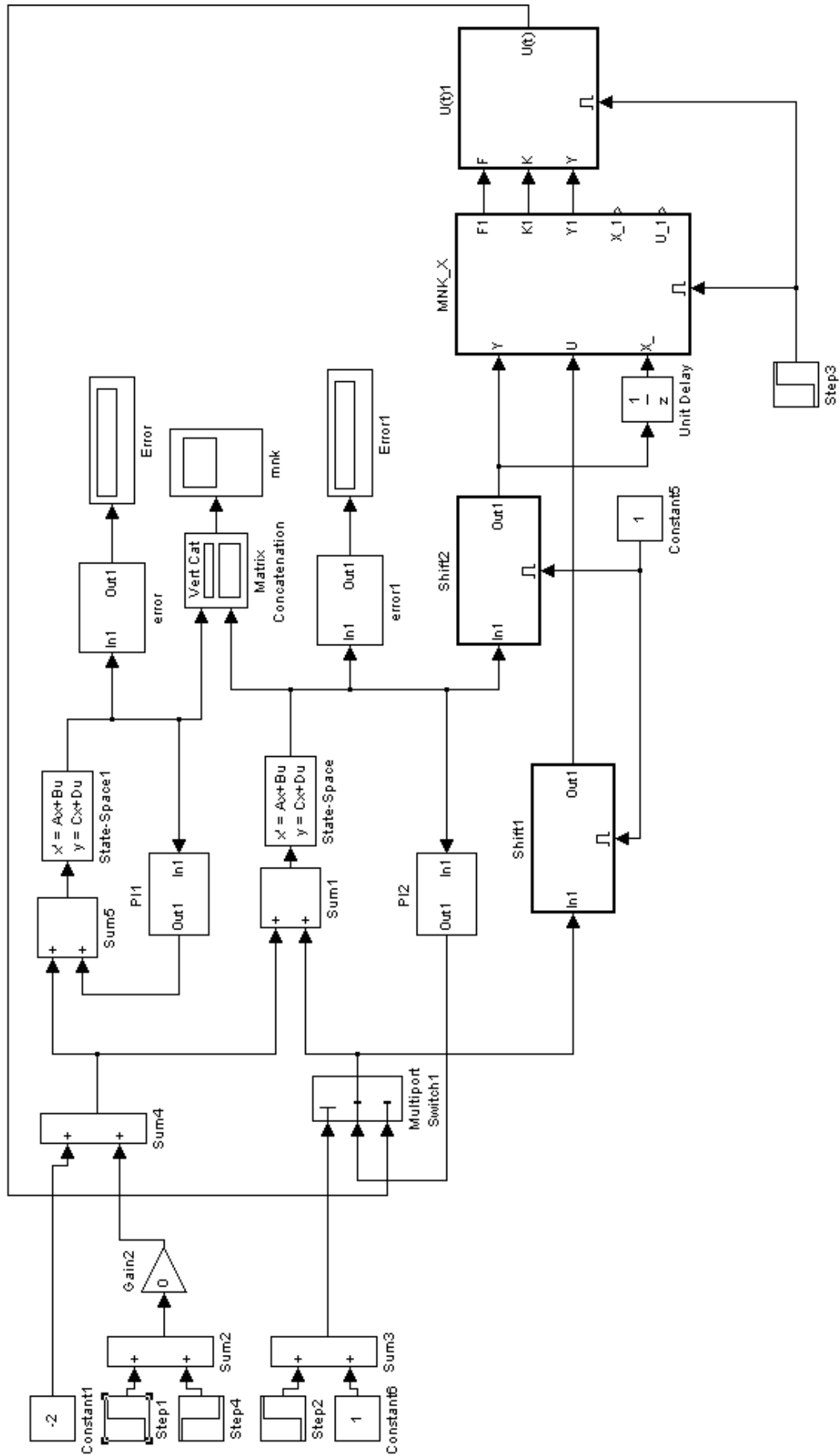


Рис. 1. Блок-диаграмма программы для численного эксперимента по исследованию алгоритмов работы дискретных адаптивных регуляторов в пакете Simulink

Модель объекта непрерывна, как это должно быть в реальном эксперименте, а сигналы управления дискретны. Шаг дискретизации составлял 0,1 единицу времени моделирования (внутреннее время Matlab). Вектор $|X\rangle$ имел размерность 4, также как $|U\rangle$ и $|Y\rangle$. Для объединения четырех значений в вектор создана подсистема *Shift*. Для получения векторов $|X\rangle$ и $|Y\rangle$ требуется время 0,5 единицы времени моделирования (четыре полных шага дискретизации). Управление этим интервалом времени реализовано блоками *Step2*, *Constant6* и *Sum3*. Затем полученные векторы направляются в подсистему МНК, где вычисляются промежуточные значения векторов $|X1\rangle$, $|Y1\rangle$ и $|U1\rangle$.

В подсистеме $U(t)1$ происходит вычисление управляющего воздействия и ограничение сигнала управляющего воздействия, как того требует условие эксперимента (управляющее воздействие только положительно – нет холодильников – и ограничено по величине). Помимо этого реализована функция вывода управляющего воздействия, вычисленного на предыдущем шаге, в случае обращения в нуль знаменателей дробей при достижении цели регулирования $X = 0$. Это помогает избежать вычисления малых разностей, которые увеличивают вычислительную нагрузку, и из-за неточности вычисления могут привести к «раскачке» регулятора. Затем управляющее воздействие подается на сумматор, который объединяет величину случайного внешнего воздействия и управляющее воздействие.

В модели задействованы два блока *State-Space*, которые решают уравнение движения с входным управляющим воздействием. Один из них регулируется обычным ПИ-регулятором, второй управляется по МНК-алгоритму. Параметры обоих блоков совпадают.

Для сравнительной оценки качества регулирования вычислялся интеграл от квадрата ошибки (ИКО), интеграл от модуля ошибки (ИМО), интеграл от времени и модуля ошибки (ИВМО) и интеграл от времени и квадрата ошибки (ИВКО) [1]. Полученные данные представлены ниже:

	ПИ	МНК
ИКО	11,39	10,81
ИМО	2,67	1,90
ИВМО	1,25	0,39
ИВКО	1,58	0,98

Из таблицы видно, что МНК превосходит ПИ-регулятор по всем критериям качества.

На рис. 2 представлено поведение системы, регулируемой МНК и ПИ алгоритмами. Хорошо видно, что МНК быстрее выводит систему к заданному значению $X = 0$.

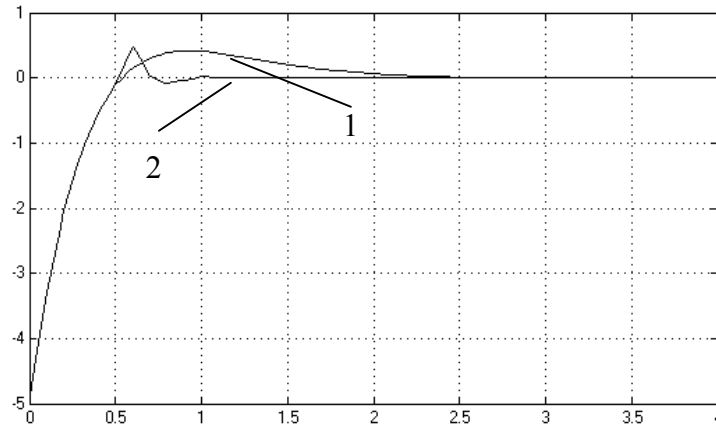


Рис. 2. Поведение системы, регулируемой МНК и ПИ алгоритмами: 1 – ПИ-регулятор; 2 – МНК

В численном эксперименте установлено, что ограничение воздействия приводит к раскачке регулятора (выход за границу робастности), когда внешнее воздействие превышает 70 % от значения, ограничивающего сверху управляющее воздействие.

Литература

1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: ЛБЗ, 2002. – 800 с.
2. Ощепков А.Ю., Сергеев М.В. Адаптивный регулятор. Физическая модель первого порядка // Вест. Перм. ун-та, сер. Физика, 1999. – Вып. 5. – С. 139-145.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

Россия, 614990, г. Пермь, ул. Даницина, 19, т. (3422) 37-17-75, e-mail: aos@mpm.ru

УДК 62-50

АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОРЯДКА. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB

А.Ю. Ощепков, К.А. Исаков

ФГУП ОКБ «Маяк», Пермский государственный университет

Описаны результаты моделирования алгоритмов работы регуляторов для систем второго порядка. Рассмотрено два метода регулирования: по пропорционально-интегральному закону (ПИ) и методу наименьших квадратов, учитывающему инерционные свойства объекта (МНК-2). Проведена проверка устойчивости алгоритмов.

В настоящей работе описываются алгоритмы управления системой второго порядка:

$$a \cdot \frac{d^2 X}{dt^2} + b \cdot \frac{dX}{dt} + c \cdot X = u(t) + F_0, \quad (1)$$

где X – регулируемая величина; u – управляющее воздействие.

Цель регулирования:

$$X(t) \rightarrow 0. \quad (2)$$

Если систему с входом $u(t)$ и выходом $y(t)$ (SISO–модель [1]), эквивалентную (1), представить в виде

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{a} & -\frac{b}{a} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{a} \end{pmatrix} \cdot (u(t) + F_0),$$

$$y(t) = (1 \ 0) \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + (0) \cdot u(t),$$
(3)

то ее легко промоделировать в пакете Simulink блоком *State-Space* [2].

Если управляющее воздействие выбрать по пропорционально-интегральному закону, всегда устойчивому в системах первого порядка:

$$u(t) = -K_{II} \cdot X(t) - K_{II} \cdot \int_0^t X(\tau) d\tau,$$

то в системе управления (1)-(3) может возникнуть неустойчивость при нарушении условия [2]:

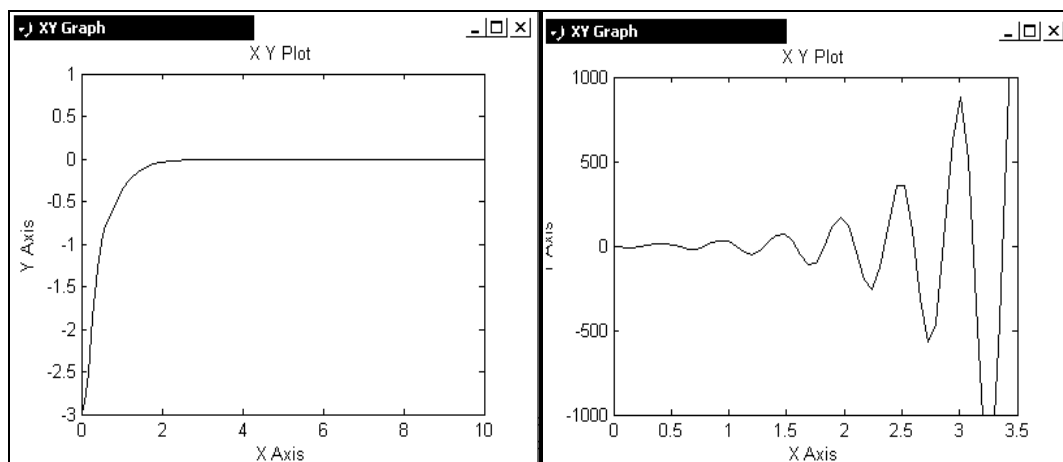
$$K_{II} < \frac{b}{a} \cdot (c + K_{II}).$$
(4)

На рис. 1 для иллюстрации вышесказанного показаны два режима работы ПИ-регулятора: устойчивый (условие (4) выполняется) и неустойчивый (условие (4) нарушено).

Следующим алгоритмом, хорошо зарекомендовавшим себя для систем первого порядка, является алгоритм, работающий на основе идентификации параметров системы с помощью методов регрессионного анализа и синтеза управления в реальном масштабе времени (далее МНК1-алгоритм [3]). Управляющее воздействие в методе МНК1 выглядит следующим образом:

$$u(t_n) = -K \cdot X(t_n) - F,$$

где коэффициент K напоминает пропорциональный коэффициент в ПИ-регуляторе, однако определяется, как и параметр F , по методу наименьших квадратов.



а)

б)

Рис. 1. Устойчивый (а) и неустойчивый (б) режимы работы ПИ-регулятора в системе второго порядка

Исследования с помощью компьютерного моделирования показали, что метод МНК1 неработоспособен для систем второго порядка вследствие того, что он не учитывает инерционные эффекты (рис. 2).

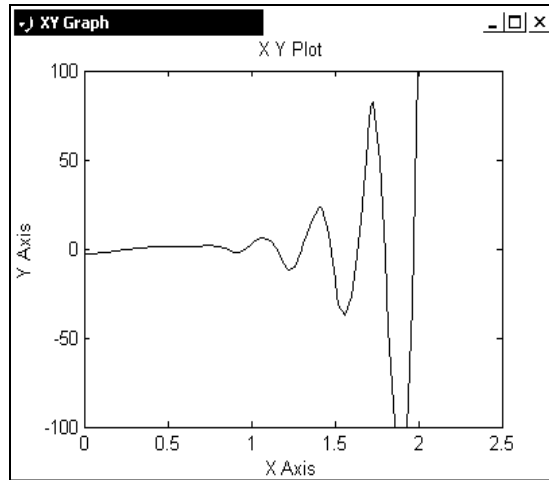


Рис. 2. Работа МНК1 алгоритма в системе 2-го порядка

Была сделана попытка разработать алгоритм, аналогичный МНК1, но учитывающий наличие второй производной в уравнении (1) [4]. Опишем его несколько подробнее.

Запишем уравнение (1) в конечных разностях:

$$a \cdot \frac{X(t_{n+1}) - 2 \cdot X(t_n) + X(t_{n-1}))}{\Delta t^2} + b \cdot \frac{X(t_{n+1}) - X(t_n)}{\Delta t} + c \cdot X(t_{n+1}) = u(t_n) + F_0, \\ t_{n+1} = t_n + \Delta t, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Это уравнение можно переписать в виде:

$$X(t_{n+1}) = A + B \cdot X(t_n) - D \cdot X(t_{n-1}) + C \cdot u(t_n), \quad (6)$$

где величины A, B, C, D связаны с параметрами уравнения (5) очевидными равенствами, однако считаются неизвестными. Полагая $X(t_{n+1}) = 0$ (при этом достигается цель регулирования (2)), получим выражение для $u(t_n)$:

$$u(t_n) = -K_1 \cdot X(t_n) + K_2 \cdot X(t_{n+1}) - F_0, \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{B}{C}, \quad K_2 = \frac{D}{C}, \quad F_0 = \frac{A}{C}, \quad (8)$$

а величины A, B, C и D идентифицируются в ходе работы регулятора по методу наименьших квадратов. Назовем метод (6)-(8) МНК2-алгоритмом.

Как видим, МНК2 отличается от МНК1 на один дополнительный параметр. Процедура синтеза МНК2 алгоритма аналогична МНК1 [3]. Проведем N последовательных измерений в моменты времени $t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+N}$ и подставив результаты в (6), получим систему уравнений для определения четырех неизвестных величин. Количество уравнений таким образом должно быть не менее четырех ($N \geq 4$), а систему можно записать в векторном виде:

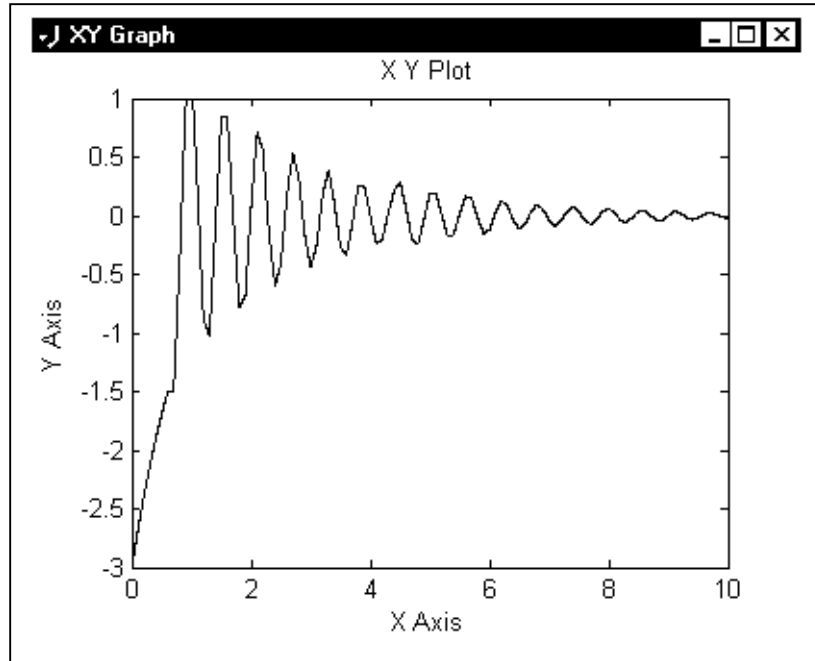
$$|Y\rangle = A \cdot |1\rangle + B \cdot |X\rangle - D |Z\rangle + C \cdot |U\rangle. \quad (9)$$

Смысл векторов ясен из обозначений.

Проводя процедуру ортогонализации векторов по методу Грамма-Шмидта [5], находим последовательно:

$$\begin{aligned}
 |X_1\rangle &= |X\rangle + \mu_1 \cdot |1\rangle, \quad \mu_1 = -\frac{\langle 1|X\rangle}{\langle 1|1\rangle}; \\
 |U_1\rangle &= |u\rangle + v_1 \cdot |X_1\rangle + \sigma_1 \cdot |1\rangle, \quad v_1 = -\frac{\langle X_1|U\rangle}{\langle X_1|X_1\rangle}, \quad \sigma_1 = -\frac{\langle 1|U\rangle}{\langle 1|1\rangle}; \\
 |Z_1\rangle &= |Z\rangle + \varepsilon_1 \cdot |U_1\rangle + \chi_1 \cdot |X_1\rangle + \lambda_1 \cdot |1\rangle, \quad \varepsilon_1 = -\frac{\langle U_1|Z\rangle}{\langle U_1|U_1\rangle}, \quad \chi_1 = -\frac{\langle X_1|Z\rangle}{\langle X_1|X_1\rangle}, \\
 \lambda_1 &= -\frac{\langle 1|Z\rangle}{\langle 1|1\rangle}. \\
 D &= -\frac{\langle Z_1|Y\rangle}{\langle Z_1|Z_1\rangle}; \quad C = \frac{\langle U_1|Y\rangle}{\langle U_1|U_1\rangle} - D\varepsilon_1; \\
 B &= \frac{\langle X_1|Y\rangle}{\langle X_1|X_1\rangle} + Cv_1 - D\chi_1; \\
 A &= \frac{\langle 1|Y\rangle}{\langle 1|1\rangle} + B\mu_1 + C\sigma_1 - D\lambda_1.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Для моделирования алгоритма в Simulink составлен специальный блок, реализующий процедуру (10) и синтез управляющего воздействия (7)-(8). Пример работы МНК2 приведен на рис. 3.



**Рис. 3. Пример работы алгоритма МНК2
в системе второго порядка ($b=c=10$, $a=0,01$)**

Проведенные исследования показали, что метод МНК2 в форме (6)-(8) устойчив лишь при малых значениях параметра a и малых интер-

валах дискретизации, причем в области устойчивости сходимость не является монотонной, т.е. регулятор работает в закритическом режиме. Для получения адаптивного дискретного регулятора с большой областью робастности [2] для систем второго порядка требуются дополнительные исследования, которые планируется провести на созданной математической модели.

Литература

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: ЛБЗ, 2002. – 832 с.
3. Ощепков А.Ю., Сергеев М.В. Адаптивный регулятор. Физическая модель первого порядка // Вест. Перм. ун-та, сер. Физика, 1999. – Вып. 5. – С. 139-145.
4. Ощепков А.Ю., Сергеев М.В. Компьютерное моделирование системы автоматического управления второго порядка // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: Матер. I Всерос. науч. internet-конф. (январь-февраль 2001 года), вып. 2 – Тамбов, 2001. – С. 53-55.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.

Россия, 614990, г. Пермь, ул. Даницина, 19, т. (3422) 37-17-75, e-mail: aos@mpm.ru

УДК 658.515:519

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И НЕЙРОСЕТЕЙ

М.Г. Васильев

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Описана структура механизма обработки данных, полученных в процессе фрезерования. Такая обработка необходима для последующего детального анализа процессов. Разработанная структура может применяться и для более широкого круга задач.

Во многих биологических и технических системах встречаются сигналы, повторяющиеся с разными параметрами. Часто очень важно выделить параметры, которые могут дать большую точность при моделировании.

На первом этапе необходимо выявить процессы и их параметры, которые интересуют исследователя. Для представления повторяющихся процессов предлагается задать их частотно-временную характеристику. Такая частотно-временная характеристика задается с помощью отношений величин S_i для каждого из отрезков (рис. 1).

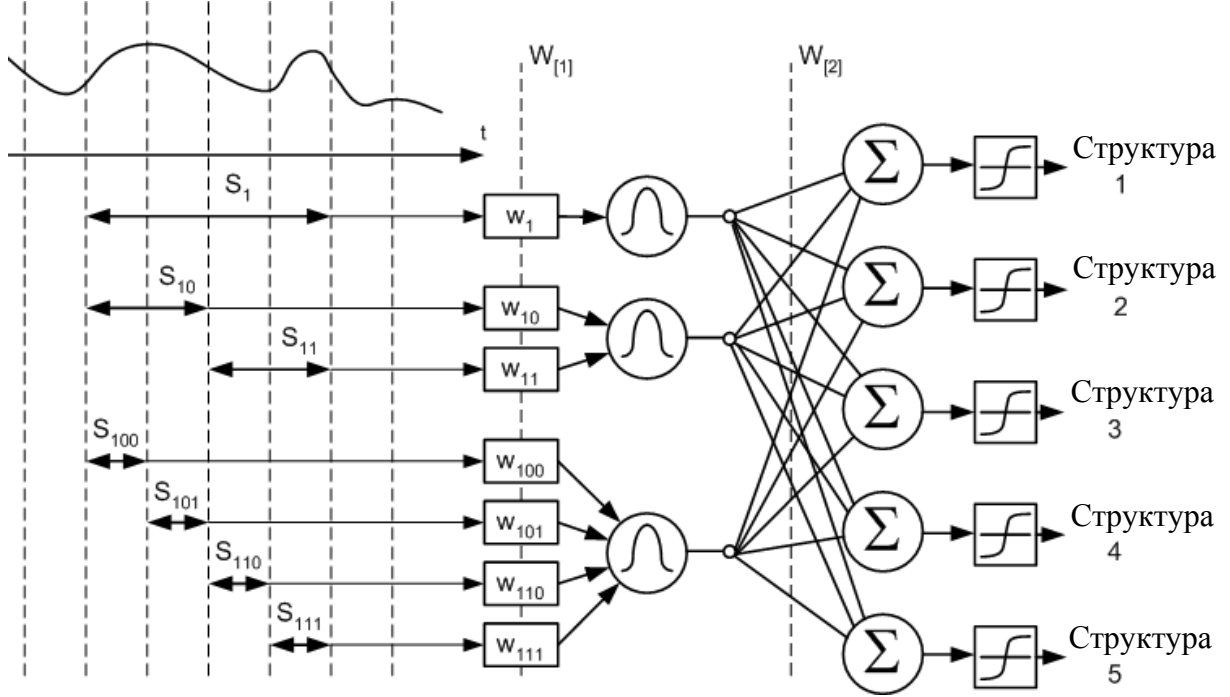


Рис. 1. Структура первичной обработки данных

Отрезки делят область предполагаемого объекта методом рекурсивной дихотомии по мере надобности.

$$S_i \left(f_{\text{эксп. уст}}(t), t_{\text{нач}}^{[i]}, t_{\text{кон}}^{[i]} \right) = \frac{\int_{t_{\text{нач}}^{[i]}}^{t_{\text{кон}}^{[i]}} f_{\text{эксп. уст}}(t) dt}{t_{\text{кон}}^{[i]} - t_{\text{нач}}^{[i]}},$$

где $f_{\text{эксп. уст}}(t)$ – функция, получаемая на экспериментальной установке.

Данная величина рассчитывается по необходимости для всех отрезков S .

Частотно-временная характеристика структуры может быть задана простыми соотношениями между оценками S на разных отрезках.

$$\left| S_1 \left(f, t_{\text{нач_}S_1}, t_{\text{кон_}S_1} \right) \right| < S_{\text{порог}}, \quad (1)$$

$$\left| S_{10} \left(f, t_{\text{нач_}S_{10}}, t_{\text{кон_}S_{10}} \right) - S_{11} \left(f, t_{\text{нач_}S_{11}}, t_{\text{кон_}S_{11}} \right) \right| < S_{\text{порог}} |S_{10} - S_{11}|, \quad (2)$$

$$S_{\min} > t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}} > S_{\max}. \quad (3)$$

Эти условия последовательно проверяются на всем множестве допустимых позиций (3) в экспериментальном временном ряду, начиная с самых простых (1) и заканчивая наиболее сложными (2).

Эти простые соотношения дали хорошие результаты при оценке принадлежности к повторяющемуся устойчивому процессу. Однако существует проблема, связанная с тем, что может быть найдено несколько объектов, удовлетворяющих данным условиям, перекрывающих друг друга. Для того, чтобы решить эту задачу, перепишем условия (1) и (2) в виде целевой функции

$$k_1 \left| S_1(f, t_{\text{нач}_{S_1}}, t_{\text{кон}_{S_1}}) \right| - \\ - k_2 \left| S_{10}(f, t_{\text{нач}_{S_{10}}}, t_{\text{кон}_{S_{10}}}) - S_{11}(f, t_{\text{нач}_{S_{11}}}, t_{\text{кон}_{S_{11}}}) \right| \longrightarrow \max.$$

Чтобы сократить время на выработку подобных отношений предлагается использовать нейросеть, на входы которой подаются рассчитанные оценки S (рис. 1).

На рисунке показана структура обработки данных. $W_{[1]}, W_{[2]}$ – матрицы весов в нейросети. Первый слой состоит из радиально базисных нейронов. Второй слой представляет собой линейный разделитель.

Данная технология подготовки данных имеет большое практическое значение. Как осциллограф может отображать изменения сигнала на одной частоте, так и современная техника должна отслеживать нерегулярные устойчивые последовательности сигналов. И данная технология создается для этой цели.

Литература

1. Труды VIII Всерос. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение» НКП-2002. Москва, 21-22 марта 2002 года // Диагностика и прогнозирование временных рядов с помощью многослойной радиально-базисной нейронной сети / Е.В. Бодянский, Е.И. Кучеренко, А.П. Чапланов. – М.: Век книги. – С. 209.

УДК 621.3.015.334

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

С.Л. Кужеков, А.В. Влащизкий, А.И. Кривенко

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Описана математическая модель, позволяющая определять параметры импульсных коммутационных перенапряжений, возникающих при срабатывании предохранителей с наполнителем.

Источниками импульсных коммутационных перенапряжений (ИКП) в электрических сетях напряжением до 1 кВ являются автоматические выключатели и предохранители. Исследования показали, что в таких сетях наибольшие ИКП возникают при срабатывании предохранителей с наполнителем (ПН, НПН и др.). В технической литературе не приводятся сведения об амплитудах и параметрах ИКП, создаваемых предохранителями с наполнителями. Целью данной работы являлось получение математической модели, позволяющей определять параметры импульсов коммутационных перенапряжений (амплитуды, длительности и энергию), возникающих при перегорании плавких вставок предохранителей с наполнителем.

Проведены экспериментальные исследования процессов при перегорании плавких вставок предохранителей с наполнителем при различных

параметрах электрической цепи постоянного тока, изображенной на рисунке 1.

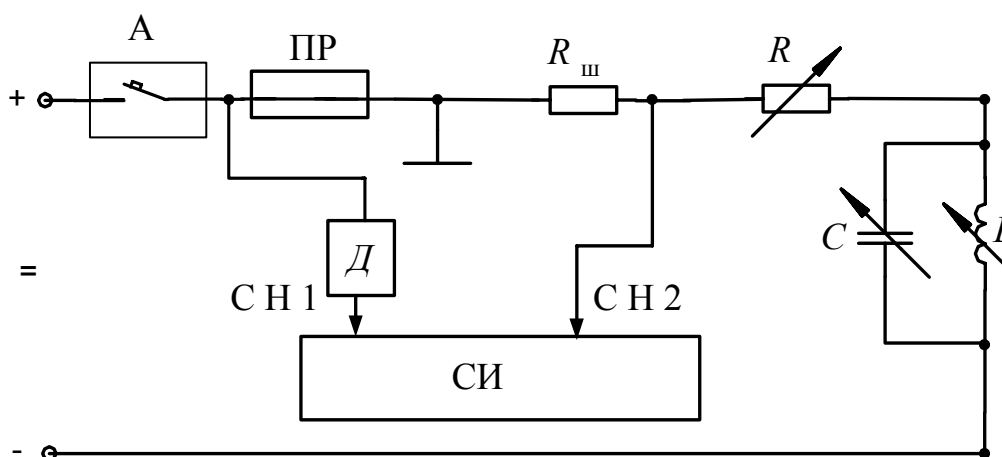


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований:

А – автоматический выключатель; ПР – испытуемый предохранитель; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, с помощью которого производятся измерения тока в цепи; R – переменное сопротивление, позволяющее регулировать значения отключаемого тока; C – конденсатор с переменной емкостью, регулирующий емкость отключаемой цепи; L – дроссель с переменной индуктивностью, регулирующий индуктивность отключаемой цепи; СИ – средство измерения (осциллограф Tektronix TDS2014); CH1 – канал измерения напряжения между выводами предохранителя; CH2 – канал измерения тока отключаемой цепи

В результате исследований установлено, что в общем случае ИКП при перегорании плавкой вставки предохранителя с наполнителем имеет вид, изображенный на рисунке 2.

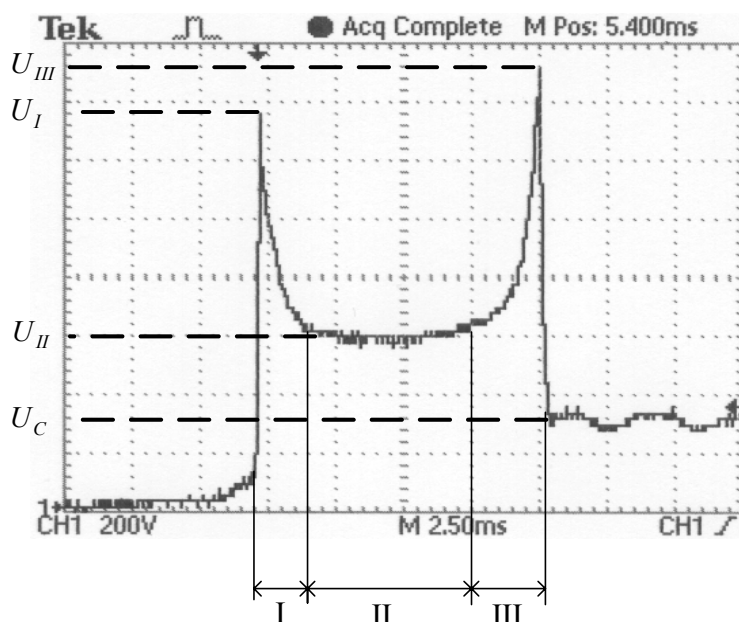


Рис. 2. Импульс перенапряжения, создаваемый предохранителем

На этом импульсе можно выделить три характерных участка:

I – Участок перенапряжения, возникающего после образования электрической дуги;

II – Участок практически постоянного напряжения дуги;

III – Участок перенапряжения, возникающего в момент погасания дуги.

Первый участок перенапряжения возникает в результате увеличения сопротивления дугового промежутка R_d из-за резкого возрастания давления в патроне предохранителя после перегорания плавкой вставки. Как показал анализ проведенных исследований, увеличение сопротивления дугового промежутка практически не зависит от тока и параметров отключаемой цепи, а определяется материалом и поперечным сечением плавкой вставки. Например, для медной проволоки диаметром 0,19 мм значение этого сопротивления $R_d \approx 20$ Ом. Форма импульса на первом участке имеет вид двойной экспоненты с длительностью переднего фронта 200-400 мкс и длительностью полуспада – 400-800 мкс. Амплитуда импульса первого участка может достигать значений 2,5 кВ и определяется по формуле

$$U_I = I_{II} \cdot R_d,$$

где I_{II} – ток в момент перегорания плавкой вставки, зависящий от номинального тока плавкой вставки $I_{вст}$, напряжения сети U_C , активного сопротивления R и индуктивности L цепи.

К началу второго участка происходит стабилизация давления газа в столбе дуги, что приводит к практически постоянному напряжению на выводах предохранителя. Значение этого напряжения определяется по градиенту напряжения $g = \frac{dU}{dl}$ (В/см), зависящему в свою очередь от значения отключаемого тока. Для стандартной длины плавкой вставки 6,5 см предохранителя серии ПН значения этого напряжения не превышает 800 В. Значение стабилизированного напряжения дуги на втором участке импульса определяется по формуле

$$U_{II} = g \cdot l,$$

где l – длина плавкой вставки предохранителя.

Импульс перенапряжения на третьем участке вызван явлением «среза» тока при подходе тока к нулевому значению. Это объясняется неустойчивостью дуги на завершающем этапе ее горения. Амплитуда импульса на третьем участке определяется по формуле

$$U_{III} = i_{ср} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где $i_{ср}$ – значение тока среза; L, C – индуктивность и емкость отключаемой цепи, соответственно.

Исследования показали, что при высокой плотности тока в момент перегорания плавкой вставки, амплитуда импульса на первом участке может превышать амплитуду импульса на третьем участке.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЗЕМЛЕ ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Е.В. Бессага, Д.Е. Дебда

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Рассмотрены вопросы реализации на Земле электромеханических систем моделирования невесомости крупногабаритной космической техники. Показана возможность имитации инерционности обезвешиваемого объекта, а также уменьшения за счет этого установленной мощности и энергетических затрат электропривода.

Развитие международной космической станции «Альфа» предполагает состыковку ее модулей на орбите. Для отработки этих процессов на Земле с использованием космических манипуляторов необходимо обезвешивать объекты космической техники на специальных силокомпенсирующих стендах. Эти стенды реализуются таким образом, что траектория, скорость и ускорение движения обезвешиваемого объекта полностью определяются приложенным к нему со стороны манипулятора внешним воздействием, которое, как и в невесомости, преодолевает лишь силы инерции объектов обезвешивания. Влияние на параметры движения силы тяжести объекта, трения в механизмах перемещения и прочих сил сопротивления движению в горизонтальной и вертикальной плоскости уменьшаются силокомпенсирующей системой.

Наиболее универсальным средством компенсации силы тяжести объектов являются активные системы компенсации силы тяжести (СКСТ), реализованные с использованием регулируемых электроприводов, способных удерживать объект на весу за счет электромагнитного момента электродвигателя. Однако таким системам присущи следующие недостатки:

- большая установленная мощность электрооборудования и значительные энергетические затраты, связанные с необходимостью длительного (4-8 часов) удержания объектов обезвешивания большой массы на весу;
- необходимость использования материалоемких макетов космической техники с массой, равной массе реальных объектов, которая может достигать 20 тонн;
- возможность неконтролируемого падения объекта обезвешивания в случае отказа в работе электропривода.

Для повышения безопасности СКСТ и уменьшения энергозатрат электропривода предлагается реализовывать комбинированные СКСТ, компенсирующие силу тяжести объекта при помощи противовеса, а прочие силы сопротивления движению – при помощи электропривода. Проведенные нами исследования показали, что только за счет применения противовеса той же массы, что и объект обезвешивания, возможно уменьшить момент статической нагрузки электропривода в 4-5 раз.

Дополнительные возможности снижения энергозатрат электропривода заключаются в использовании противовеса для частичной имитации инерционности объекта обезвешивания. Это позволяет при моделировании невесомости использовать макеты космической техники, имеющие те же габаритные размеры, что и объекты, но в несколько раз меньшую массу. При этом должно соблюдаться условие равенства массы объекта m_O суммарной приведенной массе макета m_M и противовеса $m_{\text{ПР}}^{\text{ПР}}$.

При использовании такого подхода для выбора силовой электрической части СКСТ необходимо знать такие параметры механической системы обезвешивания, как массу противовеса и его радиус приведения $\rho_{\text{ПР}}$, а также массу макета.

Для одновременного выполнения условия имитации инерционности объекта $m_O = m_M + m_{\text{ПР}}^{\text{ПР}}$, а также разгрузки двигателя в статических режимах с помощью противовеса получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} m_O \times \rho_O^2 = m_{\text{ПР}} \times \rho_{\text{ПР}}^2 + m_M \times \rho_O^2 \\ m_M \times \rho_O = m_{\text{ПР}} \times \rho_{\text{ПР}} \end{cases},$$

где ρ_O – радиус приведения объекта.

Приняв $m_M = \frac{m_O}{n}$, где n – степень уменьшения массы объекта, по-

лучим: $m_{\text{ПР}} = \frac{m_O}{n \times (n-1)}$, $\rho_{\text{ПР}} = \rho_O(n-1)$.

Зависимости $m_M(n)$, $m_{\text{ПР}}(n)$, $\rho_{\text{ПР}}(n)$ приведены на рис. 1 для объекта обезвешивания массой $m_O = 20000$ кг при $\rho_O = 0,014$ м. Из рис. 1 следует, что масса макета объекта может быть снижена, например в 4 раза, и равна $m_M = 5000$ кг, а масса противовеса в 12 раз меньше массы объекта и равна $m_{\text{ПР}} = 1667$ кг, а $\rho_{\text{ПР}} = 0,042$ м. При этом, как показали исследования, мощность двигателя может быть снижена на порядок по сравнению с активной СКСТ.

Рассмотренный подход позволяет снижать материалоемкость стендов имитации невесомости и их энергетические затраты.

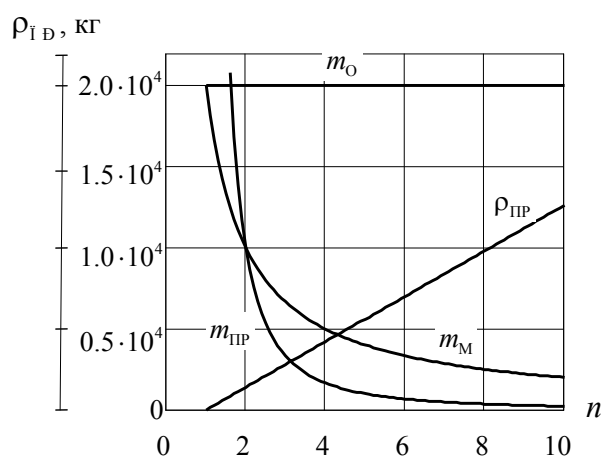


Рис. 1. Зависимости $m_i(n)$, $m_{\text{ПР}}(n)$, $\rho_{\text{ПР}}(n)$ для объекта обезвешивания массой 20000 кг

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОРМОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

В.З. Русаков

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты,

Б.М. Додонов

Московский автомобильно-дорожный институт
(Государственный технический университет),

А.В. Кучеренко

Всесоюзный научно-исследовательский институт шинной промышленности, г. Москва

Приведены результаты разработки имитационной модели торможения автомобиля, имеющей семь степеней свободы. Выполнено имитационное моделирование для автомобиля ГАЗель-2705.

Анализ исследований сцепных свойств шин с дорожной поверхностью показал, что нет объективного количественного критерия и общепринятой методики оценки этих свойств. Также видно, что существующий норматив недостаточно проработан для его применения, т.к. с одной стороны, если оценивать сцепные свойства шин по приведенному в нем требованию, соответствующему полному скольжению шины по опорной поверхности, тогда не будут учтены свойства шины, влияющие на значения коэффициента сцепления, соответствующие максимальному значению касательной силы, если же оценивать сцепные свойства шины по значению коэффициента сцепления, соответствующего значению максимальной касательной силы, тогда не будут учтены свойства шины, влияющие на значения коэффициента сцепления, соответствующие значению касательной силы при полном скольжении колеса по опорной поверхности.

Вместе с тем необходимо отметить, что с внедрением антиблокировочных систем большее значение приобретает коэффициент сцепления, соответствующий значению максимальной касательной силы, но пока существуют автомобили без антиблокировочных систем и с возможностью их отключения значение коэффициента сцепления, соответствующее значению касательной силы при полном скольжении колеса, также имеет огромное значение для активной безопасности автотранспортных средств [1].

Наиболее совершенен метод динамометрирования, который лишен недостатков, присущих методам исследования сцепных свойств шин с помощью испытательного автомобиля и стендов. При проведении испытаний этим методом можно определить коэффициент сцепления при постоянной скорости, что невозможно сделать с помощью испытательного автомобиля; на различных типах дорожных покрытий, что трудно и дорого реализовать в условиях стендовых испытаний; с переменной нагрузкой на колесо, на шинах различного типа, состояния и внутреннего давления.

Таким образом, очевидна необходимость выработки единой методики, которая могла бы обеспечить количественную оценку сцепных свойств шины с одной стороны, в отношении коэффициента сцепления со-

ответствующего пиковому значению касательной силы, с другой стороны – в отношении коэффициента сцепления, соответствующего значению касательной силы при полном скольжении колеса по опорной поверхности.

В имитационную модель торможения автомобиля входят следующие компоненты: – механическая система – АВТОМОБИЛЬ;

– тормозная система автомобиля.

Расчетная схема системы АВТОМОБИЛЬ показана на рисунке 1, механическую систему которого составляют: кузов, передний и задний мосты и вращающиеся колеса.

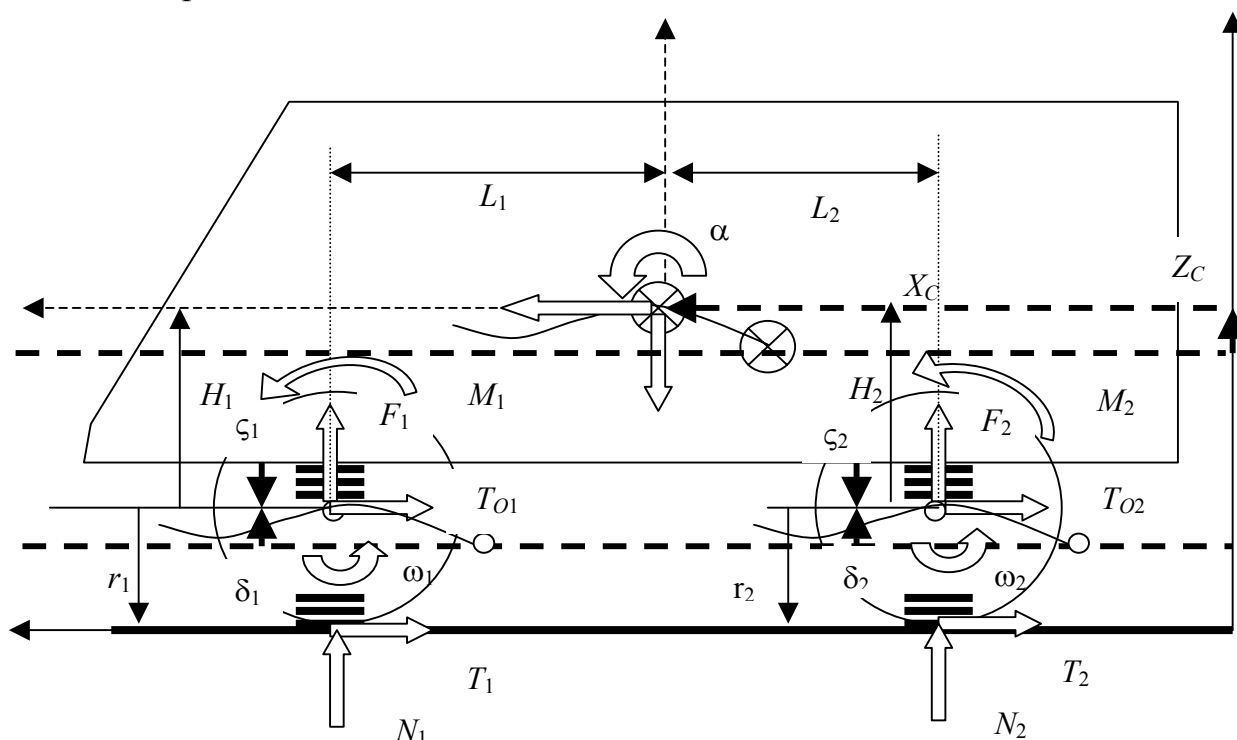


Рис. 1. Расчетная схема механической системы автомобиля для исследования процесса торможения

Эта система имеет 7 степеней свободы, которые определяют вектор состояния механической системы, приведенный в таблице 1. Размерность этого вектора – 12 представляет размерность системы дифференциальных уравнений, описывающих движение системы.

Таблица 1

Вектор состояния механической системы

1	x'_c	Путевая скорость
2	z'_c	Скорость вертикального перемещения центра тяжести кузова
3	α'	Угловая скорость продольного крена
4	z'_1	Скорость вертикального перемещения переднего моста
5	z'_2	Скорость вертикального перемещения заднего моста
6	ω_1	Угловая скорость вращения колес переднего моста
7	ω_2	Угловая скорость вращения колес заднего моста

8	x_c	Пройденный путь
9	z_c	Вертикальное перемещение центра тяжести кузова
10	α	Продольный крен
11	z_1	Вертикальное перемещение переднего моста
12	z_2	Вертикальное перемещение заднего моста

Для составления уравнений движения используется алгоритм, основанный на применении уравнений движения в форме уравнений движения Лагранжа 2 рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial q'_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j,$$

где T – кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{m_0 + m_1 + m_2}{2} (x'_c)^2 + \frac{m_0}{2} (z'_c)^2 + \frac{I_0}{2} (\alpha')^2 + \frac{m_1}{2} (z'_1)^2 + \frac{m_2}{2} (z'_2)^2 + \frac{I_1}{2} (\omega_1)^2 + \frac{I_2}{2} (\omega_2)^2,$$

$q'_j = \{x'_c, z'_c, \alpha', z'_1, z'_2, \omega_1, \omega_2\}$ – вектор обобщенных скоростей.

В правую часть дифференциальных уравнений движения входит обобщенная сила

$$Q_j = \sum F_k \cdot \frac{\partial v_k}{\partial q'_j}.$$

Реакции элементов подвески и колес, приложенные в узловых точках, вычисляются по формулам, приведенным в таблице 2.

Таблица 2

Реакции элементов подвески и колес

$f_1 = z_c - z_1 - \alpha L_1$	Деформация рессор переднего моста
$f'_1 = z'_c - z'_1 - \alpha' L_1$	Скорость деформации рессор переднего моста
$\delta_1 = z_1$	Радиальная деформация шин переднего моста
$\delta'_1 = z'_1$	Скорость радиальной деформации шин переднего моста
$F_1 = -c_{f1} \cdot f_1 - b_{f1} \cdot f'_1$	Усилие в рессорах переднего моста
$N_1 = -c_{\delta 1} \cdot \delta_1 - b_{\delta 1} \cdot \delta'_1$	Вертикальная реакция на шины колес переднего моста
$f_2 = z_c - z_2 + \alpha \cdot L_2$	Деформация рессор заднего моста
$f'_2 = z'_c - z'_2 + \alpha' \cdot L_2$	Скорость деформации рессор заднего моста
$\delta_2 = z_2$	Радиальная деформация шин заднего моста
$\delta'_2 = z'_2$	Скорость радиальной деформации шин заднего моста
$F_2 = -c_{f2} \cdot f_2 - b_{f2} \cdot f'_2$	Усилие в рессорах заднего моста
$N_2 = -c_{\delta 2} \cdot \delta_2 - b_{\delta 2} \cdot \delta'_2$	Вертикальная реакция на шины колес заднего моста

Для вращающихся масс колес в обобщенных силах учитываются моменты в тормозных механизмах:

$$Q_j = \sum F_k \cdot \frac{\partial v_k}{\partial q'_j} + \sum M_k \cdot \frac{\partial \omega_k}{\partial q'_j}.$$

Окончательный вид дифференциальных уравнений движения автомобиля, полученных по описанному алгоритму, приведен в таблице 3.

Таблица 3

Дифференциальные уравнения движения автомобиля

1	$\frac{d}{dt}x'_c = Q_{xc}$	$Q_{xc} = \left(\frac{1}{m_0 + m_1 + m_2} \right) \cdot (-T_1 - T_2)$
2	$\frac{d}{dt}z'_c = Q_{zc}$	$Q_{zc} = \left(\frac{1}{m_0} \right) \cdot (F_1 + F_2 - G_0)$
3	$\frac{d}{dt}\alpha' = Q_\alpha$	$Q_\alpha = \left(\frac{1}{I_0} \right) \cdot (-F_1 \cdot L_1 + F_2 \cdot L_2 + T_1 \cdot H_1 + T_2 \cdot H_2)$
4	$\frac{d}{dt}z'_1 = Q_{z1}$	$Q_{z1} = \left(\frac{1}{m_1} \right) \cdot (N_1 - F_1 - G_1)$
5	$\frac{d}{dt}z'_2 = Q_{z2}$	$Q_{z2} = \left(\frac{1}{m_2} \right) \cdot (N_2 - F_2 - G_2)$
6	$\frac{d}{dt}\omega_1 = Q_{\omega1}$	$Q_{\omega1} = \left(\frac{1}{I_1} \right) \cdot (-M_1(t) + T_1 \cdot r_0)$
7	$\frac{d}{dt}\omega_2 = Q_{\omega2}$	$Q_{\omega2} = \left(\frac{1}{I_2} \right) \cdot (-M_2(t) + T_2 \cdot r_0)$
8	$\frac{d}{dt}x_c = x'_c$	
9	$\frac{d}{dt}z_c = z'_c$	
10	$\frac{d}{dt}\alpha = \alpha'$	
11	$\frac{d}{dt}z_1 = z'_1$	
12	$\frac{d}{dt}z_2 = z'_2$	

В таблице 4 приведены параметры системы.

Таблица 4

Исходные данные модели

m_0	Масса кузова	1551
m_1	Масса переднего моста	212
m_2	Масса заднего моста	337

I_0	Момент инерции кузова относительно поперечной оси	2000
I_1	Момент инерции колеса (передний)	1,250
I_2	Момент инерции колеса (задний)	2,500
L_1	Расстояние от ЦТ кузова до передней оси	1,450
L_2	Расстояние от ЦТ кузова до задней оси	1,450
H_1	Высота положения ЦТ кузова над передней осью	0,396
H_2	Высота положения ЦТ кузова над задней осью	0,396
c_{f1}	Жесткость передней подвески	50960
c_{f2}	Жесткость задней подвески	71540
$c_{\delta 1}$	Жесткость шины переднего моста	336192
$c_{\delta 2}$	Жесткость шины заднего моста	672384
b_{f1}	Демпфирование передней подвески	5000
b_{f2}	Демпфирование задней подвески	5000
$b_{\delta 1}$	Демпфирование шин переднего моста	0
$b_{\delta 2}$	Демпфирование шин заднего моста	0

Центральным вопросом построения имитационной модели торможения автомобиля является модель качения колеса в продольной плоскости. В этой модели рассматриваются продольные силы в точках контакта шин с опорной поверхностью. Основы для построения этой модели взяты из работы [2].

В статье использована упрощенная модель, которая построена на основе гипотезы продольного скольжения. По этой гипотезе рассматриваются два режима движения колеса в продольной плоскости:

- 1) качение с упругим скольжением в зоне контакта,
- 2) полное скольжение в зоне контакта при блокировании колеса.

В области качения с упругим скольжением в зоне контакта касательная реакция принимается пропорциональной относительной скорости продольного скольжения в зоне контакта колеса с дорогой.

В области полного скольжения в зоне контакта при блокировании колеса реакция рассчитывается по закону трения Кулона.

Расчетные формулы для задания касательных реакций приведены в таблице 5.

При разработке вычислительного алгоритма учитывалась особенность расчетных формул при значениях скорости движения автомобиля близкой к нулевой (в модели для этого введена граничная скорость скольжения V_S). Это сделано с помощью корректирующих коэффициентов k_{v0} и k_v .

Касательные реакции

$\Delta v_1 = x'_c - \omega_1 \cdot r_{k1}$	Скорость скольжения колес переднего моста
$\delta_1 = \frac{\Delta v_1}{x'_c \cdot k_v + v_0 \cdot k_{v0}}$	Относительная скорость скольжения колес переднего моста
$T_{v1} = k_{T1} \cdot \delta_1$	Касательная реакция колес переднего моста в области упругого скольжения
$T_1 = \text{if} \left[x'_c > v_s, \text{if} \left[\delta_1 < \delta_v, T_{v1}, \text{if} \left[\delta_1 > 0, N_1 \cdot \mu_{s1}, -(N_1 \cdot \mu_{s1}) \right] \right], \right.$ $\left. \text{if} \left[\Delta v_1 > 0, N_1 \cdot \mu_{s1}, -(N_1 \cdot \mu_{s1}) \right] \right]$	
$\Delta v_2 = x'_c - \omega_2 \cdot r_{k2}$	Скорость скольжения колес заднего моста
$\delta_2 = \frac{\Delta v_2}{x'_c \cdot k_v + v_0 \cdot k_{v0}}$	Скорость скольжения колес заднего моста
$T_{v2} = k_{T2} \cdot \delta_2$	Скорость скольжения колес заднего моста в области упругого скольжения
$T_2 = \text{if} \left[x'_c > v_s, \text{if} \left[\delta_2 < \delta_v, T_{v2}, \text{if} \left[\delta_2 > 0, N_2 \cdot \mu_{s2}, -(N_2 \cdot \mu_{s2}) \right] \right], \right.$ $\left. \text{if} \left[\Delta v_2 > 0, N_2 \cdot \mu_{s2}, -(N_2 \cdot \mu_{s2}) \right] \right]$	

Наглядная графическая интерпретация используемой модели показана на рисунке 2.

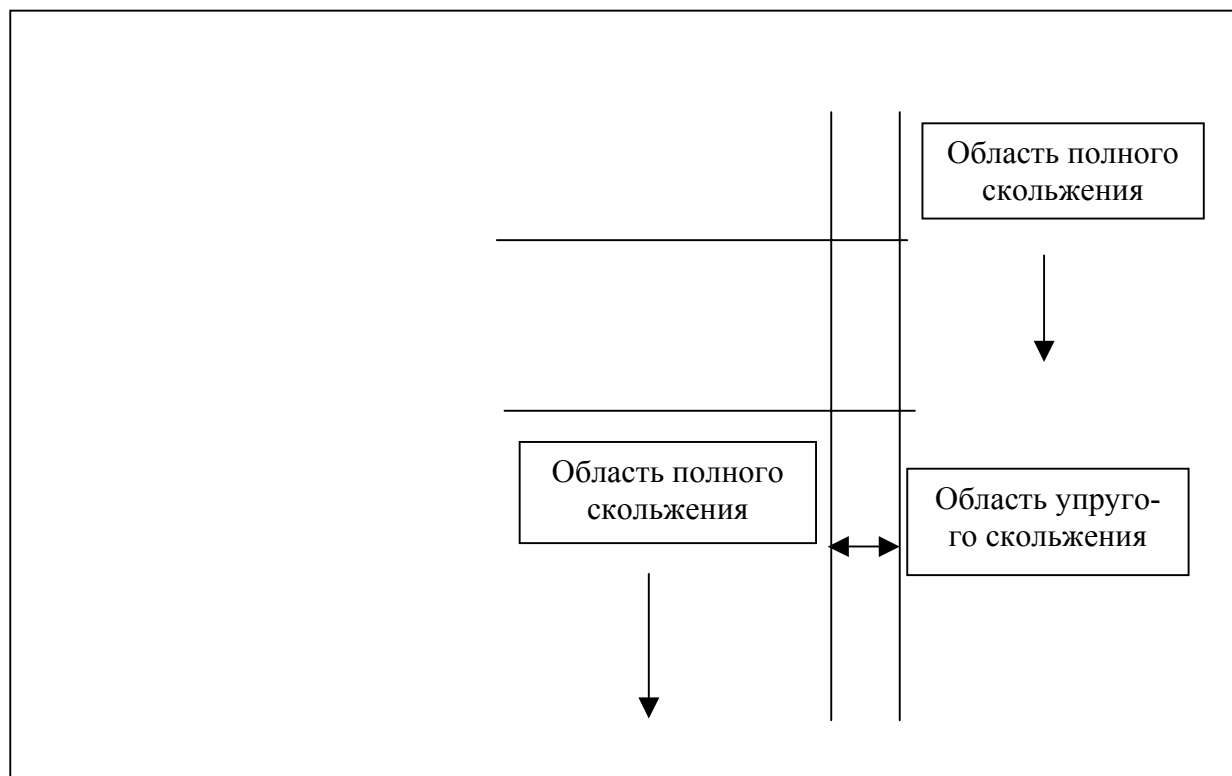


Рис. 2. Диаграмма расчетной модели тормозных сил на колесах:

δ – относительная скорость продольного скольжения в области контакта колеса с дорогой

В используемой модели используются параметры шины, приведенные в таблице 6.

Таблица 6

Параметры шины

r_{k1}	Радиус качения колес переднего моста	0,316
r_{k2}	Радиус качения колес заднего моста	0,316
r_0	Свободный радиус колес	0,344
μ_{s10}	Коэффициент сцепления при скольжении переднего моста для базовой скорости $V_{0\mu}$	0,590
μ_{k10}	Коэффициент сцепления без скольжения переднего моста для базовой скорости $V_{0\mu}$	0,820
μ_{s20}	Коэффициент сцепления при скольжении заднего моста для базовой скорости $V_{0\mu}$	0,590
μ_{k20}	Коэффициент сцепления без скольжения заднего моста для базовой скорости $V_{0\mu}$	0,820
δ_V	Максимальная относительная скорость скольжения	0,100
V_s	Граничная скорость скольжения	0,300
k_V	Коэффициент переменной составляющей скорости в скольжении	0,900
k_{V0}	Коэффициент постоянной составляющей скорости в скольжении	0,100
k_μ	Коэффициент изменения коэффициента сцепления от скорости	-0,098
$V_{0\mu}$	Базовая скорость для расчета коэффициента сцепления	11,111
k_{T1}	Окружная жесткость шин переднего моста	расчет
k_{T2}	Окружная жесткость шин заднего моста	расчет
μ_{s1}	Коэффициент сцепления при скольжении переднего моста	расчет
μ_{s2}	Коэффициент сцепления при скольжении заднего моста	расчет

На основании вышеизложенного независимым компонентом имитационной модели торможения автомобиля является собственно тормозная система, показанная на рисунке 3, которая для выбранного объекта исследования (автомобиль ГАЗель-2705) состоит из главного тормозного цилиндра, подводящих магистралей давления к переднему и заднему мостам и тормозных механизмов. В реализованной конструкции автомобиля передние тормозные механизмы дискового типа, а задние – барабанного типа [3].

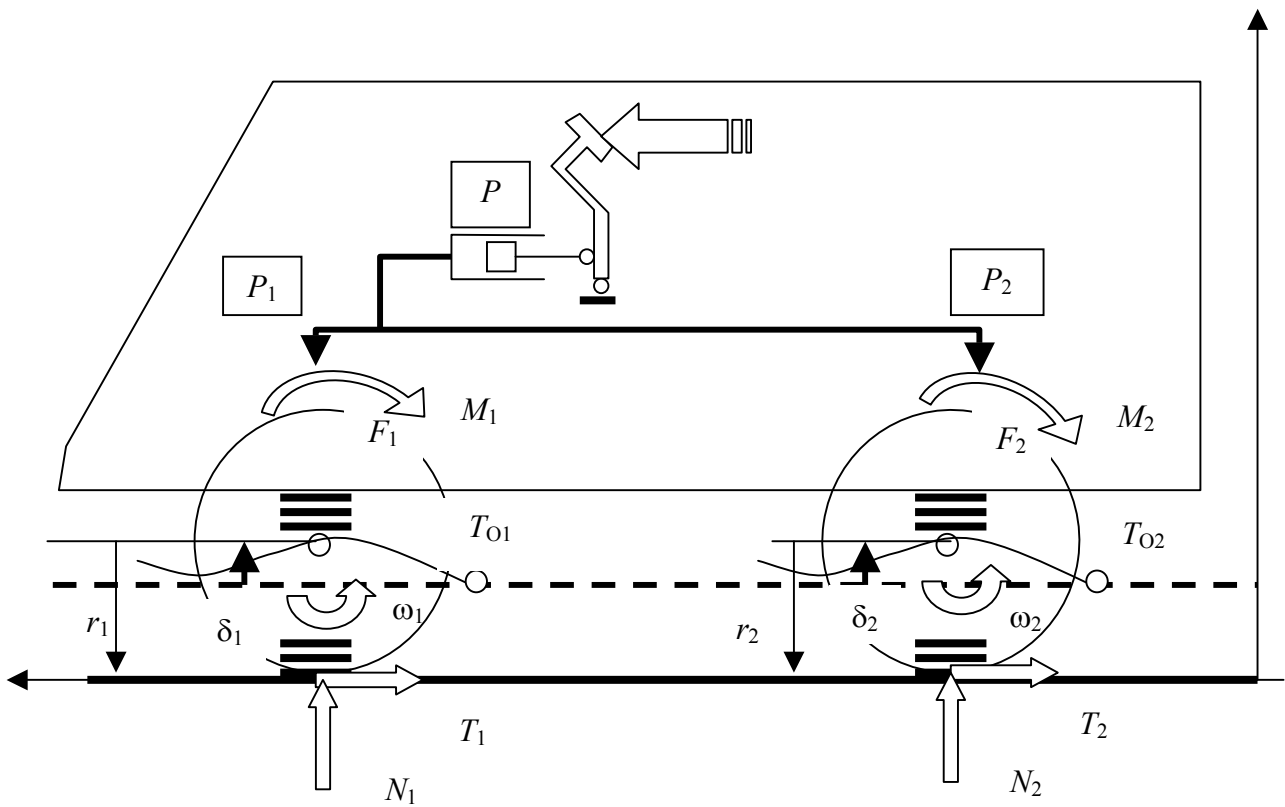


Рис. 3. Расчетная схема тормозной системы

Для оптимизации режима торможения в контур введено регулирование давления в магистрали задних тормозов. Диаграмма, характеризующая принятый закон регулирования, показана на рисунке 4.

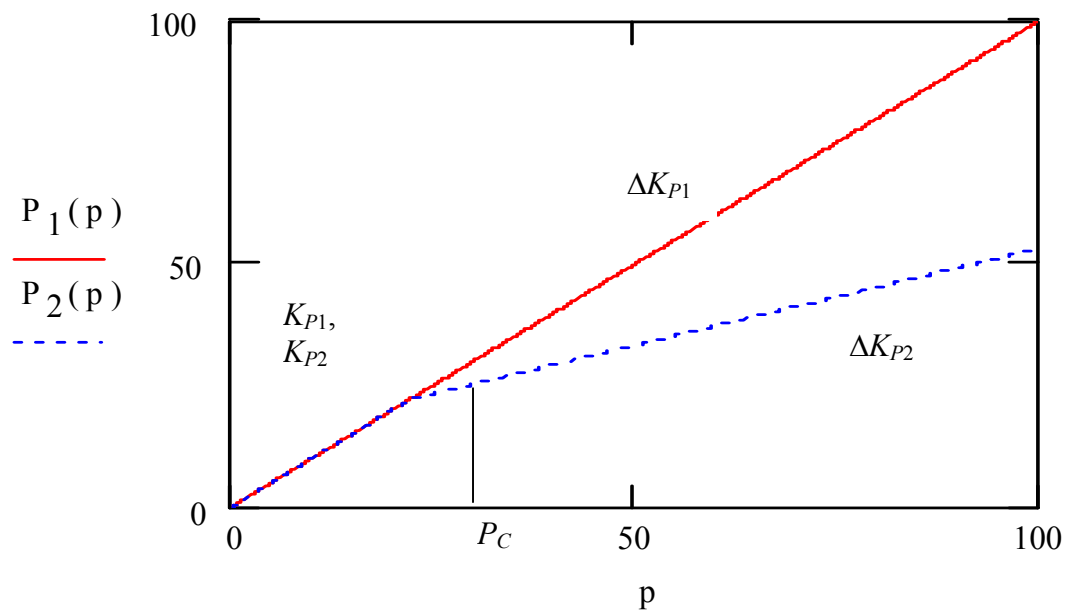


Рис. 4. Давление в тормозных магистралях:

P – давление в главном тормозном цилиндре; P_1 – давление в контуре передних тормозов, Кг/см^2 ; P_2 – давление в контуре задних тормозов, Кг/см^2

Временная диаграмма давлений в контурах передних и задних тормозов показана на рисунке. 5.

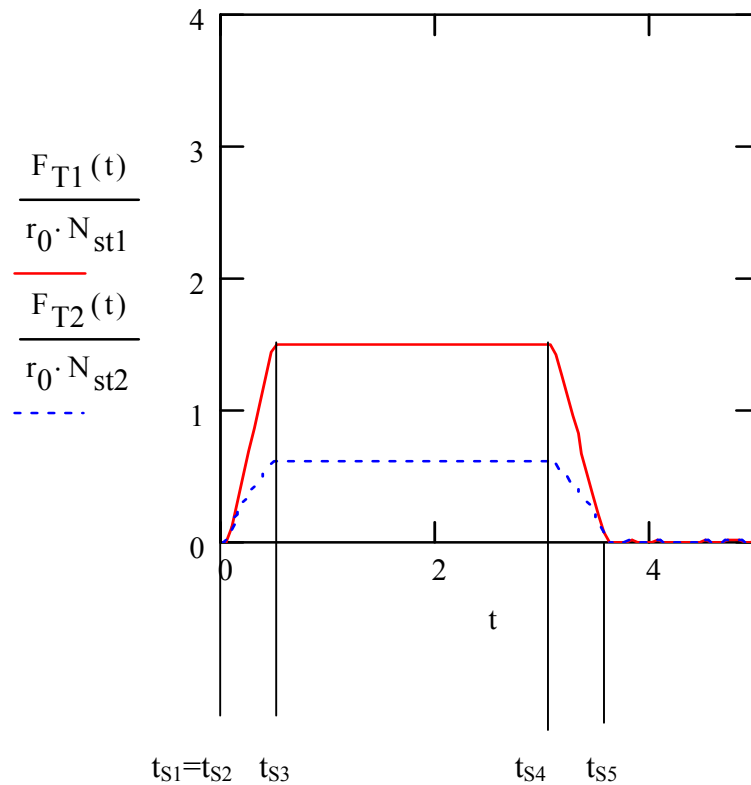


Рис. 5. Временная диаграмма относительных тормозных усилий в контурах передних и задних тормозов

Давление в тормозных магистралях определяет тормозные моменты. Действие тормозных моментов F_{T1} и F_{T2} характеризуется функциями давления в магистралях P_1 и P_2 и коэффициентами тормозных моментов ψ_1 — на переднем и ψ_2 — на заднем мостах. По этим коэффициентам определяются условные расчетные воздействия M_{01} и M_{02} для давления P_{c2} (максимальное давление, при котором срабатывает корректировочный клапан магистрали задних тормозов). Условные расчетные воздействия приводятся к окружному тормозному усилию по расчетному коэффициенту сцепления. Этот алгоритм расчета представляет возможность вариации конструктивных параметров, используемых тормозных механизмов и также дает возможность задания тормозного эффекта по экспериментальным данным.

Таким образом, в алгоритме используются следующие расчетные соотношения:

— для переднего моста:

$$M_{01} = \frac{\psi_1 \cdot N_{st1} \cdot \mu_{s1} \cdot r_0}{P_{c2}}$$

$$F_{T1}(t) = M_{01} \cdot P_1(F_T(t, t_{p1}))$$

– для заднего моста:

$$M_{02} = \frac{\Psi_2 \cdot N_{st2} \cdot \mu_{s2} \cdot r_0}{P_{c2}}$$

$$F_{T2}(t) = M_{02} \cdot P_2(F_T(t, t_{p2}))$$

Введенные в модель параметры тормозной системы приведены в таблице 7.

Таблица 7

Параметры тормозной системы

t_{s1}	Граничное значение первого участка временной диаграммы процесса торможения (рис. 5.)	0,000
t_{s2}	Граничное значение второго участка временной диаграммы процесса торможения (рис. 5.)	0,000
t_{s3}	Граничное значение третьего участка временной диаграммы процесса торможения (рис. 5.)	0,400
t_{s4}	Граничное значение четвертого участка временной диаграммы процесса торможения (рис. 5.)	3,000
t_{s5}	Граничное значение пятого участка временной диаграммы процесса торможения (рис. 5.)	3,500
P_T	Рабочее давление системы, Кг/см ²	117,500
t_{p1}	Время срабатывания тормозного механизма передних колес, с	0,070
P_{c1}	Граничное давление начального участка диаграммы давления в магистрали передних тормозов, Кг/см ²	22,000
k_{p1}	Коэффициент начального участка диаграммы давления в магистрали передних тормозов	1,000
Δk_{p1}	Коэффициент коррекции участка диаграммы давления в магистрали передних тормозов при срабатывании ограничительного клапана давления	0,000
t_{p2}	Время срабатывания тормозного механизма задних колес, с	0,070
P_{c2}	Граничное давление начального участка диаграммы давления в магистрали задних тормозов, Кг/см ²	22,000
k_{p2}	Коэффициент начального участка диаграммы давления в магистрали задних тормозов	1,000
Δk_{p2}	Коэффициент коррекции участка диаграммы давления в магистрали задних тормозов при срабатывании ограничительного клапана давления	-0,600
Ψ_1	Коэффициент тормозного момента на переднем мосту	0,500
Ψ_2	Коэффициент тормозного момента на заднем мосту	0,400

На рис. 6. показана имитационная модель торможения автомобиля.

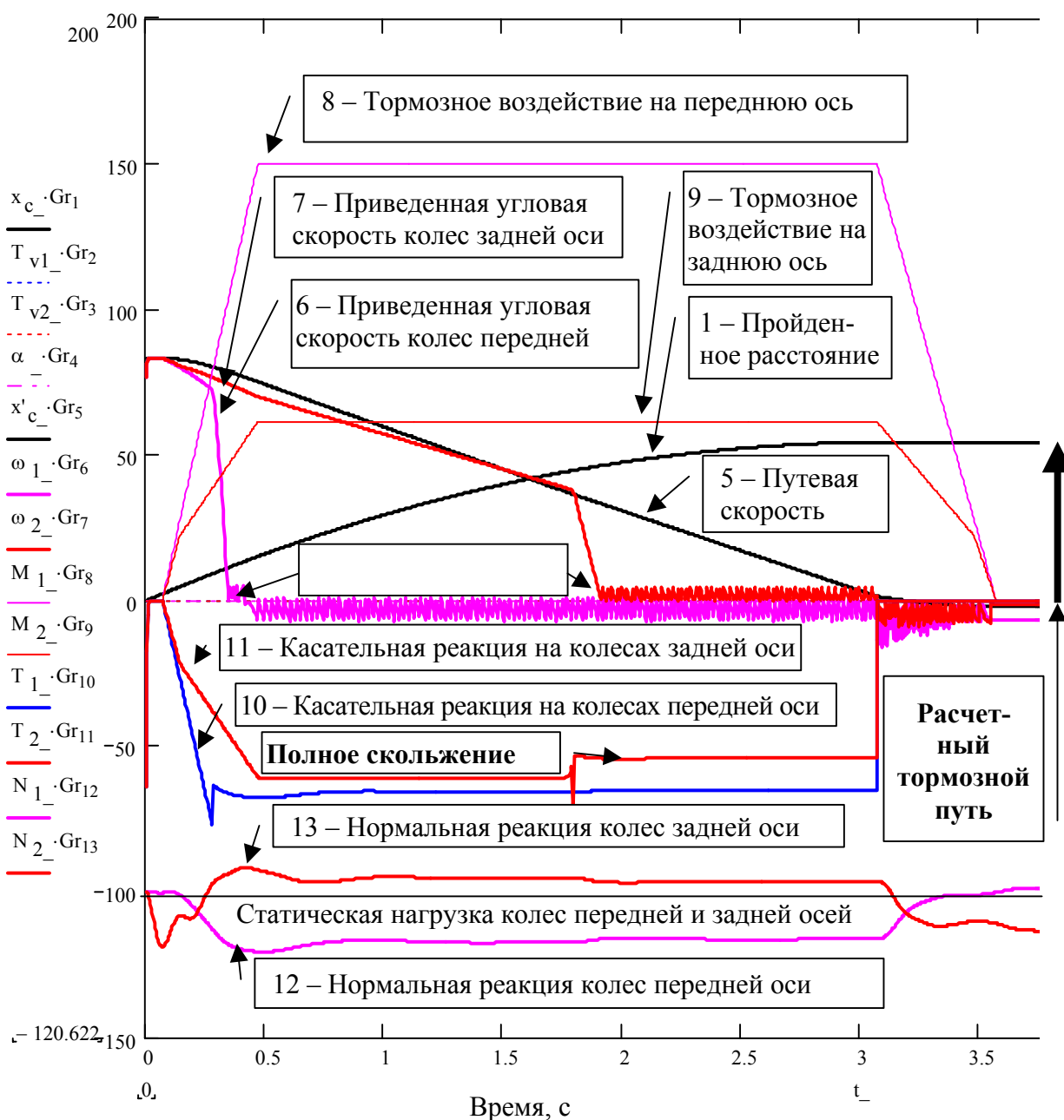


Рис. 6. Регистрируемые процессы в имитационной модели торможения автомобиля

Таким образом, разработанная имитационная модель торможения автомобиля позволяет исследовать основные показатели процессов в зависимости от времени (рис. 6), которые могут быть использованы для разработки методики оценки сцепных свойств шин.

Литература

1. Русаков В.З. Активная безопасность автотранспортных средств в эксплуатации: Монография / В.З. Русаков. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2004. – 280 с.
2. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение. 1976. – 535 с.
3. Рябчинский А.И. Динамика автомобиля и безопасность дорожного движения: Учебное пособие / А.И. Рябчинский, А.А. Токарев, В.З. Русаков. – М.: МАДИ (ГТУ), 2002. – 131 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ФРИКЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.В. Шаповалов, Р.Г. Ялышев, М.Н. Езупова

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону

С целью обеспечения набора информационных диагностических характеристик для фрикционных механических систем и ускорения процесса их испытаний разработан метод, основанный на применении трибоспектральной идентификации и физико-математического моделирования.

При решении задач оптимизации и технической диагностики фрикционных механических систем (ФМС) используются методы трибоспектральной идентификации [1, 2] и физического моделирования. С одной стороны, для диагностирования ФМС требуется очень большая по объему информация, которую сложно получить в условиях их эксплуатации. С другой стороны, для достоверного контроля работоспособности узлов трения необходимо отобрать минимальное число диагностических параметров, которые должны хорошо коррелировать с основными триботехническими параметрами (износостойкость, коэффициент трения, зазоры в сопряжениях и т.д.).

С целью обеспечения набора информационных диагностических характеристик для ФМС и ускорения процесса их испытаний разработан метод, основанный на применении трибоспектральной идентификации и физико-математического моделирования. Суть его состоит в том, что в лабораторных условиях проводят комплексное исследование фрикционной системы, моделирующей реальную ФМС, варьируя в широких диапазонах условия контактирования пар трения и динамические параметры механической системы. Такой подход позволяет получить подробную информацию о процессах, протекающих в узлах трения и в механической системе, а также корреляционную связь между выбранными триботехническими и трибоспектральными характеристиками.

Метод включает в себя несколько этапов. На первом этапе в лабораторных условиях производится исследование собственных трибоспектральных и триботехнических характеристик, предварительно подобранных для данного узла поверхностей трения. Определяется взаимосвязь и коэффициент корреляции между этими характеристиками и эффективная ширина частотного спектра ω_3 динамических составляющих процесса фрикционного взаимодействия пар трения. Затем на основании предварительно выполненного динамического расчета искомой ФМС определяется к-я частота собственных колебаний, лежащая за ω_3 .

На втором этапе строится физическая модель ФМС, которая имеет К масс и амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ), соответствующие АФЧХ реальной системы [3].

Частоты собственных колебаний модели равны частотам собственных колебаний ФМС, полученных расчетным путем. Влияние коэффициентов затухания на колебательные процессы учитывается путем создания равных логарифмических декрементов колебаний в натурной системе и в модели.

Вибродиагностический сигнал, возбуждаемый исследуемым фрикционным взаимодействием, регистрируется датчиками и после преобразования с помощью аналогоцифрового преобразователя в цифровой код вводится в компьютер. Полученный массив данных обрабатывается по специальным программам для получения трибоспектральных характеристик, наиболее тесно коррелирующих с выбранными триботехническими параметрами (интенсивностью изнашивания, величиной коэффициента трения и т.д.).

Полученная информация о процессах трения, протекающих в модельной ФМС (динамические характеристики, трибоспектральные характеристики, коррелирующие с выбранными триботехническими параметрами) заносится в банк данных и в дальнейшем используется для диагностирования реальной ФМС в полевых условиях.

Собранная информация о ФМС подвергается предварительной программной обработке. С помощью методов быстрого преобразования Фурье полученный сигнал разлагается в спектр, позволяющий выявить зоны и характер наибольших изменений сигнала в частотной и временной областях. На основании данных спектрально-статистического анализа определялись наиболее информативные триботехнические характеристики.

На третьем этапе путем сравнения пороговых значений эталонных доверительных границ триботехнических характеристик реальной ФМС, полученных ранее, со значениями доверительных границ этих характеристик модельной механической системы, имеющей динамические характеристики, совпадающие с динамическими характеристиками реальной ФМС, выполняется анализ технического состояния ФМС. С учетом определенных допущений проводится диагностирование механической системы, определение вида и интенсивности изнашивания в узлах трения, влияния ФМС на вид износа, а также прогнозирование поведения реальной ФМС в будущем, ее возможностью технического состояния.

Все это способствует ускорению испытаний фрикционных систем.

Литература

1. Запорожец В.В. Повышение износостойкости и срока службы машин. – Киев, 1970. – С. 19-24.
2. Запорожец В.В. Проблемы трения и изнашивания. – Киев, 1982. – Вып. 2. – С. 77-83.
3. Шаповалов В.В. Трение и износ, 1985. – Т. 6. – № 3. – С. 451-457.

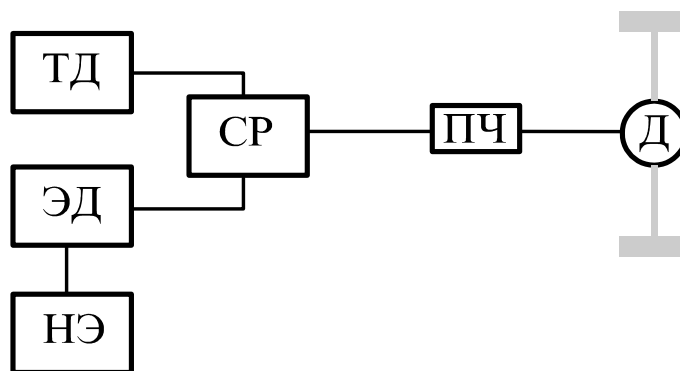
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ

А.Н. Филькина

Ижевский государственный технический университет

Предлагается при выборе основных составляющих и алгоритма управления работой гибридной энергосиловой установки проводить моделирование движения автомобиля в усредненных условиях эксплуатации при одновременном энергетическом анализе потребляемой электрической энергии накопителя и теплового двигателя.

На современном этапе развития большое количество автомобильных фирм в мире занимаются проблемами создания гибридных энергосиловых установок, позволяющих значительно улучшить показатели экологичности и повысить топливную экономичность автомобилей. Наиболее распространенная в настоящее время структурная схема гибридного автомобиля типа 4×2 представлена на рисунке 1. Для согласования частот вращения валов теплового двигателя (ТД) и электродвигателя (ЭД) они соединяются между собой через согласующий редуктор (СР). Другие обозначения на рисунке: НЭ – накопитель электрической энергии, ПЧ – преобразующая часть (трансмиссия), Д – дифференциал.



**Рис. 1. Структурная схема
гибридного автомобиля**

Движение автомобиля с постоянными и близкими к ним скоростями в данном случае осуществляется за счет энергии, передаваемой к ведущим колесам по цепи ТД - СР - ПЧ - Д. Во время динамичного разгона автомобиля к ведущим колесам поступает дополнительная энергия по цепи НЭ - ЭД - СР - ПЧ - Д. При необходимости зарядки НЭ в режиме движения с установившимися скоростями и близкими к ним происходит зарядка НЭ по цепи ТД - СР - ЭД - НЭ, т.е. ЭД переходит в режим работы генератора. Движение накатом и торможение сопровождается рекуперацией кинетической энергии в энергию НЭ по цепи Д - ПЧ - СР - ЭД - НЭ.

Одной из основных проблем создания гибридного автомобиля является разработка алгоритма управления работой электродвигателя, который реализуется в электронном блоке. Для уменьшения временных и денежных затрат на доводку электронного блока обоснование алгоритма предлагается проводить путем моделирования движения автомобиля на компьютере в усредненных городских и магистральных условиях эксплуатации (ездовых

циклах). Моделирование движения автомобиля позволяет определять суммарную необходимую энергию, подводимую к ведущим колесам $U_{\text{сум}}$, которая представляет собой при движении по ровной горизонтальной дороге сумму энергий, затраченных на сопротивления качению колес и воздуха.

При эксплуатации гибридного автомобиля желательно, чтобы энергия, поступающая от НЭ к ведущим колесам $U_{\text{ЭД}}$, полностью восполнялась от рекуперации энергии при торможении $U_{\text{рек}}$ и дополнительно от энергии ТД $U_{\text{ТД1}}$ при работе ЭД в генераторном режиме при движении автомобиля с постоянными или близкими к ним скоростями, т.е. необходимо обеспечить практически постоянство заряженности НЭ при длительной эксплуатации автомобиля. При этом должно выполняться равенство:

$$U_{\text{ЭД}} = U_{\text{рек}} \eta_{\text{Д}}^{\text{обр}} \eta_{\text{ПЧ}}^{\text{обр}} \eta_{\text{СР}}^{\text{обр}} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{зар}} + U_{\text{ТД1}} \eta_{\text{СР}}^{\text{обр}*} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{зар}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{Д}}^{\text{обр}}$, $\eta_{\text{ПЧ}}^{\text{обр}}$, $\eta_{\text{СР}}^{\text{обр}}$ – коэффициенты полезного действия (КПД) соответственно Д, ПЧ и СР при передаче энергии в обратном направлении от колес к ЭД; $\eta_{\text{СР}}^{\text{обр}*}$ – КПД СР при передаче энергии от ТД к НЭ; $\eta_{\text{Г}}$ – КПД ЭД при его работе в генераторном режиме; $\eta_{\text{зар}}$ – КПД зарядного процесса НЭ.

Суммарная энергия $U_{\text{сум}}$, поступающая к ведущим колесам от ТД и ЭД, равна:

$$U_{\text{сум}} = U_{\text{ЭД}} \eta_{\text{разр}} \eta_{\text{ЭД}} \eta_{\text{СР}} \eta_{\text{ПЧ}} \eta_{\text{Д}} + U_{\text{ТД2}} \eta_{\text{СР}} \eta_{\text{ПЧ}} \eta_{\text{Д}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{разр}}$ – КПД процесса разрядки НЭ; $\eta_{\text{ЭД}}$ – КПД ЭД при работе в тяговом режиме; $\eta_{\text{СР}}$, $\eta_{\text{ПЧ}}$, $\eta_{\text{Д}}$ – КПД СР, ПЧ и Д при передаче энергии к ведущим колесам; $U_{\text{ТД2}}$ – энергия, поступающая от ТД к ведущим колесам в направлении цепи СР - ПЧ - Д. Отметим, что суммарная энергия, затрачиваемая ТД при движении автомобиля,

$$U_{\text{ТД}} = U_{\text{ТД1}} + U_{\text{ТД2}}.$$

Анализ уравнений (1), (2) позволяет достаточно быстро обосновать алгоритм управления, требования к характеристикам и энергоемкости НЭ и к мощностным показателям и характеристикам ТД и ЭД. При этом основой выполнения энергетического анализа должны быть требования к тягово-скоростным свойствам, записанным в техническом задании на разработку гибридного автомобиля. Рассмотренный энергетический баланс автомобиля был применен при создании экспериментальных образцов гибридных автомобилей и доказал свою эффективность.

Литература

1. «Иж» с комбинированной силовой установкой / А.С. Кондрашкин, Н.М. Филькин, В.М. Ардашев, В.Г. Мезрин, В.Ю. Сальников // Автомобильная промышленность. – 1997. – № 11. – С. 7-9.
2. Легковой автомобиль с гибридной силовой установкой. Результаты экспериментов / А.С. Кондрашкин, Н.М. Филькин, В.Г. Мезрин, В.Ю. Сальников // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 11. – С. 9-10.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД КОЛОННЫ ЗДАНИЙ НА ПЕСЧАНОМ ОСНОВАНИИ

Ю.Н. Мурзенко, С.И. Евтушенко, Е.Ю. Анищенко
Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Излагаются результаты экспериментальных исследований работы крупномасштабных моделей железобетонных фундаментов под колонны зданий на песчаном основании.

В программе экспериментальных исследований решались следующие задачи: исследование распределения нормальных напряжений, получение данных о предельных нагрузках на модель фундамента, линейных и сдвиговых деформациях в основании, изучение осадок и схем трещинообразования в процессе нагружения вплоть до исчерпания несущей способности системы.

Программа экспериментов включала серию из четырех опытов, в которых варьировались следующие параметры: толщина и армирование плитной части моделей фундаментов, эксцентриситет приложения нагрузки.

Исследования были проведены на базе лаборатории оснований и фундаментов кафедры «САПР ОСФ» ЮРГТУ (НПИ). Опыты проводились в пространственной лотке испытательной машины МФ-1 конструкции Ю.Н. Мурзенко (рис. 1). Описание испытательной машины, приборов и методики экспериментов приведено в работе [1]. В целях обеспечения сопряжения измерительной тензометрической системы (СИИТ) с дистанционными преобразователями с обработкой показаний в реальном масштабе времени разработаны плата сопряжения и программные модули «Комплекс-1» и «Комплекс-2» [2].

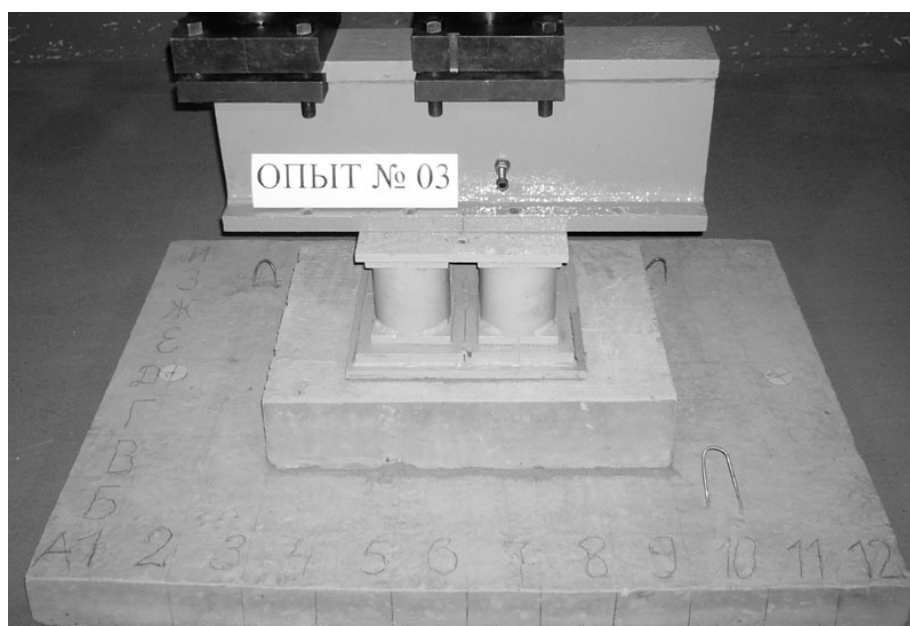


Рис. 1. Общий вид железобетонной модели в лотке машины МФ-1

Параметры напряженно-деформированного состояния основания измерялись высокочувствительными преобразователями напряжений (мессдозы) МК-37, МК-26, МК-54 конструкции Ю.Н. Мурзенко; преобразователями деформаций (деформометры) Д-2 конструкции Ю.В. Галашева и Ю.Н. Мурзенко; датчиками сдвига конструкции В.В. Шматкова.

На каждой ступени нагружения, после стабилизации осадки основания, производился опрос дистанционных датчиков при помощи автоматизированной системы и разработанных программных модулей «Комплекс-1» и «Комплекс-2», регистрировалась осадка по показаниям прогибомера ПАО-6. Проводились визуальные наблюдения за развитием трещин железобетонных моделей фундаментов в процессе нагружения.

Размеры верхних подкладных железобетонных плит моделей фундаментов в плане составляли 600 х 450 мм, а высота 120 мм. Нижняя плитная часть изготавливалась высотой 70 и 90 мм, размеры подошвы 1200 мм х 900 мм. Армирование плит, а также изготовление монтажных петель производили сетками из арматурных стержней диаметром 5 мм класса В-1. Две опорные плиты (первый и второй опыты) имели высоту 70 мм и армировались одинаковой сеткой 55/90/5/5. Остальные опорные плиты первой серии имели высоту 90 мм и армировались одинаковыми сетками 75/120/5/5. Верхние подкладные плиты: в первом опыте армировались сеткой 30/65/5/5, во втором опыте – 45/100/5/5, в третьем опыте – 30/65/5/5, в четвертом опыте 22,5/50/5/5.

В таблице сведены общие данные по проведенным опытам, а на рис. 2 приведены графики «нагрузка – осадка».

Таблица

Общие экспериментальные данные

№ опыта	Размер опорной плиты, м	Площадь арматуры подкладной плиты, см ²	$P_{пр}$, кПа	Эксцентриситет, e	Характер истощения несущей способности
1	$l = 1,2$ $b = 0,9$ $h = 0,07$	$A_l = 1,77$ $A_b = 2,94$	$P_{пр} = 722,2$	0	Разрушение основания (призмы продавливания) и модели
2	$l = 1,2$ $b = 0,9$ $h = 0,07$	$A_l = 1,77$ $A_b = 2,94$	$P_{пр}^{ср} = 322,2$	0,11	Разрушение модели от продавливания подкладной плиты
3	$l = 1,27$ $b = 0,9$ $h = 0,09$	$A_l = 1,18$ $A_b = 1,96$	$P_{пр}^{ср} = 277,8$	0,11	Разрушение модели от продавливания подкладной плиты
4	$l = 1,2$ $b = 0,9$ $h = 0,09$	$A_l = 1,96$ $A_b = 2,35$	$P_{пр}^{ср} = 481,5$	0,0421	Разрушение модели от продавливания плит модели

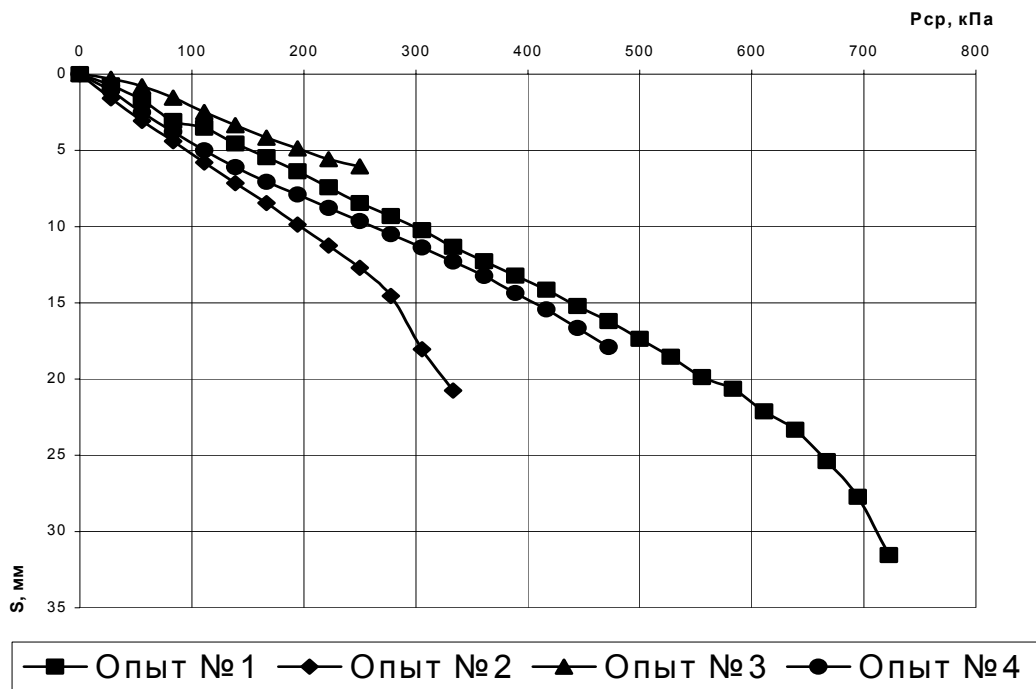


Рис. 2. График осадок

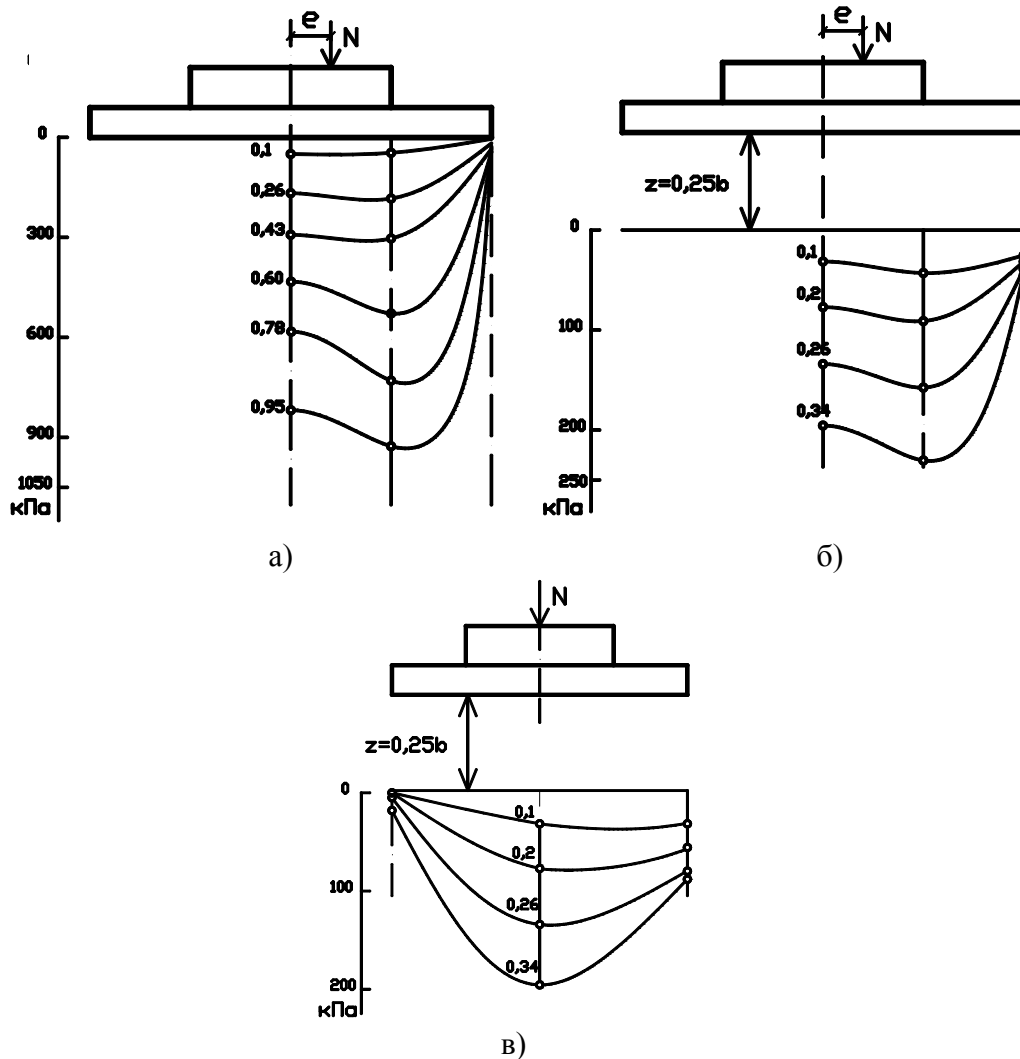


Рис. 3. Эпюры нормальных вертикальных напряжений, второй опыт: а – по подошве модели фундамента; б – на глубине $z = 0,25 b$ в продольном направлении; в – на глубине $z = 0,25 b$, по поперечном направлении

Как видно из приведенных на рис. 3 данных, эпюра контактных напряжений в плоскости действия момента при действии нагрузки с большим эксцентриситетом имеет седлообразный характер во всем интервале нагружения. Это объясняется большим значением эксцентриситета во втором и третьем опытах $e = 0,11$. В этом случае исчерпание несущей способности модели фундамента происходило за счет разрушения подкладной плиты от продавливания; в случае $e = 0,0421$ – разрушение подкладной и опорной плит от продавливания. Эпюра нормальных вертикальных напряжений на глубине $z = 0,25 b$ в плоскости действия момента со стороны эксцентриситета также имеет выраженные превышения значений напряжений под проекцией грани подкладной плиты по отношению к значениям напряжений в средней части фундамента (рис. 3,б) в случае приложения нагрузки с большим эксцентриситетом $e = 0,11$.

На рис. 4,а приведена эпюра контактных напряжений в плоскости действия момента для случая приложения нагрузки с эксцентриситетом $e = 0,0421$.

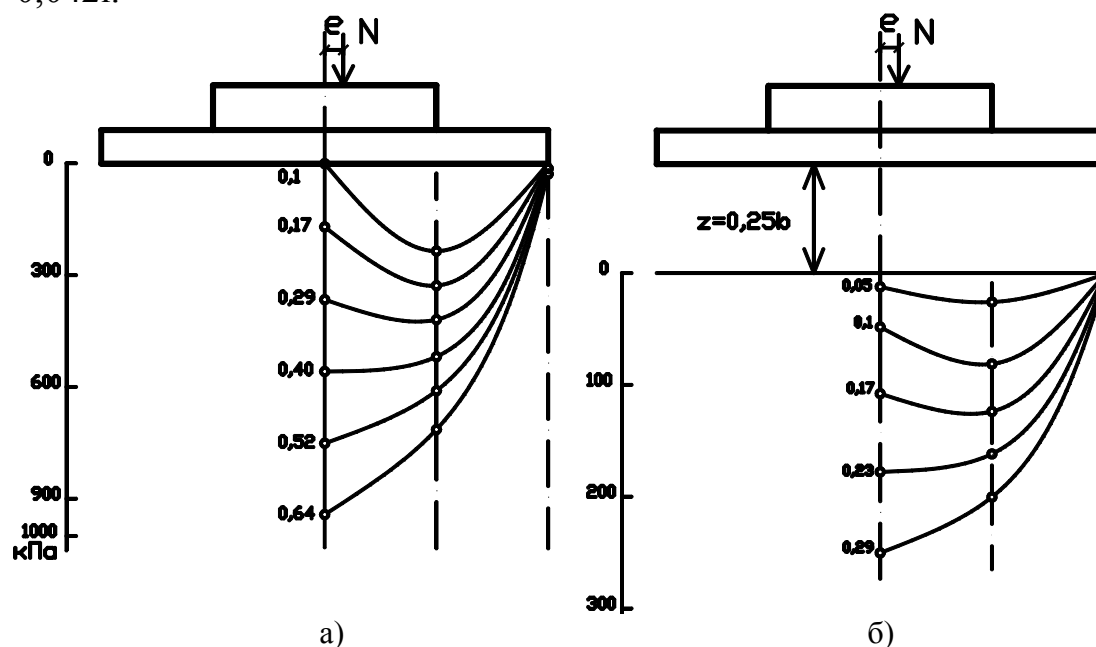


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений, четвертый опыт:

а – по подошве модели фундамента; б – на глубине $z = 0,25 b$, в продольном направлении

На первых ступенях нагружения эпюра контактных напряжений имеет седлообразный характер. Аналогичные результаты получены в опытах [3-5] и др. Для случая жестких штампов (опыты Ю.Н. Мурзенко и З.Я. Тарикулиева) в ходе увеличения нагрузки эпюра контактных напряжений имела седлообразный характер вплоть до нагрузок, близких к предельным и затем преобразовывалась в параболическую. В наших опытах для гибкой модели фундамента с эксцентриситетом приложения нагрузки $e = 0,0421$, приращения ординат эпюр напряжений в средней части фундамента увеличивались больше чем в краевых зонах уже на начальных ступенях нагружения. Эпюра контактных напряжений преобразовывалась в параболическую. Первые трещины появлялись при нагрузках 100-150 кН. При

этом увеличивалась гибкость модели и концентрация напряжений по оси нагрузки приобретала прогрессирующий характер. Подобное распределение напряжений было отмечено и на глубине $z = 0,25 b$ при $e = 0,0421$ (рис. 4,б).

Передача нагрузки на нижнюю плитную часть происходит через подкладную плиту и именно под ней основание воспринимает большую часть нагрузки, передаваемой на фундамент. На рис. 3,в изображена эпюра напряжений на глубине $z = 0,25 b$ в сечении вдоль короткой стороны фундамента для случая приложения нагрузки с эксцентриситетом $e = 0,11$. Эпюры имеют четко выраженный параболический характер.

На основании обработки экспериментальных данных получены эпюры вертикальных линейных деформаций под углом модели со стороны эксцентриситета приложения нагрузки (рис. 5). Наибольших значений относительные деформации ε_z в рассмотренном интервале (максимальная глубина $0,5 b$) во всем интервале нагружения достигают на глубине $0,5 b$ от подошвы фундамента.

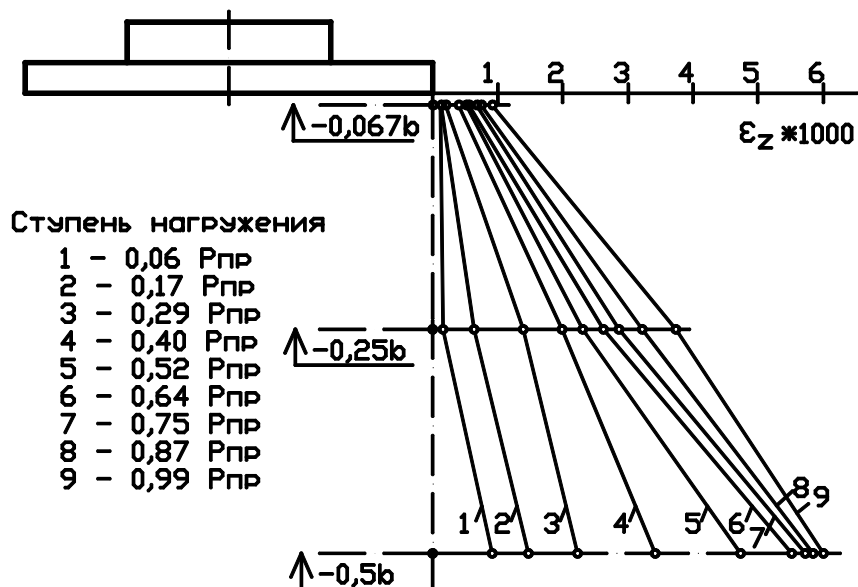


Рис. 5. Эпюры вертикальных относительных деформаций ε_z в угловой зоне

Датчики сдвига располагались в основании в точках, показанных на рис. 6. Полученные результаты представлены в виде изолиний сдвиговых деформаций на соответствующих ступенях нагружения (рис. 7).

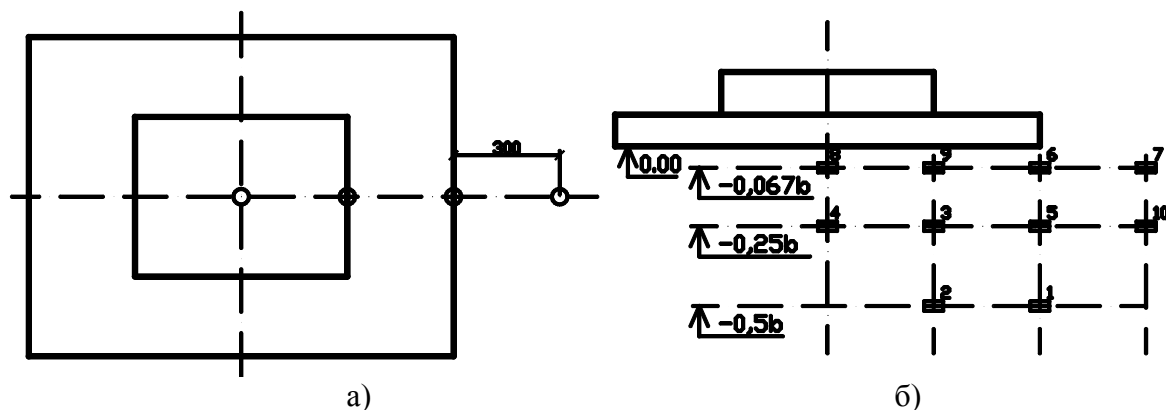


Рис. 6. Схемы расположения датчиков сдвига: а – в плане; б – в продольном разрезе

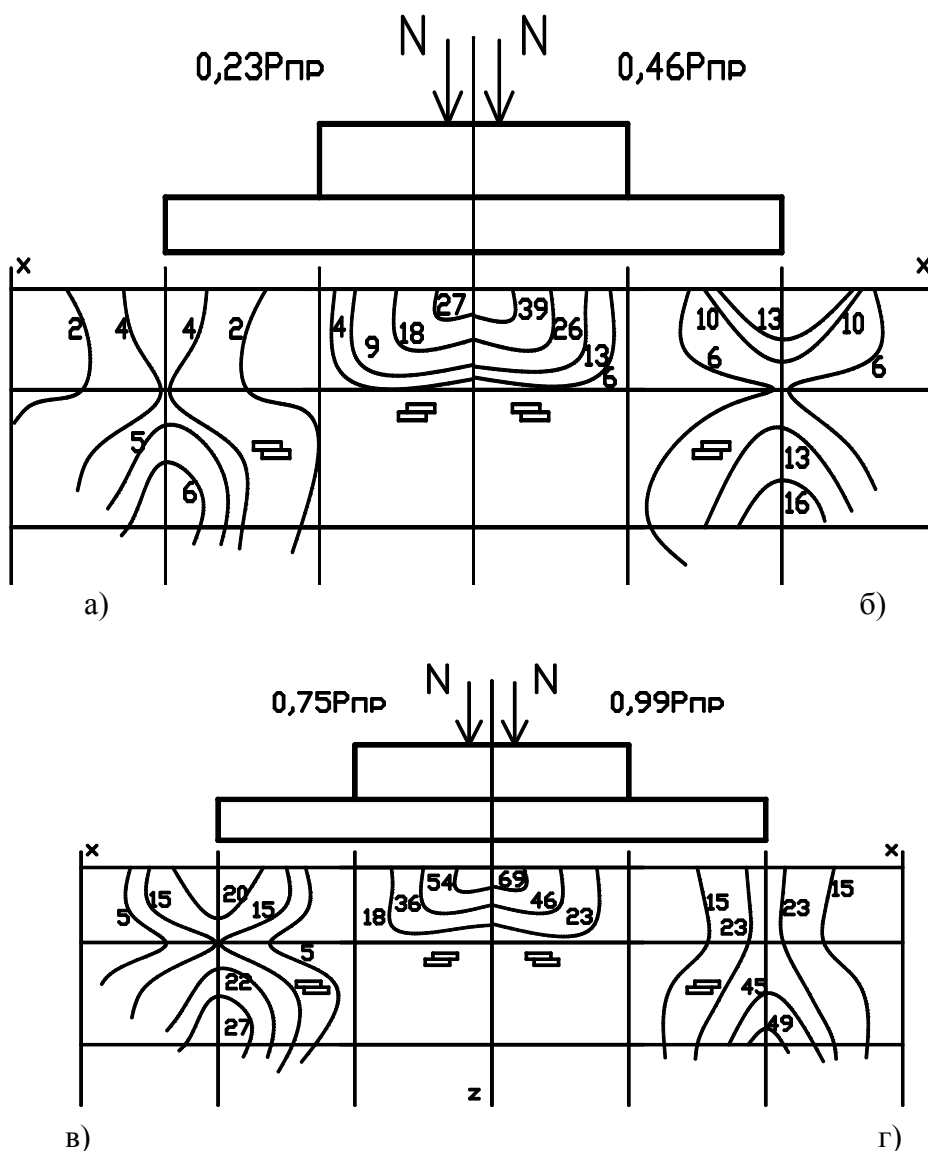


Рис. 7. Изолинии сдвиговых деформаций на ступенях нагружения:
0,23 (а), 0,46 (б), 0,75 (в), 0,99 (г) от предельной нагрузки ($\gamma xz \cdot 10^3$)

Полученные данные свидетельствуют о том, что уже при малых эксцентриситетах нагрузки в песчаном основании модели образуются характерные зоны сдвиговых деформаций. Зона наибольших сдвиговых деформаций примыкает к подошве модели и располагается в ее центральной части. Вторая зона развития сдвиговых деформаций примыкает к краевой части модели фундамента и максимальные значения в данной зоне наблюдаются на глубине $0,5 b$ (450 мм).

С ростом нагрузки происходят небольшие изменения в характере сдвиговых деформаций под краем фундамента. Это связано с развитием пластических деформаций в краевой зоне фундамента. Характер сдвиговых деформаций под центральной частью фундамента с увеличением нагрузки значительно не изменяется, что свидетельствует об образовании под центром фундамента уплотненного ядра.

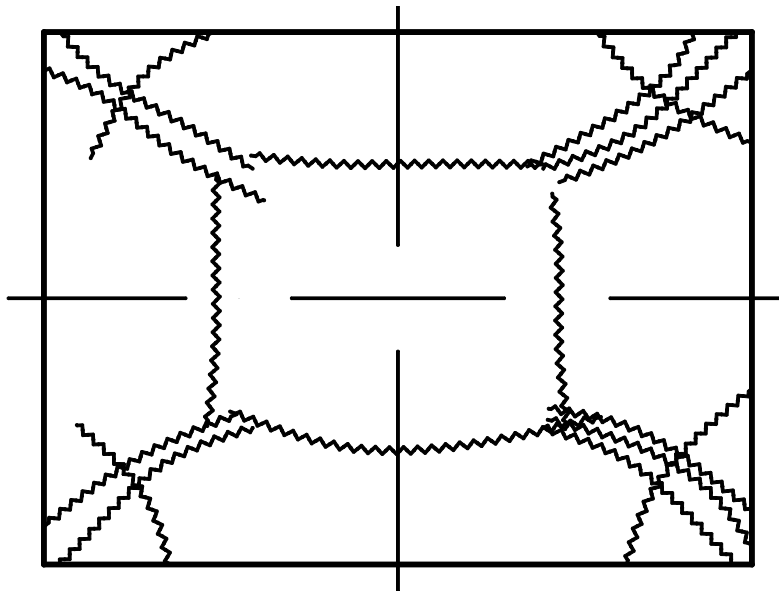


Рис. 8. Схема трещинообразования по поверхности подошвы (опыт № 1)

В ходе проведения экспериментов проводились визуальные наблюдения за процессом трещинообразования с фиксацией характерных значений нагрузки. На рис. 8 представлена схема трещинообразования опорной плиты модели фундамента по поверхности подошвы.

Литература

1. Мурзенко Ю.Н. Расчет оснований зданий и сооружений в упругопластической стадии работы с применением ЭВМ. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 135 с.
2. Анищенко Е.Ю., Евтушенко С.И. Программно-аппаратный комплекс автоматизированной системы научных исследований оснований и фундаментов / В данном сборнике.
3. Тарикулиев З.Я., Мурзенко Ю.Н. Исследование распределения контактных напряжений в песчаном основании под заглубленными квадратными штампами // Экспериментальные исследования инженерных сооружений: Межвуз. сб. – Новочеркасск: НПИ, 1969. – С. 94-99.
4. Мурзенко Ю.Н., Цесарский А.А., Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной фундаментной плиты и ее совместной работы с песчаным основанием // Исследования напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов: Межвуз. сб. – Новочеркасск: НПИ, 1971. – С. 35-41.
5. Евтушенко С.И. Работа сборных плитных фундаментов и грунтового основания. Дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1988. – 195 с.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, каф. САПР ОСФ, т. 55-416.

УДК 624.131.522.3.001.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЛАТАНСИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЛОТКОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Ю.Н. Мурзенко, А.К. Луценко, С.А. Кольцова

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Разработана и реализована методика выделения упругой и пластической частей деформаций основания, впервые обеспечившая возможность экспериментального определения дилатансионной характеристики песчаного основания в пространственном лотке.

До настоящего времени подобные исследования проводились в приборах трехосного сжатия. Благодаря высокой точности нагружения машины МФ-1, непосредственного измерения в опытах всех составляющих тензоров напряжений и деформаций, расшифровки показаний датчиков с учетом гистерезиса градуировочных графиков стало возможным получение дилатансионных характеристик деформирования грунта в пространственном лотке [1]. В качестве исходного было использовано дилатансионное соотношение В. Н. Николаевского:

$$d\varepsilon^p = \lambda(\chi) d\gamma^p,$$

где λ – коэффициент (скорость) дилатансии; χ – параметр упрочнения; $d\varepsilon^p$ – первый инвариант тензора приращений пластических деформаций; $d\gamma^p$ – второй инвариант девиатора приращений пластических деформаций.

Изучено распределение коэффициента дилатансии в фиксированных точках грунтового основания под круглым шероховатым жестким штампом, а также его изменение в процессе нагружения. В точках массива основания такого штампа выполнены измерения составляющих тензора деформаций (в случае симметрии их четыре: $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}$) с помощью тензометрических деформометров: линейных и сдвиговых (рис. 1,а). Для определения приращений пластических деформаций грунта нагрузка на штамп прилагалась ступенчато с пошаговой нагрузкой - разгрузкой и задержкой времени на стабилизацию деформаций (рис. 1,б). Такая схема нагружения основания дала возможность получить в рассматриваемых точках приращения компонент тензора деформации, а также выделять упругую и пластическую часть этих приращений. Изменение значений коэффициента дилатансии качественно совпало с изменением плотности грунта в массиве (рис. 1,в). Полученные результаты сравнимы с результатами других авторов.

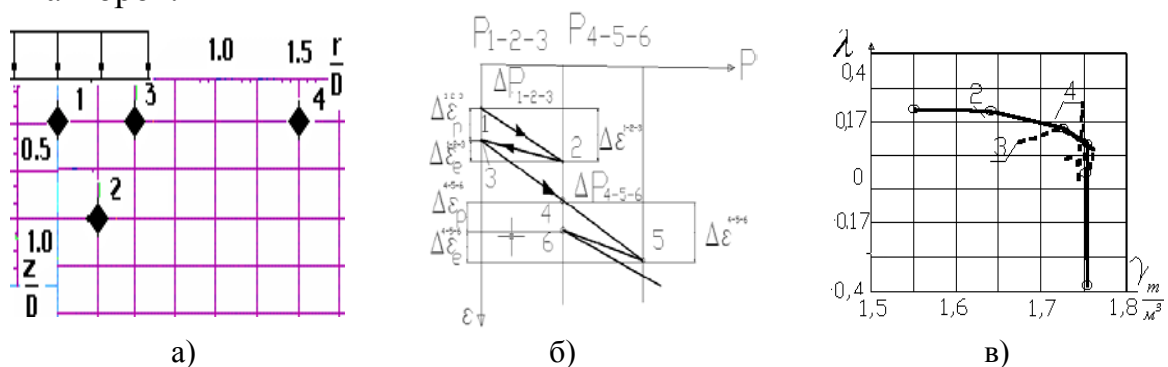


Рис. 1. Схема девиаторного пошагового нагружения основания (а), схема расположения деформометров в песчаном основании круглого штампа (б), результаты измерения коэффициента дилатансии и плотности грунта (в)

Изучено распределение дилатансионных характеристик в краевой зоне грунтового основания модели гибкой плиты в процессе нагружения в фиксированных точках [2]. Изменение значений коэффициента дилатансии было сопоставлено с изменениями плотности (рис. 2,б) и деформациями сдвига в массиве (рис. 2,в).

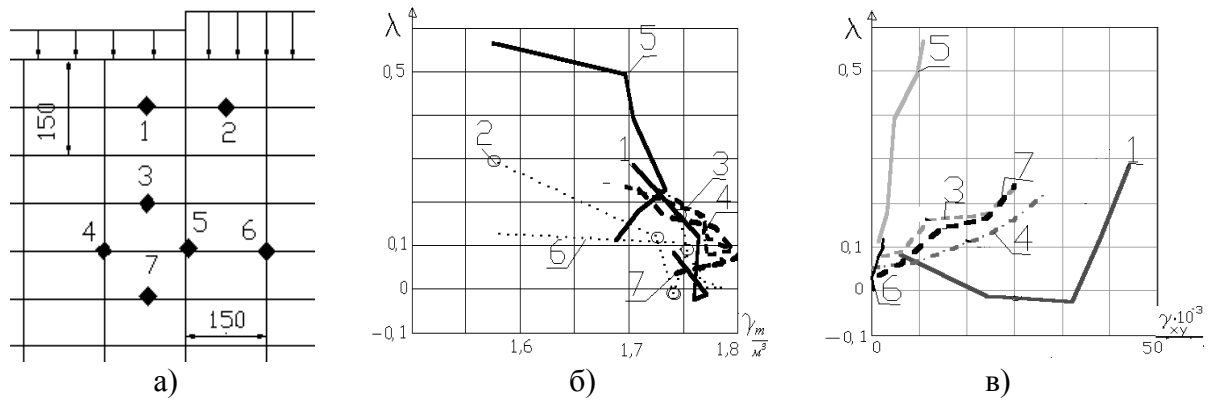


Рис. 2. Схема размещения деформометров в краевой зоне модели гибкой плиты (а), зависимость скорости дилатансии от плотности грунта в краевой зоне (б), экспериментальные зависимости коэффициента дилатансии от деформации сдвига (в)

Установлена некоторая аналогия изменений величины коэффициента дилатансии, измеренной в лотковых испытаниях, с результатами измерений других авторов в приборе трехосного сжатия.

Явление дилатансии проявляется в зонах сдвиговых деформаций основания и учитывается в современных нелинейных расчетных моделях оснований.

Литература

1. Красноруженский Л.В., Луценко А.К. Методика автоматизированного экспериментального изучения деформаций в массиве песчаного основания // Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований: Межвуз. сб. / НПИ. – Новочеркасск, 1990. – С. 111-115.
2. Мурзенко Ю.Н., Дыба В.П., Субботин А.И. Экспериментальные исследования дилатансионных процессов в грунтовом основании моделей фундаментов / Исследования и компьютерное проектирование фундаментов и оснований: Сб. науч. тр. НГТУ. – Новочеркасск, 1996. – С. 26-35.

УДК 519.688

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК РАЗДЕЛ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ ГУМАНИТАРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

В.П. Прокопьев

Уральский государственный университет им. А.М. Горького, г. Екатеринбург

Предлагается ввести в курс математики для гуманитарных специальностей раздел основ теории математического моделирования.

В настоящее время в государственных образовательных стандартах всех гуманитарных и социально-экономических специальностей присутствует математика. Вместе с тем бывает, что одних теоретических знаний далеко недостаточно для решения той или иной прикладной задачи, т.к. еще необходимы навыки в переводе исходной формулировки задачи на язык математики. Указанная операция представляет собой построение ма-

тематической модели и изучение ее поведения методами математики. Среди всех способов моделирования самым эффективным является математическое, т.к. математика позволяет описать (теоретически, но к сожалению, не всегда практически) поведение систем любой природы и сложности. Математическое моделирование – это, по определению академика А.А. Самарского, универсальная технология получения нового знания.

Успех процесса моделирования определяется, в основном, соответствием математической модели ее реальному прообразу, что в свою очередь зависит от выбора определяющих параметров. В одних задачах выбрать параметры, исчерпывающим образом характеризующие поведение системы, несложно. В других – даже неизвестно, какие параметры наиболее полно описывают систему, сколько их должно быть. Эта ситуация как раз имеет место при решении многих задач в сфере гуманитарных и социально-экономических наук. Практически, чем сложнее система, тем больше параметров необходимо для описания ее поведения, тем меньше вероятность точного решения, тем больше должны быть востребованы опыт и интуиция специалистов. Процессы, происходящие в обществе, как правило, более многогранны, требуют введения большого числа параметров и, следовательно, трудней получить их адекватное математическое описание, поэтому результаты исследований неизбежно более субъективны. Но существующая граница между естественными и гуманитарными науками подвижна и более глубокое понимание ситуации в обществе, совершенствование математического аппарата будет передвигать ее, математизируя исследования в гуманитарных и социально-экономических науках. В то же время традиционный курс математики, очевидно, не исчерпывает всего арсенала средств, необходимых для применения математических методов на практике. Поэтому желательно введение в курс математики для гуманитарных специальностей раздела, посвященного основам теории математического моделирования.

УДК 378.147:50.001.57

ОБЩЕМЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗЛОЖЕНИЮ ОСНОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ДИСЦИПЛИНЕ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

С.В. Лозовский

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Обосновывается методика, применяемая для раскрытия моделирования с общеметодологических позиций.

Новая образовательная парадигма в качестве приоритетов высшего образования включает фундаментальность и целостность. Фундаментальность образования означает его ориентацию на освоение глубинных основ

профессионального знания, а целостность – интеграцию разрозненных знаний в стройную систему путем выявления взаимосвязей между разнообразными процессами в окружающем мире. Последнее подразумевает активное использование в образовании междисциплинарных и трансдисциплинарных связей.

Одним из эффективных инструментов в достижении указанных целей является изучение фундаментального интегрирующего курса «Концепции современного естествознания» (КСЕ). Строго говоря, в подготовке специалистов социогуманитарного профиля данный курс в совокупности с курсом философии создает единственную опору фундаментальности и целостности образования. Но и в подготовке инженеров курс КСЕ, наряду с другими курсами блока ЕНД, должен играть ту же роль.

Фундаментализация и интегративность – эти функции курса КСЕ должны реализовываться посредством формирования ясных представлений об общности основополагающих концепций естествознания, в том числе всеобщей ценности выработанных в естествознании методологических концепций. И естественнонаучный контекст предоставляет множество возможностей для этого.

К числу плодотворных идей, позволяющих решать данную методическую задачу, относится мысль о необходимости формирования достаточно полных и ясных представлений об общенаучном содержании понятий «модели» и «моделирование». Указанный подход обладает очевидной новизной, поскольку изучение моделирования до сих пор связывают преимущественно с прикладным, инженерным знанием или же дисциплинами, посвященными методам математического и компьютерного моделирования.

Тема моделирования в большей или меньшей степени может быть затронута в различных дисциплинах блоков СГД, ЕНД, ОПД и СД учебного плана инженерных и социогуманитарных специальностей. В курсе КСЕ эта тема способна обрести наибольшую глубину и строгость. Курс дает возможность рассмотреть ее как с общенаучных позиций, так и в конкретном естественнонаучном контексте на примере наиболее значимых для научной картины мира моделей физики, химии, биологии и других направлений познания природы. Попытки раскрыть глубокое содержание представлений о моделировании на базе курса философии оказываются малопродуктивными, поскольку здесь это содержание поневоле сводится к формализму отвлеченных философских конструкций и никак не проецируется на широкое поле практической деятельности.

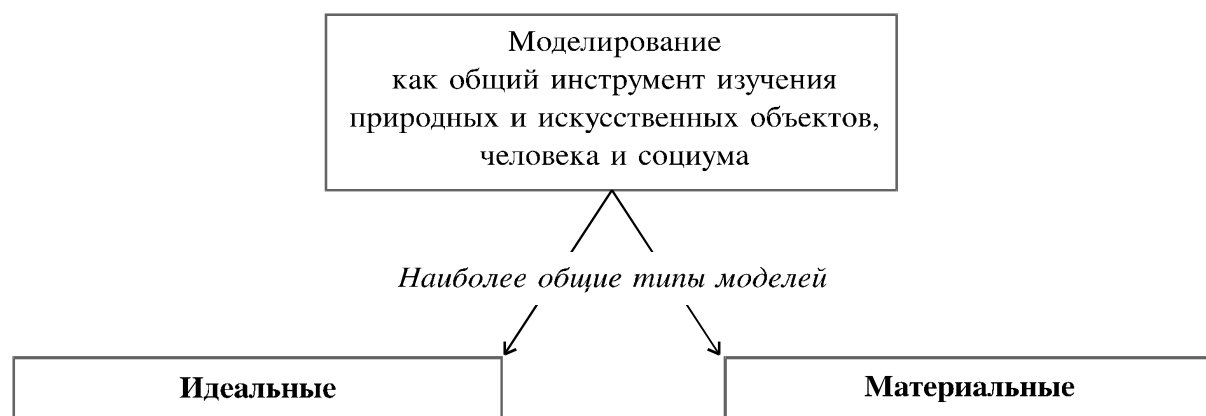
В данной статье обосновывается методика, применяемая в курсе КСЕ для раскрытия моделирования с общеметодологических позиций. В учебном пособии [1] реализованы возможности и методы трансдисциплинарной подачи конкретного материала, на базе которого раскрываются проблемы моделирования – от естествознания до культурологии и практических сфер, связанных с направлением образования студентов.

Главный путь достижения выше поставленной цели состоит в создании в рамках курса КСЕ раздела, целиком посвященного вопросам моделирования во всем многообразии его конкретных проявлений [1]. В этом разделе моделирование предстает наиболее общим инструментом любой активной деятельности человека. Одна из задач, решаемая разделом, – ***упредить формирование неверного, узкого представления о моделировании как о системе неких специальных процедур***, а это вполне может произойти в результате изучения профессиональных курсов, посвященных, например, математическому моделированию технологических процессов.

Задача данного раздела курса КСЕ заключается прежде всего в том, чтобы, отталкиваясь от примеров естественнонаучных моделей, дать простое и в то же время широкое представление о моделировании, показать многообразие его проявлений в самой различной деятельности – от научного познания реальности до художественного творчества. Важное место в этом отводится определению ключевого понятия – модели. В таком определении модель описывается как вспомогательный образ (материальный или мысленный), необходимый для изучения (в широком смысле) реального объекта, явления, процесса. Несмотря на предельно широкий характер такого определения (что и отражает интегративную направленность курса КСЕ), оно лишено недостатка, присущего философским определениям этого понятия, акцентирующим внимание на существовании аналогии между моделируемым объектом и моделью. Такого рода определения упускают из вида моделирование, не связанное с поиском простых аналогий, например, экспериментальное изучение явлений, моделирование не объектов, а состояний (в неклассической науке) и, наконец, широчайшую область моделирования – искусство.

Вообще не следует оставлять без внимания методологически неудачный подход к изложению проблемы моделирования в современных общих курсах философии для вузов. В них просматривается стремление построить разветвленную систематизацию этой категории. В этом многообразии совершенно теряется сущностное содержание любого моделирования. Можно сказать, что сам процесс построения «модели моделирования» в современных курсах философии приводит к созданию образа моделирования, далекого от реальности и только запутывающего студента.

В курсе КСЕ легко показать, что в главном систематизация моделей может быть сведена к двум типам моделей – материальным и идеальным (рис. 1). В остальном же речь идет о частностях, связанных со спецификой конкретной деятельности. Например, в рамках естествознания можно выделить экспериментальное и теоретическое моделирование, частные модели отдельной науки или же фундаментальные модели всего естествознания, классические и неклассические модели и т.д.



Наиболее общий признак типа модели

Ценность модели заключена в ее способности отображать и передавать идеи, представления, чувства

Ценность модели заключена в ее материальных качествах и возможности ими воспользоваться

Важнейшие варианты реализации моделей различных типов

1) Вербальное описание объекта моделирования
2) Символьное или графическое отображение
3) Отображение средствами художественного творчества

1) Макеты
2) Образцы
3) Натурный эксперимент

Некоторые конкретные примеры из различных областей творческой деятельности

<i>Область деятельности</i>		
1) Научная гипотеза, теория 2) Математические модели 3) Компьютерные модели	<i>Фундаментальная и прикладная наука</i>	1) Научный эксперимент 2) Технический эксперимент 3) Макет природного объекта
4) Чертеж, схема 5) Различные программы действий, бизнес-планы и т.д. 6) Следственные версии в юридической практике	<i>Техника, практические сферы</i>	4) Опытный образец 5) Производственный или экономический эксперимент 6) Следственный эксперимент в юридической практике
7) Произведение литературы, изобразительного искусства и т.д.	<i>Художественное творчество</i>	7) Произведения прикладных видов искусства, например, иконы, игрушки

Рис. 1. Общая классификация моделей и примеры моделей идеального и материального типа в различных областях деятельности

Такая простая систематизация моделей позволяет увидеть главное, присущее им всем, независимо от принадлежности к той или иной сфере деятельности – это выполнение функции упрощенного суррогата изучаемого объекта (явления) со всеми вытекающими последствиями: относительностью, неокончателностью, наличием границ применимости любых моделей, возможностью и опасностью их экстраполирования. Это относится ко всем моделям. И в связи с этим уместно привести показательный ряд моделей, разных по «масштабу» и назначению, но несущих в себе родовые черты любого моделирования. Например, возможен такой ряд: модельное представление «материальная точка»; основной закон динамики как модель; механическая теория как модель простейших процессов; ... математическая модель автоматической стыковки космических аппаратов как одна из моделей прикладной физики; ... совокупный результат развития физики как комплексная модель наиболее фундаментальных явлений природы; ... наука в целом как инструмент построения глобальной модели – научной картины мира. Очевидно, что подобных рядов можно выстроить множество. Например, модельный ряд с включением в него исторической науки, и тогда легко прийти к выводу о том, что история не воссоздает события прошлого, а всего лишь весьма приближенно моделирует их. Далее легко понять, что помимо научного моделирования используются и иные его варианты. Так, религиозные картины мира, по существу, также представляют собой системы моделей, более или менее тщательно согласованные друг с другом. Очень продуктивно и осознание феномена искусства как сферы идеального моделирования. Многие важные вещи способен прояснить для себя внимательный студент, опираясь на предельно широкое понимание сути моделирования.

Моделирование, освещаемое в курсе КСЕ с общих естественнонаучных позиций, неожиданным образом предстает как универсальный и мощный методологический инструмент, главные закономерности и приемы которого не только полезно, но и единственно правильно изучать именно на примере естествознания, области, где моделирование представлено всеми его видами и отработано до виртуозности.

Литература

1. Лозовский В.Н., Лозовский С.В. Концепции современного естествознания. – СПб.: Лань, 2004. – 240 с.

УДК 658.512

ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИК ОБРАЗОВАНИЯ

А.Н. Глаз, Г.И. Мандрусенко
ОКТБ «Орбита», г. Новочеркасск

Рассматриваются различия подходов в традиционных и современных методиках образования.

По словам Г.А. Оверстрита « ... образование претерпевает важные изменения. Из относительно одностороннего процесса наполнения факта-

ми оно все больше и больше становится процессом, пробуждающим в индивидууме более глубокие возможности ... ».

Одним из многочисленных факторов, приведших человечество к современному уровню развития, явился рост и совершенствование образовательных методов и систем. Ранее это было в руках организованных религий, а теперь это под контролем государства. В прошлом образование было подвержено влиянию теологии, а его методики формулировались церковниками и монархами. В наше время учителя готовятся государством; религиозный уклон игнорируется по причине многообразия различных религиозных органов, а направление обучения практически всецело материалистично и научно. Ранее на Востоке и на Западе образование было достоянием высших слоев общества. Сегодня образование носит массовый характер. В понимании будущего высшего образования необходимо иметь в виду эти два фактора, поскольку именно через синтез этих методик у образования есть перспектива развития. Наши современные методики образования, как и все в этот переходный период, находятся в состоянии поиска и перемен. Во всем обнаруживает себя главное чувство того, что многое сделано для поднятия уровня интеллекта; однако это соседствует с чувством неудовлетворенности результатами; это и ставит вопрос: действительно ли наши образовательные системы перспективны?

Самодовольно удовлетворяясь ростом знаний, аккумулированием информации, нашим контролем над силой природы, мы забываем, что это всего лишь заимствованные знания, являющиеся плодом нашего интеллекта. Так действует интеллект: все, что у него есть – заимствованное, он никогда не заглядывает внутрь, он всегда озирается. Только человеком западного склада ума, материалиста по своей сути, инстинктивно заботясь о комфортности своего существования, может быть поставлена задача создания искусственного интеллекта – нечто, чему можно поучиться, забывая, что у интеллекта могут быть только заимствованные у человека знания. Интеллект подражателен, механичен, он жаждет знаний, но сам не является источником знаний, – тогда зачем он (искусственный интеллект) нам? Знание никто не может дать, оно не продается. Знанием надо стать, надо врасти в это знание.

В университетах можно получить информацию – чужую, замусоленную, ведь она прошла через тысячи рук, как банкнота. Валюту поэтому и называют текущей: она течет из одних рук в другие и становится все грязнее и грязнее. Так и знания: век за веком они переходят от одного поколения к другому, от одних профессоров к другим. Наука – это информация. Если один человек сделал открытие, его можно сообщить всякому, но, пока это вы не узнали сами, это никогда не будет для вас знанием. Миллионы людей любили до меня, но чтобы полюбить, надо открыть все самому. Эйнштейн открыл теорию относительности – все, никому не нужно ее перепроверять. Открытие, на которое ученый затратил 50 лет, можно узнать за пять минут, но это не будет знанием, – это только информация. Знания заимствованы, знание – свое собственное. **Знания** – это собранная информация, **знание** – то, что вы прожили, оно пришло через ваш опыт. Когда человек получает знание, он освобождается. От знаний человек становится уз-

ником, знания связывают, а знание освобождает. Человек знаний утверждает, что знает, а человек знания даже не знает, что он знает. Есть знаменитый мистический текст. Никто не знает от кого он исходит, но исходит он из гигантского опыта. Название этого текста «Облако неведения». Текст исходит от человека знания, но назвал он его «Облако неведения». Он пишет: «Познав, я забыл все знания, все знания исчезли». Познав, нет нужды ни в каком знании. Не познав, мы цепляемся за знания, потому что только через эти знания мы можем претендовать на знание. Знания никогда не делают нашу жизнь яснее; они еще больше ослепляют, а знание – это ясность. Знания стары, а знание всегда свежо, оно возникает из данного мгновения.

Человек знания приходит к истине каждое мгновение, он не тащит за собой старое (знания), он живет в этом мгновении и готов к немедленному ответу. Знания циркулируют, они переходят из одних рук в другие и оказывают огромное влияние на людей. Запас знаний обременителен для человека. Только человек знания никогда не несет ничего лишнего. Он может положиться на свое знание. Мы зависим от наших знаний, поэтому мы всегда должны тащить чемодан с ними, иначе постоянно будем испытывать трудности в познании.

Мы учим наших детей запоминать бесконечный ряд фактов, поощряем прилежное ведение конспектов, оформление лабораторных работ, забывая, что знание в этом не нуждается, а тиражирование знаний никому пользу не приносит. Эксплуатируя инстинкт самосохранения, мы пытаемся вывести обучающихся на путь получения знаний, для выведения на путь к интеллекту. Одной из актуальных задач современного обучения является познание, через которое реализуется интуиция. Обучение, которое недооценивает интеллект, игнорирует дар интуитивного постижения истины, подтвержденной лучшими умами человечества, многое теряет. Ставя во главу угла образования процесс накопления знаний, а затем в рамках этих знаний способствовать росту интеллектуальных возможностей человека, значит сознательно подавлять волю к знанию, которое является естественным процессом развития человека [1].

Навязанный извне образовательный процесс улучшается изнутри и становится той умственной дисциплиной, которую мы характеризуем такими словами: концентрация, созерцание.

Будучи процессом тренировки памяти и развития умения пользоваться аппаратом реагирования, который ведет к контакту с внешним миром, образовательный метод становится системой контроля за рассудком и фактически приводит к внутреннему осознанию нового состояния бытия. Он вырабатывает быструю реакцию и отклик на мир, неосязаемый и невидимый, на новую серию инстинктивных осознаний, происходящих в едва различимом аппарате реагирования.

Знание – индивидуально, только знания могут коллективными, поэтому основным акцентом в современных методиках образования должна быть индивидуальность в постановке задач обучающимся. Индивидуальные задания в своем понимании должны быть для одного. Знание легче получить одному. Рождаясь, ребенок настолько индивидуален, что способен к творческому осознанию действительности, быстрому получению знания.

Не случайно дети просят перечитывать одну и ту же сказку несколько раз, они переживают ее каждый раз по-новому, открывая для себя что-то новое, они получают знания, делая свой опыт, пропуская через себя. Одним интересно несколько раз перечитывать одно и то же, находя в этом что-то новое; другим – не интересно, так как ничего нового для себя они не находят. Поэтому бессмысленно несколько раз повторять или пересказывать один и тот же закон или истину человеку, который это не знает. Мы стараемся, как можно раньше, поставить его в рамки условностей человеческого бытия, ограничивая изначально его процесс познания. Из личинки мы делаем личность, не замечая, как одеваем на него маску, делая из него некое подобие, с верой в то, это ему необходимо для адаптации в обществе.

Условности в отношении времени и пространства мешают в познании. Когда человек один (не одинок), ему не нужны эти условности для познания, они ему мешают. Мы условно измеряем время, дав названия определенным циклам (весна, лето, осень, зима; понедельник, вторник и т.д.), только для того, чтобы координировать свои действия с другими. Только обязанность что-то делать заставляет принять нас эти условности. Для одних нет разности между понедельником и вторником, так как знают, что им предстоит делать одно и то же (например токарь); для пенсионеров вообще нет никакой разницы (у них нет определенных обязательств перед другими); преподавателям же необходимо знать не только день недели, но и номер недели (первая или вторая).

Нам необходимо это знать, чтобы скоординировать свои действия с другими по времени, чтобы спланировать свои действия. Одному это не надо, оно ему мешает, в этот миг он один, он ничего не делает, он познает.

Абсурдность принятия этих условностей не позволяет нам ответить хотя бы на такой вопрос: где мы были между понедельником и вторником? и что мы делали в том промежутке времени? Почему физиков смущает поведение электрона? Он исчезает из точки А и появляется в точке Б, при этом мы не можем фиксировать его перемещение, это также невозможно, как зафиксировать наше перемещение из понедельника во вторник, не говоря уже об обратном перемещении.

Эти условности мешают нам даже предположить, что электрон, на самом деле, не исчезал из точки А, он там и находился, просто точка А приобрела все свойства точки Б. Сей час можно назвать как угодно, от этого ничего не изменится, что было до этого, уже не важно, оно в прошлом, оно не вернется, но это относится для познающего, когда он один. И ближе всех к этому состоянию находится ребенок, ему не нужны условности времени и пространства. Он есть здесь и сей час и понимает все так, как воспринимает в данный миг; следующий миг познается уже по-другому.

Мы учим ребенка фокусировать свой ум – концентрироваться, потому что без концентрации он не может справиться с жизнью. Жизнь требует этого, ум должен быть способен к концентрации. Но как только ум стал способен концентрироваться, он стал менее сознательным, менее способным к созерцанию. Созерцание – это сознание всего, что происходит. Концентрация – это выбор. Она исключает все, кроме объекта концентрации, это сужение сознания.

Дети сами по себе никогда не фокусируются. Их сознание открыто со всех сторон, в него входит все, и ничего не исключается. Ребенок открыт каждому чувству, каждое ощущение входит в его сознание. А входит так много! Вот почему он так переменчив и не постоянен. Необусловленный ум ребенка – это непрерывный поток, поток ощущений, но он не смог бы выжить с таким умом. Он должен научиться сужать свой ум, концентрироваться. Как только мы сужаем свой ум, мы начинаем отчетливо сознавать что-то одно и одновременно перестаем сознавать так много остального.

Чем больше сужен ум, тем более успешен он в жизни. Вы станете специалистом, станете знатоком, но все это – знание все большего о все меньшем.

Мы живем на периферии, истина всегда в центре. Ваш ум – это тюрьма, это рабство. Нужно существовать с другим и с самим собой.

Любая односторонняя жизнь искалечена. Мы должны существовать среди других с обусловленным умом, но с собой мы должны быть совершенно необусловленными.

Общество порождает сужение сознания, но сознание само по себе есть распространение. Оно беспредельно. Нужно и то, и другое, и обе нужды должны быть удовлетворены. Мудрым называют тех, кто способен выполнить оба этих требования. Любая крайность вредна. По этому одной из целей современных методик образования научить обучающего жить в мире с умом, с внешними условностями, но без натаскивания; пользоваться умом, как средством, не делая его целью.

Сужение ума – это жизненная необходимость. Никто не несет за это ответственности. Это нужно потому, что жизнь такова, какова она есть. Но этого недостаточно. Мы не пользуемся целостным умом. Мы пользуемся только очень малой его частью, а оставшаяся большая часть остается бессознательной. Это не два разных ума. **Сознательный ум** – это та часть ума, которая использовалась в процессе сужения, концентрации. **Бессознательный ум** – это та его часть, которой пренебрегли, которую игнорировали, которая стала закрытой. Большая часть ума становится чуждой. Отчуждаясь от самого себя, мы становимся чуждым своей собственной целостности. Малую часть мы признали самим собой, а все остальное утеряно. Но оставшаяся несознательная часть всегда присутствует как неиспользованные возможности, как неизрасходованный потенциал. Этот бессознательный ум (неиспользованный потенциал) всегда будет бороться с сознательным умом. Но только когда бессознательному будет позволено расцвести, мы получим знание. Если большая часть наших возможностей останется нереализованной, жизнь будет разочарованием. Вот почему чем более утилитарен человек, тем меньше он проявился, тем больше его разочарование. Отвергнутая часть, бессознательная часть, может стать активной и творческой, только если мы придадим нашей жизни новое измерение. Чем больше возможностей для создания условий для этого, тем эффективней методика образования, а значит и перспективней.

Литература

1. Алиса А. Бейли. От интеллекта к интуиции / Пер. с англ. – Новочеркасск: Агентство «Сагуна», 1994.

2. Алиса А. Бейли. Тракта́т о Белой Магии или Пу́ть Ученика / Пер. с англ. – Новочеркасск: Агентство «Сагуна», 1992.
3. Бхагаван Шри Раджнesh. Избранные беседы. Т. 1. Истинный мудрец / Пер. с англ. – Новочеркасск: Агентство «Сагуна», 1994.
4. Ральф Р. Гринсон Практика и техника психоанализа. – Новочеркасск: Агентство «Сагуна», 1994.

346428, Новочеркасск, ул. Михайловская, 164-а, e-mail: oktb@novoch.ru

УДК [681.3] : [378.4]

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДЫ TOOLBOOK II INSTRUCTOR ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕРНЕТ-УЧЕБНИКОВ

З.Р. Мезина, Д.А. Темников
Казанский государственный университет

Выработан подход к созданию интернет-курсов с помощью пакета Asymetrix ToolBook II Instructor.

Инструментальная среда для разработки мультимедийных обучающих курсов ToolBook II Instructor (version 6.5) предназначена для создания обучающих программ как на CD, так и сетевых версий. К несомненным плюсам этой среды относятся простота и наглядность при компоновке курса, открытость среды для создания новых объектов, возможность организовать множество разновидностей заданий в контролирующем блоке, защита обучающего курса от несанкционированного доступа к данным. Однако при создании сетевых курсов выявились и некоторые недостатки этой инструментальной среды. В частности, отсутствие локализованной русскоязычной версии модуля экспорта обучающего курса в Web. При конвертации текстов на русском языке возникали большие сложности. Это привело к тому, что от прямого экспорта CD-версий курсов в Web пришлось отказаться. Немаловажным фактором явилось и то, что получаемые страницы учебного курса при конвертации имели слишком большой объем, что значительно увеличивало время их загрузки по сети.

Таким образом, оптимальным представляется информационную часть курса компоновать в любом HTML-редакторе, а контролирующий блок проще и эффективнее создавать в среде ToolBook II Instructor. Контролирующий блок не конвертируется в Web-страницу, а размещается в запакованном виде на образовательном сервере университета, откуда его можно загрузить на персональный компьютер. Дополнительно требуется однократно загрузить плеер для проигрывания файлов ToolBook II Instructor. Доступа к правильным ответам пользователь иметь не будет, так как контрольный блок можно защитить паролем. Результаты выполнения контрольного теста могут быть либо сохранены на сервере, либо отосланы преподавателю по электронной почте.

Такая форма организации учебных интернет-курсов представляется нам наиболее перспективной, поскольку при этом возможна быстрая корректировка, расширение и наращивание материала курса, замена одного

контролирующего блока другим и т.д. Таким образом, в подобный интернет-курс закладываются принципы открытой и саморазвивающейся системы, подобной всей системе ресурсов WWW.

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, т. (8432) 31-52-52, e-mail: expert@kzn.ru

УДК 681.3.06:371+681.3.062

ВИРТУАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

В.М. Дмитриев, А.Ю. Филиппов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Рассматриваются структура и применение виртуальной геометрической лаборатории, которая предназначена для обучения школьников физико-геометрическим задачам. В основе лаборатории лежит язык моделирования и решения задач (ЯМЗ), который обеспечивает взаимодействие между геометрическим и физическим редакторами системы моделирования. На основе такой системы и производится реализация виртуальной геометрической лаборатории для обучения детей средней школы предмету физики.

Для моделирования и решения физических задач используется язык моделирования задач (ЯМЗ) [1]. Данный язык позволяет с помощью топологического слоя создать расчетную схему и с помощью универсального ядра среды моделирования MAPS [2] найти численный результат задачи. Так как диапазон решаемых задач по физике гораздо шире, например, связанных с решением геометрических (графических) задач по кинематике (движение тела, саней, автомобиля, графики движения тел), динамике (закон Гука, работа с блоками), электростатике, оптике и т.п., то было принято решение разработать виртуальную геометрическую лабораторию, которая позволяет:

- Преобразовать графические исходные данные в рабочую схему графического редактора (ГР), занести начальные данные.
- Моделировать чертеж, схему задачи. Правильно расставлять силы и моменты для объектов задачи.
- Получить численные результаты по введенным рабочим схемам.
- Визуализировать сценарии взаимодействия объектов в геометрическом редакторе.

Таким образом, геометрический редактор помогает построить схемы, ввести начальные данные, визуализировать процесс тех физических задач, в которых используются дополнительные геометрические построения. Геометрическая панель использует единое пространство, в котором используются геометрические (точка, отрезок, прямая, ...) и физические (брусok, сани, автомобиль, мотоцикл и т.п.) примитивы, позволяющие строить рабочие схемы физико-геометрических задач (рис. 1).

Для работы в лаборатории выполняются следующие пункты:

1. Задается размерность координатного пространства.
2. При использовании геометрического редактора задействованы два функциональных слоя – графический (ГС) и топологический слой (ТС). Первый слой предназначен для отображения примитивов – визуаль-

ной части среды. В ГР из примитивов (точка, отрезок, брусок,...) строится чертеж, характеризующий задачу, выявляются и устанавливаются параметры задачи. Определяются связи и отношения между объектами. Вычислительная схема строится на топологическом слое, синхронно отображая графический слой с помощью топологических образов в ТС.

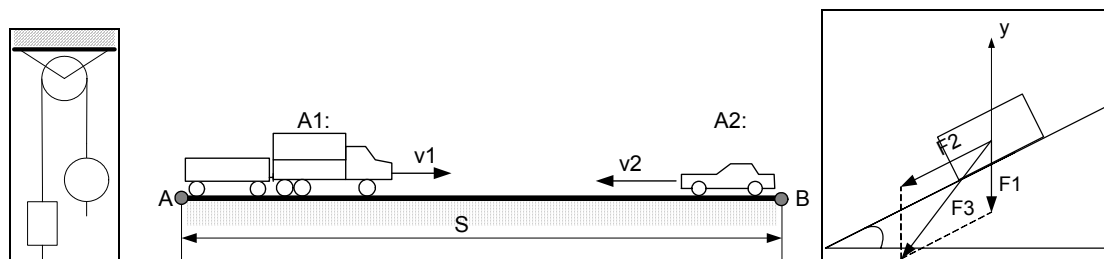


Рис. 1. Рабочие схемы физико-геометрических задач

3. В ГР выделяются объекты, непосредственно участвующие в задаче, создаются или выбираются геометрические фигуры, методы, связи и рассматриваются соотношения между ними.

4. В случае вызова Геометрического Редактора Топологическим Редактором физики данные передаются в последний (рис. 2).

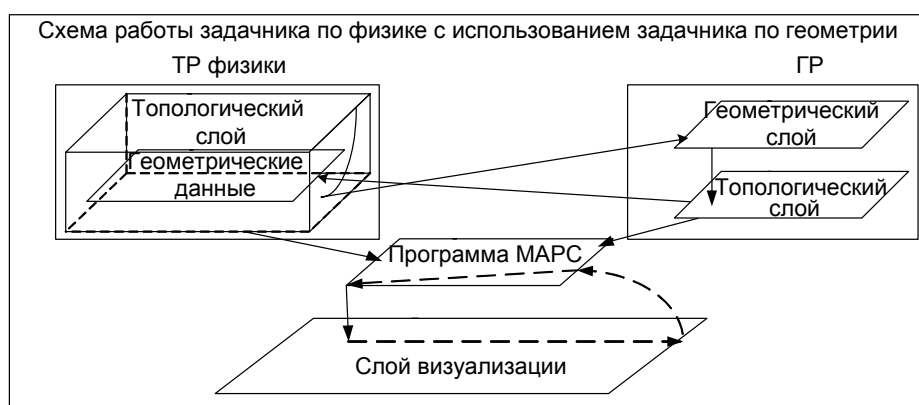


Рис. 2. Взаимодействие редакторов и их слоев

5. По выбранным соотношениям, параметрам и в соответствии с математическим наполнением каждого объекта данные преобразуются в компонентную цепь и передаются в СМ MAPC для просчета.

6. По результатам вычислений итерационного характера можно отобразить динамику процесса в слое визуализации.

Литература

1. Формализованное описание различного типа задач для автоматизированного моделирования / В.М. Дмитриев, В.М. Зеличенко, А.Ю. Филиппов, О.Н. Шарова // Вестник ТГПУ. – Томск: Томский гос. пед. ун-т. – № 2. – 2002. – С. 73.
2. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – № 2. – 2004. – С. 24-29.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Токарева С.В., Шерстобитов А.И. Способ уменьшения погрешности при использовании метода размножения оценок	4
Мальков С.Б., Макаров С.С., Финаев В.И. Моделирование коллизий в информационно-вычислительных системах	5
Брумштейн Ю.М. Программно-технические средства защиты компьютерных моделей от неправомерного использования	7
Сердюк В.А. Математическая модель поведенческого метода обнаружения атак, базирующаяся на конечных автоматных распознавателях	8
Ощепков А.Ю., Кирюшов В.В. Численный эксперимент по исследованию робастных свойств адаптивного цифрового регулятора температуры	13
Ощепков А.Ю., Исаков К.А. Адаптивный регулятор для систем второго порядка. Компьютерное моделирование в среде MatLab	17
Васильев М.Г. Обработка данных эксперимента в задаче диагностики с помощью вейвлет-анализа и нейросетей	21
Кужеков С.Л., Влашицкий А.В., Кривенко А.И. Моделирование импульсных коммутационных перенапряжений, создаваемых предохранителями	23
Бессага Е.В., Дебда Д.Е. Физическое моделирование на земле движения в условиях невесомости крупногабаритной космической техники	26
Русаков В.З., Додонов Б.М., Кучеренко А.В. Имитационная модель торможения автомобиля	28
Шаповалов В.В., Ялышев Р.Г., Езупова М.Н. Применение методов физико-математического моделирования для ускоренных испытаний фрикционных систем	39
Филькина А.Н. Энергетический подход к проблеме обоснования основных составляющих гибридной энергосиловой установки автомобиля	41
Мурзенко Ю.Н., Евтушенко С.И., Анищенко Е.Ю. Результаты экспериментальных исследований совместной работы моделей железобетонных фундаментов под колонны зданий на песчаном основании	43
Мурзенко Ю.Н., Луценко А.К., Кольцова С.А. Моделирование дилатансионных явлений в лотковых испытаниях	49
Прокопьев В.П. Математическое моделирование как раздел математики для гуманитарных специальностей	51
Лозовский С.В. Общеметодологический подход к изложению основ моделирования в дисциплине «Концепции современного естествознания»	52
Глаз А.Н., Мандрусенко Г.И. Вопросы современных методик образования	56
Мезина З.Р., Темников Д.А. Опыт использования среды ToolBook II Instructor для разработки интернет-учебников	61
Дмитриев В.М., Филиппов А.Ю. Виртуальная геометрическая лаборатория	62

Научное издание

Моделирование. Теория, методы и средства

Материалы IV Международной научно-практической конференции
Часть 4

Редактор: Е.В. Кулыгина
Компьютерная верстка: М.К. Аверьянова

Подписано в печать 25.05.04 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Печ. л. 3,93. Уч.-изд. л. 4,35. Тираж 100 экз. Заказ 47-1737.

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)
Адрес университета и центра оперативной полиграфии:
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. 55-222