

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НОВОЧЕРКАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

*Материалы
XIII Международной научно-практической
конференции*

*27 февраля 2013 года
г. Новочеркасск*

Новочеркасск
ЮРГТУ(НПИ)
2013

УДК 519.688
ББК 22.18 в6
М 74

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт);
Технический университет Ильменау (ФРГ).

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;
А.В. Павленко (РФ), профессор;
В.А. Плаксин (РФ), доцент.

М 74 Моделирование. Теория, методы и средства: материалы XIII
Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 27 февраля 2013 г. /
Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ),
2013. – 119 с.

ISBN 978-5-9997-0331-6

Рассматриваются общие вопросы моделирования процессов, устройств
и явлений; математические модели сложных систем в информационных тех-
нологиях, электроэнергетике, химической промышленности, на транспорте;
использование основ моделирования в учебном процессе.

УДК 519.688
ББК 22.18 в6

ISBN 978-5-9997-0331-6

© Южно-Российский государственный
технический университет (НПИ), 2013

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 феврале 2013 года на базе ЮРГТУ (НПИ) проходила XIII Международная научно-практическая конференция «Моделирование. Теория, методы и средства». В работе конференции приняли участие ученые и специалисты – представители высших учебных заведений Москвы, Уфы, Омска, Оренбурга, Невинномысска, Таганрога, Новочеркасска. В сборнике опубликовано 30 докладов, освещающие вопросы применения методов моделирования в различных областях науки и техники.

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

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «РЫСЬ»

В.М. Абашев, А.И. Ляшенко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Предложен метод выбора оптимальной схемы конструкции ракетного двигателя твердого топлива и ее основных параметров. При анализе результатов используется продукционно-фреймовая экспертная система «РЫСЬ», объединяющая формализуемые и неформализуемые данные.

Одним из направлений повышения эффективности конструкций ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) является создание и применение комплексной математической модели, которая наряду с математическими моделями учитывает неформализуемые знания. К неформализуемой информации относятся: статистические данные, конструкторские и технологические требования, опыт конструирования и эксплуатации двигателей и т.д. Особенно эффективно использование неформализуемых данных на ранних стадиях проектирования, когда формируется конструктивно-компоновочная схема. На этом этапе проектирования доля неопределенной информации больше, чем на последующих этапах [1]. Ошибка или недальновидность конструктора на начальной стадии проектирования приводит к увеличению времени и стоимости создания двигателя, к выбору неоптимальной конструкции двигателя и его элементов.

Существуют разные способы представления неформализуемой информации. Одним из наиболее эффективных способов является построение экспертных систем и фреймовых структур [2], [3].

Экспертная система «РЫСЬ» [1], [4], [5] предназначена для концептуального проектирования ракетных двигателей твердого топлива на персональных компьютерах. Она содержит методики расчета элементов двигателя, статистический материал по существующим РДТТ, данные из литературных источников и опыт конструкторов по проектированию, доводке и эксплуатации изделий.

Продукционная экспертная система состоит из множества продукционных правил $R_i : \alpha \rightarrow \beta$ (если α , то β) и множества фактов, накапливающихся по мере функционирования базы знаний в экспертной системе. Продукционные правила обычно записываются в виде: «ЕСЛИ $\rightarrow$ ТО».

Это наиболее простое представление знаний. База знаний состоит из конечного набора правил $B = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ и конечного набора фактов $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ таких, что условие применимости любого из правил R_i состоит в одновременном наличии фактов $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}$. Любая продукция R_i из множества B имеет вид: $R_i : a_{i1} \wedge a_{i2} \wedge \dots \wedge a_{is} \rightarrow a_m$, где $\wedge$ – знак конъюнкции (логическое «И»); a_m – новый факт, выведенный из фактов-условий $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}$. Если экспертная система не может сама принять решение или работает в режиме накопления знаний, то предусмотрена возможность посылки пользователю вопросов q_j в виде: $q_j = \{a_{j1} \vee a_{j2} \vee \dots \vee a_{jk}\}$, где $\vee$ – знак исключающего «ИЛИ». Таким образом, продукционную экспертную систему можно представить в виде совокупности множеств: $\langle A, B, Q \rangle$, где $Q = \{q_j\}$ – множество запросов к пользователю.

Выполним расчеты с целью поиска оптимальной схемы РДТТ для космического аппарата. Исходными данными являются: суммарный импульс тяги $I_\Sigma = 20,0 \text{ кН} \cdot \text{с}$, средняя тяга двигателя $P = 2,8 \text{ кН}$, время работы двигателя $\tau = 7 \text{ с}$, скорость горения топлива $u_T = 0,011 \text{ м/с}$ и давление окружающей среды $p_h = 0,02 \text{ МПа}$.

Расчеты показали, что имеется 38 вариантов схем РДТТ, удовлетворяющих исходным данным. Для выбора оптимальной схемы проведем исследования влияния основных переменных проектирования на минимальную стартовую массу $m_{0\min}$ двигателя. Особенности анализа является то, что каждому из этих параметров соответствует группа двигателей, отличающихся видом заряда твердого топлива. Каждая из групп обеспечивает достижение исходных данных. Из этих групп следует выбрать оптимальную.

Рассмотрим влияние изменения наружного диаметра D двигателя на его минимальную стартовую массу $m_{0\min}$. С уменьшением величины диаметра двигателя, снижается его стартовая масса. Каждая из возможных групп двигателей имеет разные диапазоны изменения параметра D . Минимальное значение массы находится при $p_\kappa / p_h = 500$.

Наружный диаметр D оказывает влияние на минимальный габаритный объем $V_{0\min}$ двигателя. Как и следовало ожидать, с уменьшением величины диаметра корпуса двигателя его объем падает. Во время

диалога с экспертной системой «РЫСЬ» выяснено, что следует выбрать утопленное сопло Лавалья.

Проведено исследование наружного диаметра D на параметр S минимального увеличения стартовой массы. Характеристика S введена с целью сравнения стартовых масс РДТТ, имеющих баллиститное или смесевое топлива. Параметр находится следующим образом. Для фиксированных значений исходных данных определяются две группы возможных РДТТ в зависимости от типа топлива. Из каждой группы выбирается по одному двигателю, имеющему наименьшую массу. Затем находится параметр S , определяющий в процентах величину превышения минимальной массы РДТТ с вкладным зарядом по сравнению с выбранным двигателем со скрепленным зарядом.

Анализ зависимостей показывает, что двигатель с вкладным зарядом тяжелее на (13...22) % по сравнению с РДТТ, имеющим скрепленный заряд. При этом, чем больше величина диаметра корпуса РДТТ, тем различие по стартовой массе становится меньше.

Рассмотрено влияние изменения относительного давления p_k / p_h в камере на величину наименьшей стартовой массы двигателя m_{0min} . Выяснено, что величине наименьшей стартовой массы соответствует группа возможных РДТТ при $p_k = 10,0 \text{ МПа}$, $D = 0,4 \text{ м}$, $\sigma_b = 1750 \text{ МПа}$ и других вспомогательных данных. Возможны четыре варианта двигателей, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Группа возможных тормозных двигателей

Номер РДТТ	Тип топлива	Тип заряда	Стартовая масса, кг
1	Смесевое	С горением по цилиндрическому каналу	8.88
2	Баллиститное	Трубчатый	10.75
3	Баллиститное	С горением по цилиндрическому каналу	10.90
4	Баллиститное	Телескопический	10.81

Из таблицы видно, что наименьшую стартовую массу имеет двигатель № 1.

Выполнен анализ функции влияния изменения относительного давления в камере на величину минимального габаритного объема двигателя.

При $p_k / p_a > 480$ параметр $V_{0\min}$ практически не изменяется. Таким образом, относительное давление в камере равно 500, которому соответствует минимальное значение наименьшей стартовой массы двигателя, находится в области минимальных величин наименьшего объема двигателя.

Из анализа функции $m_{0\min} = f(\sigma_{уд} = \sigma_v / \rho)$ определено, что целесообразно выбрать высокопрочную сталь 03X11H10M2T-ВД(ВНС-17) в качестве материала корпуса РДТТ (ρ, σ_v – плотность и предел прочности конструкционного материала).

С целью подтверждения правильности полученных результатов, проводились численные исследования и сравнение с натурными РДТТ. Получена удовлетворительная сходимость результатов.

Заключение

1. Экспертная система «РЫСЬ» является эффективным средством выбора схем конструкций РДТТ и их габаритно-массовых параметров на ранней стадии проектирования.

2. Предложен метод выбора оптимальной схемы конструкции РДТТ на ранней стадии проектирования, использующий экспертную систему «РЫСЬ».

Литература

1. Абашев В.М. Концептуальное проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Изд-во МАИ, 2000. 104 с.
2. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988. 280 с.
3. Елисеев Ю.С. Интегрированные информационные технологии на принципах CALS при проектировании, производстве, эксплуатации (жизненный цикл) газотурбинных двигателей // CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиационной промышленности; под ред. А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – С. 36-123.
4. Абашев В.М. Применение экспертной системы РЫСЬ при концептуальном проектировании РДТТ // Известия вузов. Авиационная техника. 1995. № 2. С. 107.
5. Абашев В.М. Принципы построения моделей интерактивного проектирования ракетных двигателей твердого топлива // Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения: материалы Междунар. конф / Центральный научно-исследовательский институт машиностроения. Калининград, 1996. С. 76-77.

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, т. 8-499-158-4441,
e-mail: ipk_avm@mai.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Т.С. Аббасова

Финансово-Технологическая Академия, г. Королев

Представлены методические основы при математическом моделировании функционирования гелиоустановок с концентраторами и без концентраторов. Обоснованы экономически оптимальные режимы функционирования с учетом экологических и социальных аспектов.

В настоящее время наряду с широко распространенными плоскими солнечными панелями перспективно использовать гелиоустановки (ГУ) с концентратором. Концентратор – это оптическая система, которая изменяет ход солнечных лучей таким образом, чтобы они попали на приемник излучения. Применение концентратора и поворачивающих в соответствии с положением Солнца ГУ устройств на основе электропривода позволяет улавливать на 40 % больше солнечной энергии и унифицировать параметры гелиоустановок для возможности их работы независимо от географической широты, долготы и расчета большого числа метеорологических данных. Наведение концентратора на Солнце может осуществляться с помощью программируемого процессора; с помощью следящих датчиков. Процессор рассчитывает направление на Солнце, используя астрономическое время, широту, а также другие метеорологические параметры местности, в которой находится ГУ. Любое изменение места положения ГУ требует перепрограммирования процессора. Такие системы не получили широкого распространения и были заменены системами, наводящими ГУ на Солнце с помощью датчиков слежения.

Общий недостаток ГУ с концентраторами и датчиками слежения: сложность конструкции; низкая эффективность управления мощностью накопителя энергии (НЭ).

В качестве НЭ вместо аккумуляторных батарей для повышения эффективности управления мощностью НЭ и минимизации экологических последствий технологий накопления энергии предложено использовать конденсаторы большой емкости (суперконденсаторы).

При математическом моделировании работы ГУ с концентратором и суперконденсатором в качестве НЭ целевой функцией оптимизации является максимизация энергетической эффективности:

$$f(E, \Delta W_{\phi}, \Delta W_{\text{ЭП}}, W_{\text{НЭ}})^{\text{opt}} = \max \left[\frac{E}{\alpha} + \frac{W_{\text{НЭ}}}{W_{\text{НЭ}} + W_{\text{п.ЗК}}} + \frac{\Delta W_{\text{ЭП}}}{\Delta W_{\phi}} \right], \quad (1)$$

где E – освещенность солнечного элемента, [А]; α – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа ФЭП; $W_{\text{НЭ}}$ – запасенная в НЭ энергия; $W_{\text{п.ЗК}}$ – энергия потерь зарядного контура; $\Delta W_{\text{ЭП}}$ – энергия, сэкономленная в электроприводе гелиоустановки в результате пошагового слежения за Солнцем; ΔW_{ϕ} – энергия, теряемая в ФЭП за весь сеанс слежения.

Последнее слагаемое в формуле (1) для гелиоустановки без концентратора отсутствует. Накладываются ограничения, связанные с выбором оптимального шага слежения за Солнцем с помощью следящего электропривода $\Delta W_{\text{ЭП}} - \Delta W_{\phi} > 0$ в ограниченных пределах $\theta_{\text{ш}}$, где $\theta_{\text{ш}}$ – шаг слежения. Для обеспечения работы ГУ с постоянной среднеэксплуатационной мощностью напряжение на нагрузке, питаемой гелиоустановкой с помощью НЭ, должно поддерживаться постоянным $U_{\text{Н}} = \text{const}$.

Определены зависимости влияния качества электроэнергии на экологические показатели. Изменения напряжений на зажимах электроприемников промышленных объектов малой энергетики и изменения частоты уменьшают годовое количество электричества, выработанное гелиоустановкой, и увеличивают срок окупаемости гелиоустановки, [лет]

$$T_{\text{ок}} = \frac{S_{\text{ГУ}}}{E_{\text{ГУ}} S_{\text{Т}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ГУ}}$ – стоимость ГУ, [руб.]; $E_{\text{ГУ}}$ – годовое количество электричества, выработанное ГУ, [кВт·ч/лет]; $S_{\text{Т}}$ – стоимость энергии от традиционной энергоустановки, [руб./кВт·ч].

Отсюда также следует, что уменьшается время эксплуатации питаемого электрооборудования технических объектов (время до ликвидации устаревшего оборудования).

Построена компьютерная Matlab-модель системы бесперебойного электроснабжения локального объекта, включающая в себя гелиоустановку, повышающий широтно-импульсный преобразователь напряжения и активную нагрузку [1]. Установлено, что световую энергию, вырабатываемую с помощью ГУ, можно увеличить за счет подбора числа параллельно и последовательно включенных солнечных модулей.

Результаты моделирования в среде MatLab Simulink: экспериментальная проверка на Matlab-модели расчетных соотношений, определяющих параметры разработанной системы, подтвердила их справедливость. В указанном диапазоне изменения освещенности выходное на-

пряжение поддерживается постоянным $U_H = \text{const}$. Чем выше КПД ге-
лиоустановки, тем лучше ее экологические показатели – уменьшается
занимаемая площадь, увеличивается срок эксплуатации и время до
ликвидации устаревшего оборудования.

Литература

1. Аббасова Т.С. Повышение качества регулирования мощности в системе электро-
снабжения с солнечной батареей // Электротехнические и информационные ком-
плексы и системы. 2010. №2, т.6. С. 3-10.

УДК 519.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКРЫВАЮЩЕГО ДЕРЕВА, МИНИМИЗИРУЮЩЕГО СТОИМОСТЬ ТРАФИКА В СЕТИ

А.А. Анищенко

Российский университет дружбы народов, г. Москва

Разработан алгоритм вычисления покрывающего дерева для графа сети,
минимизирующего расходы на прохождение трафика по сети. Алгоритм учитывает
интенсивность обмена трафиком между узлами сети и стоимость прохождения этого
трафика по каналам. Вычисляется нагрузка на узлы и каналы сети.

Задача о нахождении минимального остовного (покрывающего) де-
рева для взвешенного связанного неориентированного графа возникала
давно и встречается довольно часто в различных областях. Существует
немало алгоритмов реализующих поиск минимального по весу покры-
вающего дерева для графа. Самыми известными из них являются алго-
ритмы Краскала, Прима, Борувки [3]. Однако в применении к сетям та-
кие алгоритмы не всегда подходят, поскольку они не учитывают нагруз-
ки на узлы и каналы сети.

Представленный алгоритм учитывает интенсивность обмена трафи-
ком между узлами сети и стоимость прохождения этого трафика по сети
и позволяет смоделировать такое покрывающее дерево, которое мини-
мизировало бы затраты на проходящий по сети трафик.

Далее используется терминология Харари [5].

Сеть представлена в виде связанного неориентированного графа без
петель $G = \langle V, E \rangle$ с множеством вершин $V = \overline{1;n}$, ($|V(G)| = n$) и множе-
ством ребер E .

Структура графа представлена матрицей смежности $MS = \{ms_{ij}\}$,

где $ms_{ij} = ms(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если вершины } i \text{ и } j \text{ смежны} \\ 0, & \text{если вершины } i \text{ и } j \text{ не смежны} \end{cases}, i, j = \overline{1;n}.$

Для удобства дальнейшего обозначения вводится равносильное обозначение $ms(i, j) = ms_{ij}$.

Интенсивность передачи данных между узлами задана матрицей Λ : $\Lambda = \{\lambda_{ij}\} = \{\lambda(i, j)\}$, $i, j = \overline{1; n}$, $i, j \in V(G)$, где λ_{ij} есть количество информации, переданное за единицу времени из вершины i в вершину j .

Заданы стоимости прохождения единицы трафика по каждому из ребер графа.

При обеспечении связи между парой вершин более чем одним провайдером (кратные ребра на графе) рассматривается только ребро с минимальной стоимостью. Данный выбор оправдан, что доказано в [2].

Поскольку граф G неориентированный, ребра $\langle i, j \rangle$ и $\langle j, i \rangle$ представляют собой одно и то же ребро и являются равноценными, то есть стоимость за единицу трафика, прошедшего по ним, одинакова.

Стоимость прохождения единицы трафика по каждому из ребер задается матрицей стоимостей или матрицей весов $WR = \{wr_{ij}\} = \{wr(i, j)\}$. Так как граф $G = \langle V, E \rangle$ неориентированный, матрица WR симметрична относительно главной диагонали.

Для минимизации затрат на проходящий по сети трафик строится произвольное покрывающее дерево $T = \langle V, TE \rangle$ с матрицей смежности $S = \{s_{ij}\} = \{s(i, j)\}$, $i, j = \overline{1; n}$ и прежней матрицей интенсивностей передачи данных Λ . Матрица весов полученного дерева вычисляется $WRT = \{wrt_{ij}\} = \{wrt(i, j)\}$: $wrt_{ij} = wr_{ij} \cdot s_{ij}$.

Для полученного покрывающего дерева T вычисляются нагрузки на вершины и ребра. Вычисление нагрузок происходит «снизу», то есть на каждом этапе вычисляется нагрузка на концевые вершины дерева (вершины, смежные только с одной вершиной дерева). После каждого этапа концевые вершины «удаляются» и образуются новые. Так происходит до тех пор, пока не останется последняя вершина или последняя пара вершин. Для каждого этапа: если концевая вершина имеет номер i , то смежная с ней обозначается как $f(i)$. Тогда вектор $F = \{f_i\} = \{f(i)\}$ является на каждом этапе вектором вершин, смежных с концевыми. (После каждого этапа вектор обнуляется).

Транзитная нагрузка $w(v)$ на некоторую вершину дерева $v \in V$ – нагрузка данными, проходящими через узел, но не выходящими из него и не входящими в него.

$$w(i) = \sum_{\substack{i \in V: \\ f(i)=v; \\ s(i, f(i))=1; \\ \forall j \neq f(i) s(i, j)=0}} \left(\begin{aligned} &\lambda(i) + w(i) - dw(i) - \lambda(i, f(i)) - \lambda(f(i), i) - \\ &- \sum_{z < k(i)} (\lambda(i, sv(i, z)) + \lambda(sv(i, z), i)) - \\ &- \sum_{z < k(i)} (\lambda(f(i), sv(i, z)) + \lambda(sv(i, z), f(i))) \end{aligned} \right). \quad (1)$$

Здесь

$$\lambda(i) = \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} + \lambda_{ji}) = \sum_{j=1}^n (\lambda(i, j) + \lambda(j, i));$$

$dw(i)$ – «дуговая» нагрузка на i -ю вершину. Для вершины с номером $f(i)$, смежной с концевой вершиной i

$$dw(f(i)) = \sum_{i \in V} \sum_{h < k(f(i))} \left(\begin{aligned} &\sum_{z < k(i)} (\lambda(sv(f(i), h), sv(i, z)) + \\ &+ \lambda(sv(i, z), sv(f(i), h))) + \\ &+ \lambda(sv(f(i), h), i) + \lambda(i, sv(f(i), h)) \end{aligned} \right);$$

$SV = \{sv_{ij}\} = \{sv(i, j)\}$, $i, j = \overline{1; n}$ – матрица, в i -й строке которой записана последовательность пройденных и удаленных вершин до вершины i ;

$K = \{k_i\} = \{k(i)\}$, $i = \overline{1; n}$ – вектор-счетчик количества элементов в строке i матрицы SV .

Для нахождения транзитных нагрузок w на все вершины дерева используется алгоритм, представленный псевдокодом (полное описание алгоритма см. в [1]):

Нагрузки на вершины вычисляются пока их больше двух
while (пока) $sum(V) > 2$

1. Для каждой вершины вычисляется количество смежных с ней вершин и записывается в SCH , последняя смежная запоминается в $F(i)$
for $i = 1:n$

for $j = 1:n$

if $S(i, j) == 1$

$SCH(i) = SCH(i) + 1$

$F(i) = j$.

2. Среди всех вершин выявляются висячие, и следующие действия выполняются для них

for $i = 1:n$ if $(SCH(i) == 1) \& (sum(V) > 2)$ то вершина i висячая.

2.1. Рассчитывается дуговая нагрузка $dw(f(i))$ и $sdw(i) = \sum dw(i)$ – суммарная дуговая нагрузка на вершину $f(i)$.

2.2. Транзитная нагрузка $w(f(i))$ вычисляется по частям. Для этого формула (1) представляется в виде $w(f(i)) = \sum_i (p1 + p2)$,

где

$$p1 = w(i) - dw(i) - p5,$$

$$p2 = \lambda_i - p3 - p4$$

$$p5 = \sum_{z < k(i)} (\lambda(f(i), sv(i, z)) + \lambda(sv(i, z), f(i)))$$

$$p3 = \sum_{z < k(i)} (\lambda(i, sv(i, z)) + \lambda(sv(i, z), i))$$

$$p4 = \lambda(i, f(i)) + \lambda(f(i), i)$$

if $K(i) > 0$

for $h = 1:K(i)$

вычисление $p3$ и $p5$

else $p3 = 0,$
 $p5 = 0.$

Вычисляются $p4, p1, p2$

$$w(f(i)) = w(f(i)) + p1 + p2 - dw(f(i)).$$

2.3. Удаляются висячие вершины с занесением в матрицу памяти

2.3.1. i заносится в $sv(f(i), f(f(i)))$;

2.3.2. Все элементы строки i матрицы sv также заносятся в строку $f(i)$ матрицы sv ;

2.3.3. Вершина i удаляется из списка вершин V и матрицы смежности S .

Таким же образом рассчитываются транзитные нагрузки на все вершины дерева.

Так как исходный граф неориентированный и вычисленные нагрузки на ребра являются суммарными нагрузками на ребро $\langle i, j \rangle$ в обе стороны, то есть из i в j и из j в i , то матрица нагрузок на ребра графа $RS = \{rs_{ij}\} = \{rs(i, j)\}$ симметрична.

Нагрузка на каждое из ребер есть

$$rs(i, f(i)) = rs(f(i), i) = w(i) - sdw(i) + lam(i) - \sum_{z < k(i)} (lam(i, sv(i, z)) + lam(sv(i, z), i)).$$

Далее вычисляется суммарная стоимость прохождения трафика по построенному покрывающему дереву: $Sum = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i rs_{ij} wrt_{ij}$.

Таким образом, перебирая все возможные покрывающие деревья, используя, например, алгоритм Кристофидеса [3], для каждого дерева вычисляется суммарная стоимость проходящего по нему трафика и выбирается наименьшая. Полученная стоимость и будет представлять собой минимальную возможную стоимость, по которой можно передать трафик через заданную сеть G с известной интенсивностью обмена данными между узлами Λ . Соответствующее покрывающее дерево будет моделью такой сети с минимальной стоимостью.

Литература

1. Анищенко А.А. Вычисление нагрузок на узлы сети, представленной в виде дерева // Прикладная теория вероятностей и теоретическая информатика: тез. докл. Всерос. конф. М.: ИПИ РАН, 2012. С. 49-51.
2. Анищенко А.А. Задача вычисления покрывающего дерева // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2012. С. 222-228.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
4. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
5. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973. 301 с.

115551, г. Москва, Ореховый бульвар, д. 7, корп. 2, кв. 621, т. 8(906)723-8347,
Анищенко Анна Анатольевна, e-mail: anna@anischenko.ru

УДК 621.43:621.37

ЭЛЕКТРОННОЕ СЕРДЦЕ ДВС

И.О. Аристов, М.М. Локтев, А.Е. Грошев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассматриваются вопросы применения компьютерных технологий в сфере автомобильной промышленности. Описывается система электронного впрыска топлива, создание которой стало возможным вследствие развития информационных технологий; принцип действия и основные достоинства.

“Бумажная цифра – мертвая цифра, а цифра в электронной форме способна рождать мысли и действия”. Эта фраза принадлежит человеку,

стоявшему у истоков компьютерной эры, Биллу Гейтсу. Действительно, уже сложно представить нашу жизнь без электронного разума, который сопровождает нас в повседневной жизни.

Развитие информационных технологий, вкупе с развитием автомобильной промышленности, на определённом этапе позволило соединить эти две, на первый взгляд, совершенно несовместимые отрасли.

Несовершенство карбюраторных систем питания, ухудшение экологической обстановки и неизбежное уменьшение энергетических запасов привели к созданию двигателей с современной системой впрыска топлива, целью которой было уменьшение расхода топлива, вредных выбросов в атмосферу, улучшение динамических качеств автомобиля, а также облегчение процесса пуска двигателя.

Создание микропроцессорной системы неразрывно связано с использованием компьютерных технологий ввиду того, что основой для её работы является электронный блок управления (ЭБУ), представляющий собой микропроцессор, имеющий устройства ввода и синтеза информации, вывода команд управления. ЭБУ получает информацию о состоянии различных узлов двигателя посредством набора датчиков, с которых поступают данные: о положении и частоте вращения коленчатого вала, массовом расходе воздуха двигателем, температуре охлаждающей жидкости, положении дроссельной заслонки, содержании кислорода в отработавших газах, положении распределительного вала, наличии детонации в двигателе и др. [1].

Аналоговая информация от датчика положения дроссельной заслонки и датчика кислорода преобразуется в цифровую. В постоянном запоминающем устройстве записаны данные опорных точек для установочных устройств положения воздушной и дроссельной заслонок, частоты вращения коленчатого вала, температуры охлаждающей жидкости. После обработки информации выходные сигналы усиливаются и подаются на исполнительные механизмы. Также немаловажным элементом является система самодиагностики, сообщающая водителю о возникших неисправностях в двигателе [2].

Современные системы электронного впрыска способны адаптировать программу работы под конкретный экземпляр мотора, под стиль вождения и многие другие характеристики.

Безусловно, даже такая современная система, выполненная с использованием компьютерных технологий, не лишена недостатков. Но её создание явилось новым этапом в мировом автомобилестроении, позво-

лило снизить расход топлива, заметно уменьшить вред, наносимый окружающей среде, повысить комфорт и мощность автомобилей.

Литература

1. Твег Р. Системы впрыска бензина. Устройство, обслуживание. Ремонт. М.: Изд-во «За рулём», 1997. 144 с.
2. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 384 с.

УДК 004.312.2

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОНЕМНОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ЯЗЫКА VHDL

И.Ю. Беликов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассмотрен эффективный подход к использованию внутренних ресурсов программируемых логических интегральных схем при описании параметров распознающего устройства.

Несмотря на высокую степень интеграции схем с программируемой логикой (ПЛИС) и большого количества доступных ресурсов остается проблема их эффективного использования. В работе [1] предлагается метод фонемной классификации на основе нечеткой логики. Фонемные параметры описываются параметрами Т-функции принадлежности. При помощи универсального языка описания электронных схем *VHDL* существует возможность реализовать параметры системы в виде элемента цифрового устройства. От стиля описания кода зависит конечный результат синтеза САПР. В области устройств распознавания речи, реализация фонемных параметров сводится к их описанию в аналитическом виде. В таком случае САПР реализует элемент устройства полностью на логических ячейках. Если использовать конструкцию *CASE* и представить параметры в виде числовых констант, то существует возможность указать САПР синтезировать проект с размещением параметров во встроенной блочной памяти кристалла ПЛИС. Такой подход повышает эффективность, так как практически не использует наиболее ограниченный ресурс – логические ячейки и не требует наличие внешней памяти. Для считывания фонемных параметров шина мультиплексируется. На входе мультиплексора устанавливается адрес записанного фонемного параметра и сигнал управления, по состоянию которого данные из блочной

памяти считываются в регистр для проведения логических операций сравнения. Близкое расположение внутренней памяти вокруг блока логических ячеек позволяет добиться высокой производительности элемента цифровой схемы.

Литература

1. Беликов И.Ю. Математическое моделирование речевых сигналов на основе нечеткой логики // Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2012. № 5. С. 20-24.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, каф. ЭВМ, т. 255-55-74,

e-mail: belikov_ivan@mail.ru

УДК 531.4

ОБ ЭФФЕКТАХ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ СВЯЗИ И ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАК ФАКТОРЕ САМООРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ

А.В. Бородай

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассматриваются вопросы, касающиеся процесса образования и поглощения энергии фрикционной связи, сопровождающегося формированием геометрического профиля поверхности и структуры зоны контакта тел, и предложены схемы реализации его основных кинетических эффектов, обеспечивающих протекание процесса естественной организации.

В соответствии с положениями волновой трибомеханохимии основу кинетики формирования и действия фрикционной связи составляет замкнутый поперечный волновой процесс (стоячая поперечная волна), возникающая в поверхностном слое, первичным структурным элементом которого являются вихри контактного вихревого поля, имеющие чрезвычайно малый пространственный масштаб. Указанный процесс реализуется как в случае свободной поверхности, так и в зоне контакта тел и характеризуется циклическим излучением носителя первичного импульса с поверхности третьего тела (излучателя), отражением от поверхности подслоя тел и поглощением импульса третьим телом [1]. Проводником указанного импульса являются ветви особых стержневых систем, составляющих основу структуры фрикционной связи и представляющих собой связанные линейные совокупности, цепи, состоящие из элементарных вихрей, отделенных один от другого весьма малыми разделительными частицами (рис. 1). Можно видеть, что процесс

распространения носителя импульса представляет собой движение вихревой складки, перемещающейся вдоль стержневой системы. На рисунке представлены: I – излучатель первичного импульса; II, III – зоны уплотнения среды (в том числе масса тел); IV – координата, соответствующая положению равновесия сил, приложенных к носителю импульса (поверхность трения); V, VI – частицы зон подслоя; J'_Σ , $J'_{\Sigma x}$ – падающий и отраженный первичный импульс; A, B – центральные вихри складки-носителя импульса; a – разделительные частицы; ϕ' – зоны потенциала излучателя; p, r – элементы стержневых систем.

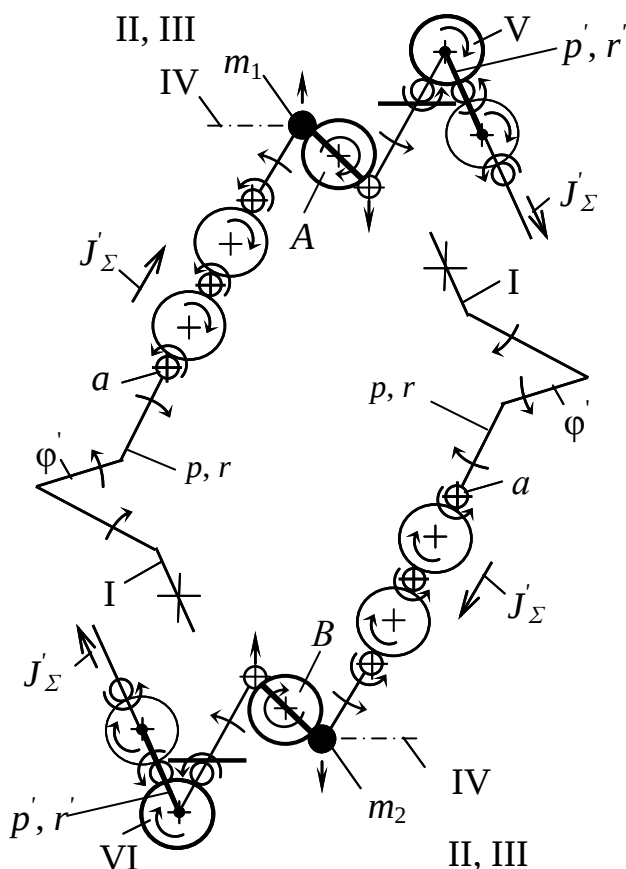


Рис. 1. Совмещенная схема процессов излучения, распространения, падения первичного импульса на поверхность подслоя тел и отражения от поверхности

Из приведенной схемы следует, что процесс распространения складки на этапах, предшествующих падению импульса на поверхность тел, представляет собой процесс последовательной передачи однонаправленного

вращения вихрей вдоль стержневой цепи, обеспечиваемый присутствием в их структуре разделительных частиц. Одновременно с движением складки осуществляется перемещение зон повышенной плотности системы, средоточием которых является складка. При достижении движущейся складкой зон подслоя характер движения складки изменяется, происходит торможение ее движения вдоль стержня и, вследствие сжатия центральных вихрей складки A и B, ускорения их вращения и сцепления с подслоем, нарушение линейности стержневых систем, возникновение зон их угловой, изгибной упруго-пластической деформации и образование геометрического профиля поверхности. При этом в зонах вершин (и впадин) шероховатостей образуются зоны уплотнения и интенсивного внутреннего вращения, обозначенные присутствием на схеме зачерненных частиц m_1 и m_2 (рис. 1). Процесс образования уплотненных

зон и процесс образования профиля поверхности является процессом частичного поглощения энергии движения носителя импульса (энергии связи). Указанный процесс является важнейшим фактором кинетики фрикционного взаимодействия, фактором возникновения и разрыва силовых линий внутри фрикционной связи и в особенности образования и разрыва силовых линий p' и r' между частицами зон уплотнения и окружающей средой (подслоем) [1].

Основным результатом процессов поглощения энергии связи и формирования профиля поверхности и в особенности процессов взаимного внедрения элементов профиля поверхностей контактирующих тел является формирование самой связи, а также протекание процессов совершенствования ее структуры и эффективности функционирования, являющееся одним из основных составляющих процесса самоорганизации систем. Схема процесса взаимодействия элементов профиля поверхностей и образования симметричной (канонической) связи приведена на рис. 2. Можно видеть, что физический смысл контактирования тел состоит во взаимном внедрении профилей поверхностей и дополнительном сжатии зон уплотнения m_1 , m_2 под действием потенциальных сил тяготения или нормальных упругих сил $F_{\text{ты}}$ (рис. 2,а), интенсификации индукционного действия этих зон и, как следствие, в повышении эффективности процесса формирования и функционирования связи.

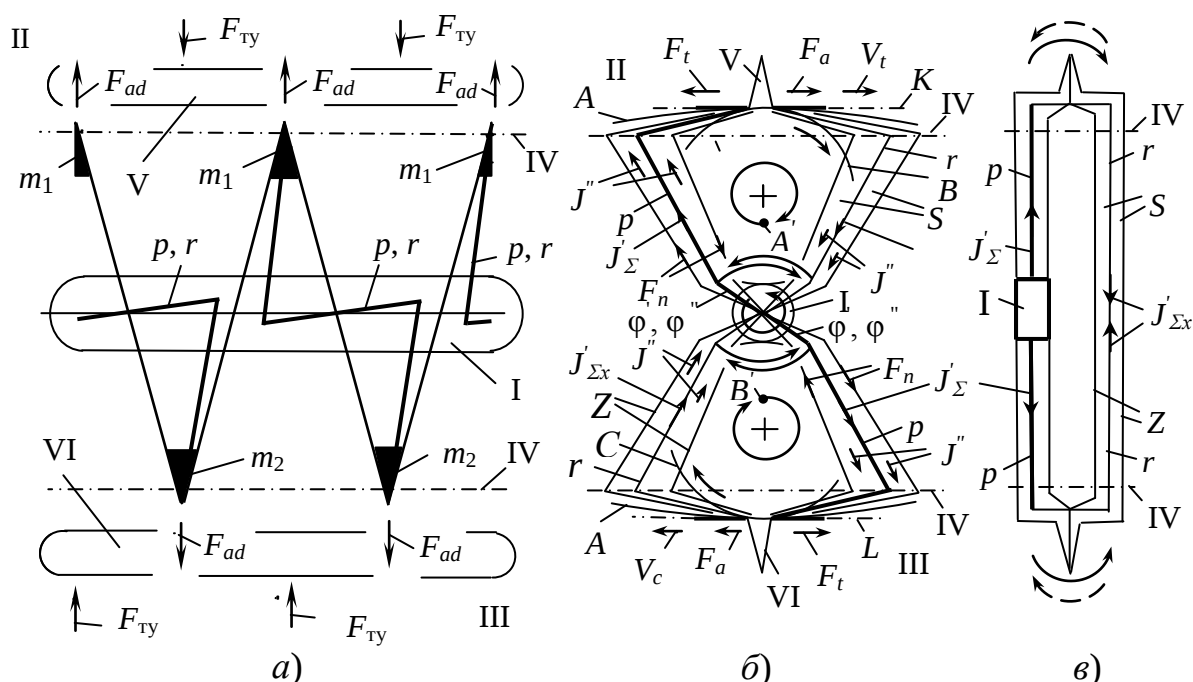


Рис. 2. Схема формирования (а), строения и функционирования канонической фрикционной связи: б – продольное, в – поперечное сечение

Принятые обозначения: F_{ad} – поверхностные силы; F_t и F_a – силы трения и тангенциальные движущие силы; p и r – ветви стрелковых

систем; S и Z – скин-слои и скин-пленки; V_b , V_c – скорости тангенциального движения тела и контртела; ϕ' , ϕ'' – зоны сосредоточения первичной и вторичной составляющих трибопотенциала.

Физическую сущность процесса действия связи составляет эффект подвода энергии среды и энергоносителя в систему и преобразование этой энергии в энергию относительного перемещения тел, осуществляющегося под действием движущих сил F_a , развиваемых связью. Реализация указанного эффекта является еще одним, не менее важным фактором процесса естественной организации.

С целью раскрытия сущности и механизма указанного эффекта необходимо рассмотреть схему процессов, происходящих при падении и отражении первичного импульса $J'_\Sigma (J'_t)$, $J'_\Sigma (J'_c)$ и $J'_{\Sigma x}$, важнейшим из которых является образование силовых линий p' , r' между вихревыми ячейками (элементами структуры) носителей и проводника импульса, располагающимися вблизи границ поверхностного слоя, и вихревыми ячейками, составляющими объемы среды и вещества, находящимися за пределами слоя (рис. 3). На рисунке представлены: A , A' , A'' , B , B' , B'' , a' – элементы вихревой структуры поверхностного слоя; C и D – элементы структуры первичной среды (энергоносителя).

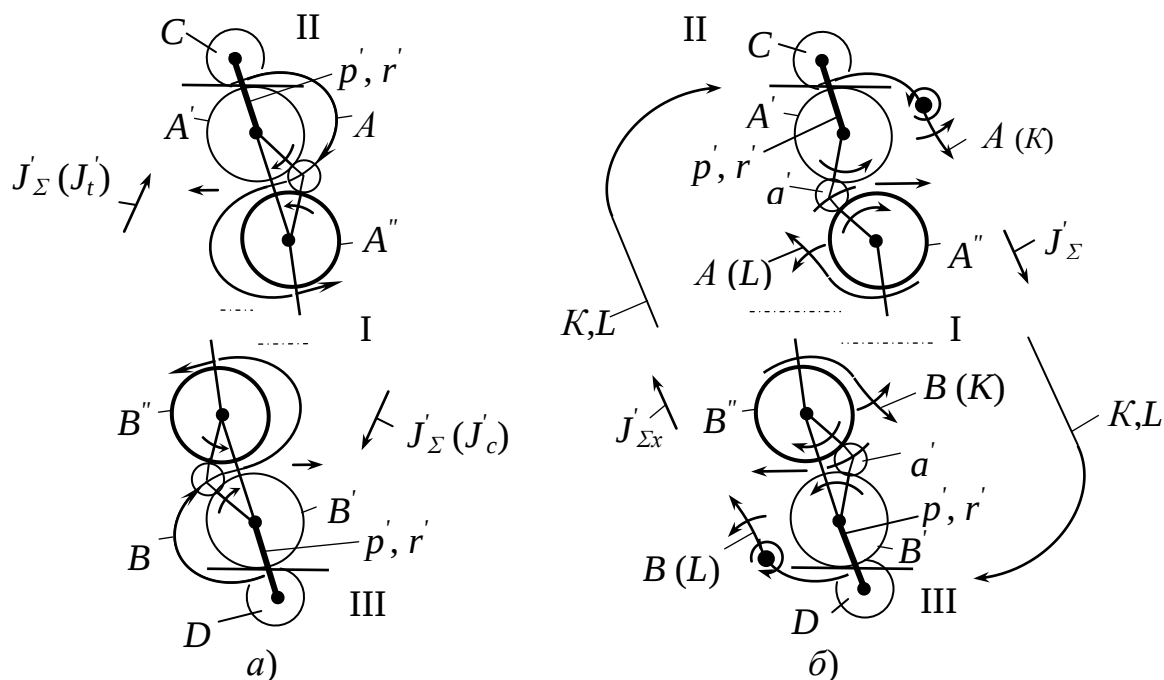


Рис. 3. Схема захвата частиц первичной среды поверхностным слоем (а) и подвода энергии и ресурсов среды в поверхностный слой (б)

Можно видеть, что результатом образования силовых линий является возникновение периодов (фаз) объединения носителей импульса и вещества первичной среды, захват фрикционной связью энергии и

ресурсов среды при падении импульса, сопровождающийся последующим отрывом частиц среды и тем самым подводом энергии и ресурсов первичной среды в систему при его отражении [1]. В результате реализации указанных ресурсов обеспечивается формирование объектов ускоренного движения объектов (поток и связей) вдоль поверхности, формирование и развитие поверхностного состояния и образование и совершенствование самих объектов движения, составляющее основу процесса естественной организации (самоорганизации) систем в его совокупности. Одним из основных эффектов самоорганизации следует считать образование и совершенствование структуры и кинетики тангенциального движения макроскопических объектов, в особенности повышение управляемости движения объектов.

Из схемы, приведенной на рис. 3, следует, что одним из наиболее важных продуктов функционирования поверхностного слоя, в особенности в режиме интенсивной адсорбции, является образование особых замкнутых чрезвычайно тонких K , L -пленок – градиентных объектов, обеспечивающих, в частности, функционирование границ раздела между слоем и основным материалом тел и между слоем и окружающей средой.

Необходимо отметить, что, исходя из анализа схем действия фрикционных связей как объектов, обеспечивающих необходимую кинетику процессов функционирования естественных систем, наиболее важными фазами указанных процессов являются включение («запаковка») захватываемой энергии первичной среды в состав носителя первичного (и вторичного) трибоимпульсов, происходящая на границе раздела связи и подслоя тел, перенос носителя импульса в зону третьего тела и освобождение внутренней энергии («распаковка») носителя импульса в указанной зоне, одновременно являющаяся фазой преобразования подводимой энергии и действия тангенциальных движущих сил в системе.

Дальнейший анализ приведенных схем, в особенности представленных на рис. 1 и 2, позволяет отметить ряд существенных общих особенностей контактирования тел и сформулировать ряд общих выводов, касающихся кинетики процесса трения и структуры фрикционных связей и трибосистем. Из схемы, приведенной на рис. 1, следует, что формирование геометрического профиля поверхности не должно ограничиваться только зонами подслоя, а распространяться на всю толщину (высоту) зоны контакта. Действительно, поскольку процесс передачи импульса вдоль стержней системы является циклическим процессом, каждый цикл передачи вращения от вихря к вихрю, составляющему цепь,

должен сопровождаться частичным локальным поглощением импульса и формировать набор локальных зон поглощения. В результате структура зоны контакта по ее высоте должна представлять собой совокупность

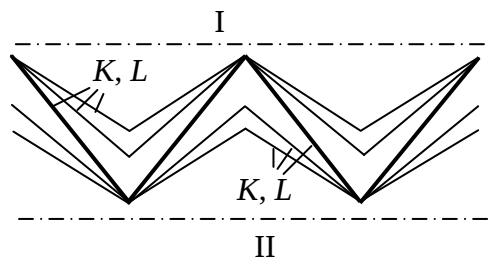


Рис. 4. Конфигурация элементарных слоев и K, L -пленок в зоне контакта тел; штрих-пунктирные линии – границы поверхностного слоя

элементарных слоев, параллельных поверхности трения, характеризующихся наличием геометрического профиля, подобного формируемому в подслое, хотя и не столь сильно выраженного (рис. 4). Поскольку формирование указанной структуры является фактором усиления действия полей поверхностных сил, это обстоятельство позволяет объяснить,

каким образом происходит перемещение зон поглощения, формируемых в подслое, в зону сосредоточения потенциала ϕ' , ϕ'' (вторичные потоки массопереноса J'' , рис. 2,б), а также установить причины высокой эффективности, скорости и ускоренности такого перемещения. Следует отметить, что структура образующихся K, L -пленок (точнее их пучков) так же должна характеризоваться изломанностью, т.е. наличием геометрического профиля, подобного профилю поверхностей тел.

Другим выводом из анализа схем является то, что процесс функционирования системы трения характеризуется периодами (фазами) интенсивного сцепления как элементарных слоев подслоя между собой, так и зоны контакта в целом с поверхностью подслоя, а также взаимным сцеплением слоев тел внутри подслоя. Указанные периоды чередуются с периодами расцепления слоев, в течение которых относительное тангенциальное движение слоев и особенно K, L -пленок характеризуется скоростями, существенно превышающими скорость движения тел, что согласуется с данными работы [2]. Таким образом, шероховатость поверхности не является элементом структуры поверхностного слоя, фиксированным относительно поверхности, а представляет собой интенсивно перемещающийся относительно нее текущий объект. Причем движение слоев и в особенности K, L -пленок является замкнутым. Движение пленок замыкается как внутри зоны контакта, так и внутри зон подслоя.

И, наконец, еще одним выводом из анализа приведенных схем является тот, что процесс перемещения носителя импульса вдоль стержней фрикционной связи вследствие последовательно протекающего процесса поглощения импульса по всей длине стержней обеспечивает возможность удлинения стержней и нормального перемещения слоев подслоя

вглубь тел и тем самым возможность увеличения пространственного масштаба, возрастания сложности и эффективности структуры стержневых систем и трибосистемы в целом, и переход к организованному режиму движения.

Литература

1. Бородай А.В. О механизме действия подслоя тел в трибосистемах // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2012. № 6. С. 49-55.
2. Бородай А.В., Шаповалов А.Ю., Шляховой А.Г. О единстве и тождественности механизмов упрочнения физических объектов, прочности тел и действия сил трения в трибосистемах // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., 3 нояб. 2008 г., г. Новочеркасск / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2008. С. 65-70.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 2-55-412,
e-mail: borodai11@yandex.ru

УДК 504.5: 532.59

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ПО НЕФТЕПРОВОДУ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК

Э.В. Галиакбарова

Уфимский государственный нефтяной технический университет

В.Ф. Галиакбаров

ООО «НТ-Центр», г. Уфа

Проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на создание способов и устройств для осуществления мониторинга давления в нефтепроводах.

Нефтепроводы - системы трубопроводов для транспортировки продуктов переработки нефти от места производства к пунктам потребления. Эти системы трубопроводов имеют достаточно сложную структуру, в частности, они состоят из конструктивных участков: линейных трубопроводов и конструктивных узлов, т.е. устройств, нарушающих однородность магистралей (например, к ним относятся места изменения внутреннего диаметра, разветвления, резкие повороты, места установки насосов, задвижек, кранов, гидроаккумуляторов и т.п.).

Для обеспечения экологической безопасности магистральных трубопроводов при перекачке нефтепродуктов с целью обнаружения утечек

предлагается применять импульсное сканирование. Под импульсом понимается отклонение давления жидкости от установившегося значения, вызванное кратковременным внешним воздействием. Импульс, генерированный на входе системы, возбуждает колебательный процесс в линии связи. Вынужденные колебания давления в произвольном сечении трубопровода могут быть найдены импедансным методом [1]. Гидравлическим импедансом (или полным гидравлическим сопротивлением трубопровода) называют отношение давления, действующего в сечении трубопровода на заданном расстоянии от входа в систему, к объемной скорости потока жидкости в этом сечении.

В теоретических исследованиях использованы методы математического моделирования движения жидкостей в трубах - подобия и теории размерности, математической физики, численные решения. Полученные решения [2, 3] показали возможность волнового сканирования нефтепроводов и обнаружения мест утечек. Экспериментальные исследования [3] показали, что места утечек жидкости можно определить с помощью современной компьютерной обработки импульсов, отраженных и прошедших через утечку, и зафиксированных специальными интеллектуальными датчиками давления [4, 5].

Литература

1. Галиакбарова Э.В. Математическое моделирование процесса распространения импульса давления по трубопроводной системе, заполненной капельной жидкостью // Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике: сб. тр./ Башкирск. гос. ун-т. Уфа, 2001. Т. 1. Математика. С. 55-60.
2. Галиакбарова Э.В., Гольянов А.А. Математическое моделирование распространения импульса давления в трубопроводной системе // НИС, ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ. Сер. «Транспорт и хранение нефтепродуктов». 2002. Вып. 10-11. С. 35-41.
3. Галиакбарова Э.В. Галиакбаров В.Ф. Импульсное сканирование нефтепроводов для обнаружения утечек // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов. 2012. № 3. С. 162-168.
4. Пат. 2197679 РФ, МПК F 17 D 5/02. Способ определения места утечки жидкости из трубопровода / В.Ф. Галиакбаров, А.А. Гольянов, Г.Е. Коробков (РФ). 2001108766/06; Заявлено 03.04.2001; Оpubл. 27.01.2003. Бюл. 3.
5. Пат. 2199088 РФ, МПК G 01 D 3/02, G 01 R 35/00. Способ коррекции статических характеристик измерительных преобразователей / М.З. Асадуллин, Ф.М. Аминев, В.Ф. Галиакбаров, С.В. Емец, В.Д. Ковшов, Г.Е. Коробков, И.Н. Полищук. 2002121952/28(023559); Заявлено 11.04.02; Оpubл. 20.02.03, Бюл. 5.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ CGS С СИЛОЙ СМЕРТНОСТИ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ВОЗРАСТА

Л.Л. Делицын

Московский государственный университет культуры и искусств

В нашем обобщении аналитической модели CGS, допускающем изменения силы смертности с возрастом, предполагается, что плотности (на единицу возраста) количества пользователей и потенциальных пользователей нововведения, удовлетворяют системе нелинейных функционально-дифференциальных уравнений с нелокальными граничными условиями. С целью их решения мы вводим две вспомогательные функции времени, которые, как показано в нашей работе, удовлетворяют системе линейных интегральных уравнений Вольтерра. Для стабильной популяции оба уравнения системы становятся уравнением свертки, что позволяет применить для их решения преобразование Лапласа, а затем решить исходные интегро-дифференциальные уравнения.

Введение

Ф. Центроне, А. Гойя и Э. Салинелли [2, 3] построили и проанализировали модель распространения нововведения с учетом рождаемости и смертности для случая, когда

- 1) смертность не зависит от возраста индивида $\mu(t, \pi) \equiv \mu$;
- 2) коэффициенты рождаемости не зависят от возраста $b(t, \pi) \equiv b$;
- 3) популяция стабильна (экспоненциально изменяется с сохранением возрастной структуры).
- 4) все новорожденные пополняют класс потенциальных пользователей;
- 5) нет таких индивидов, которым нововведение недоступно по финансовым или техническим причинам;
- 6) функция риска стать пользователем $h(t, \eta(t))$ одинакова для любого индивида и не зависит от его возраста.

Преимуществом этой модели, которая в [1] названа моделью CGS, по сравнению с классической логистической моделью, является возможность анализа влияния естественного роста населения на распространение инноваций, что актуально для многих регионов мира. Модель CGS можно описать при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dX}{dt} = \left(p + q \frac{X}{K} \right) \cdot Y - \mu X, \quad \frac{dY}{dt} = - \left(p + q \frac{X}{K} \right) Y + bK, \quad \frac{dK}{dt} = (b - \mu)K.$$

Здесь $X(t)$ – количество пользователей нововведения; $Y(t)$ – количество потенциальных пользователей, еще не использующих нововведение;

$K(t)$ – численность населения. Используются также постоянные неотрицательные параметры: p – параметр внешнего воздействия, q – параметр внутреннего воздействия; b – коэффициент рождаемости; μ – коэффициент смертности.

Для уравнений модели CGS её авторами получено явное решение [1]

$$K(t) = K(0)e^{(b-\mu)t}, \quad X(t) = K(t) \cdot \xi(t), \quad Y(t) = K(t) \cdot (1 - \xi(t)),$$

где используются вспомогательная (логистическая!) функция

$$\xi(t) = \frac{1 - \tilde{p}\tilde{\tau}_0 \exp(-(\tilde{p} + \tilde{q})t)}{1 + \tilde{q}\tilde{\tau}_0 \exp(-(\tilde{p} + \tilde{q})t)} \tilde{M}$$

и семь комбинаций параметров и начальных условий исходной задачи

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_0 &= \frac{\tilde{M} - \xi_0}{\tilde{p}\tilde{M} + \tilde{q}\xi_0}, \quad \xi_0 = \frac{X(0)}{K(0)}, \quad \eta = \sqrt{\beta^2 + 4pq}, \quad \beta = q - p - b. \\ \tilde{p} &= \frac{\eta - \beta}{2}, \quad \tilde{q} = \frac{\eta + \beta}{2}, \quad \tilde{M} = \frac{\eta + \beta}{2q} = \frac{2p}{\eta - \beta} = \frac{\tilde{q}}{q} = \frac{p}{\tilde{p}}. \end{aligned}$$

Модель CGS справедлива лишь для постоянной силы смертности $\mu(t, \pi) \equiv \mu$ (где t – текущий момент времени, π – момент рождения индивида), не характерный для человеческого общества.

Обобщённая модель CGS

В предлагаемом нами обобщении модели CGS сила смертности зависит от момента рождения индивида (или, эквивалентно, от его возраста), т.е. снимается ограничение (1). Ослабляя ограничение (4), допускаем немедленное зачисление в пользователи нововведения детей, рождённых в семьях пользователей (аналогично наследственным болезням). От допущения (2) тоже можно отказаться, при этом удастся получить систему, состоящую не из двух, а из трех интегральных уравнений. Предприняв попытку отказаться от допущения (6) и позволить функции риска зависеть от π , мы не смогли получить каких-либо простых решений.

Пусть нововведение начинает распространяться в момент $t_0 = 0$. Мы предполагаем, что плотности (на единицу возраста) количества пользователей $x(t, \pi)$ и потенциальных пользователей $y(t, \pi)$ нововведения, рожденных в момент π , при $t \geq \pi$ удовлетворяют уравнениям баланса [2]

$$\frac{\partial x}{\partial t} = h(t, \eta(t))y(t, \pi) - \mu(t, \pi)x(t, \pi), \quad \frac{\partial y}{\partial t} = -h(t, \eta(t))y(t, \pi) - \mu(t, \pi)y(t, \pi) \quad (1)$$

с нелокальными граничными условиями для поколений (при $t \geq 0$)

$$x(t, t) = b_x X(t) + b_y Y(t), \quad y(t, t) = (b - b_x) X(t) + (b - b_y) Y(t), \quad (2)$$

где численности пользователей $X(t)$ и потенциальных пользователей $Y(t)$ вычисляются при помощи интегрирования по моменту рождения π

$$X(t) = \int_{-\infty}^t x(t, \pi) d\pi, \quad Y(t) = \int_{-\infty}^t y(t, \pi) d\pi, \quad K(t) = \int_{-\infty}^t k(t, \pi) d\pi, \quad (3)$$

а их доли в населении суть

$$\xi(t) = X(t) / K(t), \quad \eta(t) = Y(t) / K(t). \quad (4)$$

Здесь $K(t)$ – описывает полную численность населения, $k(t, \pi)$ – плотность популяции на единицу возраста. Функции $k(t, \pi)$ считаются известными и непрерывными при $t \geq \pi$

$$k(t, \pi) = \begin{cases} bK(\pi)l(t, \pi) & \text{при } t \geq \pi > 0 \\ k(0, \pi) \frac{l(t, \pi)}{l(0, \pi)} & \text{при } t > 0 \geq \pi. \\ 0 & \text{при } t < \pi \end{cases}$$

Заданы начальные условия

$$y(t_0, \pi) = \varphi(\pi), \quad x(t_0, \pi) = k(t_0, \pi) - \varphi(\pi). \quad (5)$$

Условия (2) содержат два новых параметра по сравнению с CGS:

b_x – определяет количество детей, которые родились в семьях пользователей и которые обучены (дома или в школе) использованию нововведения;

b_y – определяет количество детей, которые обучены в обязательном порядке (в школе), хотя их родители к моменту t и не являются пользователями.

Определим функцию дожития

$$l(t, \pi) = \exp\left(-\int_{\pi}^t \mu(\theta, \pi) d\theta\right) \text{ для } t \geq \pi \quad \text{и} \quad l(t, t) = 1 \text{ для } t \leq \pi, \quad (6)$$

и плотность распределения популяции по моментам рождения

$$\rho(t, \pi) = b \cdot l(t, \pi) K(\pi) / K(t). \quad (7)$$

Как и в CGS, функция риска стать пользователем $h(t, \eta(t))$ не зависит от π .

Определим также две вспомогательные функции

$$u(t) = \begin{cases} \exp\left(\int_0^t h(\theta; \eta(\theta)) d\theta\right) & \text{для } t \geq 0 \\ 1 & \text{для } t < 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad v(t) = \begin{cases} \eta(t)u(t) & \text{для } t \geq 0 \\ \eta(0) & \text{для } t < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Утверждение 1 (лемма эквивалентности).

Решения интегральных уравнений

$$y(t, \pi) = \begin{cases} y(\pi, \pi) l(t, \pi) \frac{u(\pi)}{u(t)} & \text{для } t \geq \pi > 0 \\ y(0, \pi) \frac{l(t, \pi)}{l(0, \pi)} \frac{1}{u(t)} & \text{для } t \geq 0 \geq \pi \\ 0 & \text{для } t < \pi \end{cases} \quad (9)$$

являются также решениями интегро-дифференциальных уравнений (1) с условиями (2) и (5) и, наоборот, решения (1), (2), (5) удовлетворяют (9).

Замечание

Подставим выражения для $u(t)$ в первое (для $t \geq \pi > 0$)

$$y(t, \pi) = \left((b - b_x) K(t) + (b_x - b_y) \int_{-\infty}^t y(t, \tau) d\tau \right) l(t, \pi) \exp \left\{ - \int_{\pi}^t h \left(\theta, \int_{-\infty}^{\theta} y(\theta, \tau) d\tau \right) d\theta \right\}$$

и второе ($t \geq 0 \geq \pi$) уравнения

$$y(t, \pi) = \varphi(\pi) \frac{l(t, \pi)}{l(0, \pi)} \exp \left\{ - \int_0^t h \left(\theta, \int_{-\infty}^{\theta} y(\theta, \tau) d\tau \right) d\theta \right\}.$$

Теперь очевидно, что уравнения являются интегральными и нелинейными.

Утверждение 2 (аналог уравнения восстановления)

Функции $v(t)$ и $u(t)$ связаны уравнением

$$v(t) = \eta_0(t) + \delta_x \int_0^t \rho(t, \theta) u(\theta) d\theta + \delta_{xy} \int_0^t \rho(t, \theta) v(\theta) d\theta, \quad (10)$$

где $\eta_0(t) = \frac{1}{K(t)} \int_{-\infty}^0 \varphi(\pi) \frac{l(t, \pi)}{l(0, \pi)} d\pi$ – доля потенциальных пользователей,

рожденных не позже $t_0 = 0$ и доживших до t ;

коэффициенты $\delta_x = \frac{b - b_x}{b}$ и $\delta_{xy} = \frac{b_x - b_y}{b}$.

Заметим, что функция $\eta_0(t)$ вычисляется по известным функциям. Доказательства утверждений приведены в [2]. В частности, формулу (10) можно получить при помощи интегрирования (9) по моментам рождения и последующего умножения обеих сторон уравнения на $u(t)$.

Утверждение 3 (следствие выбора формы функции риска).

Примем предположение Ф. Басса [2] о том, что функция риска воспользоваться нововведением линейно зависит от $\xi(t)$, т.е.

$$h(t, \eta(t)) = p + q\xi(t) = p + q - q\eta(t). \quad (11)$$

Тогда функции $u(t)$ и $v(t)$ связаны вторым интегральным уравнением

$$u(t) = e^{(p+q)t} - q \int_0^t e^{(p+q)(t-\theta)} v(\theta) d\theta. \quad (12)$$

Действительно, из (8) следует

$$\frac{du}{dt} = u \cdot h(t; \eta) = (p + q)u - q\eta u = (p + q)u - qv.$$

Решение этого уравнения относительно $u(t)$ имеет вид (12).

Уравнения (10) и (12) образуют систему линейных интегральных уравнений Вольтерра. В векторных обозначениях

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{g}(t) + \int_0^t \mathbf{G}(t, \theta) \mathbf{f}(\theta) d\theta, \quad (13)$$

где

$$\mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(t) = \begin{bmatrix} e^{(p+q)t} \\ \eta_0(t) \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{G}(t, \theta) = \begin{pmatrix} 0 & -qe^{(p+q)(t-\theta)} \\ \delta_x \rho(t, \theta) & \delta_{xy} \rho(t, \theta) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Теорема (теорема 3.11 монографии [3], стр. 46).

Если $\mathbf{g}(t)$ и $\mathbf{G}(t, \theta)$ непрерывны в треугольнике $0 \leq \theta \leq t \leq T$ (в смысле непрерывности всех их компонент), то система (13) имеет единственное непрерывное решение на отрезке $0 \leq t \leq T$.

Отсюда вытекает существование решения системы интегро-дифференциальных уравнений (1) для непрерывных функций $l(t, \pi)$.

Утверждение 4

Обобщенную модель CGS описывает система интегральных уравнений

$$\hat{\mathbf{f}}(t) = \hat{\mathbf{g}}(t) + \int_0^t \hat{\mathbf{G}}(t, \theta) \hat{\mathbf{f}}(\theta) d\theta, \quad (15)$$

где

$$\hat{\mathbf{f}}(t) = \begin{bmatrix} u(t)e^{-(p+q)t} \\ v(t)e^{-(p+q)t} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{g}}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_0(t)e^{-(p+q)t} \end{bmatrix} \quad \text{и} \\ \hat{\mathbf{G}}(t, \theta) = \begin{pmatrix} 0 & -q \\ \delta_x \hat{\rho}(t, \theta) & \delta_{xy} \hat{\rho}(t, \theta) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Здесь введено обозначение $\hat{\rho}(t, \theta) = \rho(t, \theta)e^{-(p+q)(t-\pi)}$. Рассмотрено только $t \geq 0$.

Следствие.

Пусть

1) функция дожития $l(t, \pi) = l(t - \pi)$ зависит только от разности аргументов;

2) популяция стабильна при $t \geq 0$: $K(t) = K(0)e^{\lambda t}$;

3) популяция и ранее была стабильной, т.е. начальные условия имеют вид

$$k(0, \pi) = K(0)e^{b\pi}.$$

Параметр λ определяется из уравнения Лотки $1 = b \int_0^{\infty} e^{-\lambda a} l(a) da$.

Тогда $\rho(t, \pi)$, $\hat{\rho}(t, \pi)$ и $\mathbf{G}(t, \theta)$ зависят только от разности аргументов, и уравнения (15) становятся уравнениями свёртки.

Замечание

Практическую проблему при применении дискретного преобразования Фурье для решения уравнений (15) создаёт разрывность в нуле функции дожития и разрыв в нуле производной $u(t)$. Поэтому мы применяем преобразования Фурье не для расчета $u(t)$, а для расчета $\tilde{u}(t) = u(t) - u_{CGS}(t)$, где $u_{CGS}(t)$ подобрана так, чтобы $\tilde{u}(t)$ была непрерывна в нуле вместе с первой производной. Для этого достаточно использовать одинаковые p и $\eta(0)$, поскольку в обоих случаях

$$u(0) = 1 \quad \text{и} \quad \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = (p + q)u(0) - qv(0) = p + q(1 - \eta(0)).$$

Поскольку $u_{CGS}(t)$ вычисляется аналитически, находим $u(t) = u_{CGS}(t) + \tilde{u}(t)$.

Для $v(t)$ решение проблемы разрывности мы получить не смогли в связи со сложностью вычисления $\left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0}$, поэтому мы рассчитываем

$v(t) = (p/q + 1)u - (1/q) \frac{du}{dt}$ и признаем возникающие при этом сложности.

Численный пример

В математической демографии часто используются сила смертности Гомперца-Мейкема

$$\mu(a) = \mu_0 \exp(\mu_1 a) + \mu_2,$$

и соответствующая ей функция дожития

$$l(a) = \exp\left(\frac{\mu_0}{\mu_1}\right) \exp\left(-\frac{\mu_0}{\mu_1} \exp(\mu_1 a) - \mu_2 a\right)$$

Здесь $a = t - \pi$ – возраст индивида.

Пусть $p = 0,002$, $q = 0,06$, $\lambda = 0,0025$, $K(0) = 100$. Используем типичные для развитых стран $\mu_0 \approx 10^{-6}$, $\mu_1 = 0,14$, положим $\mu_2 = 0$.

Предположим, что первые тридцать лет после начала распространения инновации детей обучают использованию нововведения только в семьях пользователей, причём во всех таких семьях (“Сценарий 1” на рис. 1), что эквивалентно $b = b_x$. Решение, полученное по формулам (15), изображено на рис. 1 тонкой сплошной линией.

Пусть в момент $t_1 = 30$ начинается всеобщее обучение детей использованию нововведения (“Сценарий 2” на рис. 1). Перенесем начальный момент t_0 в точку $t = 30$ и рассчитаем в этой точке начальные условия (5), пользуясь решением, которое даёт “Сценарий 1”. Рассчитаем $\eta_0(t)$ (см. (10)). Снова применив (15), получаем результат, показанный на рис. 1 жирной сплошной линией при $t \geq 30$.

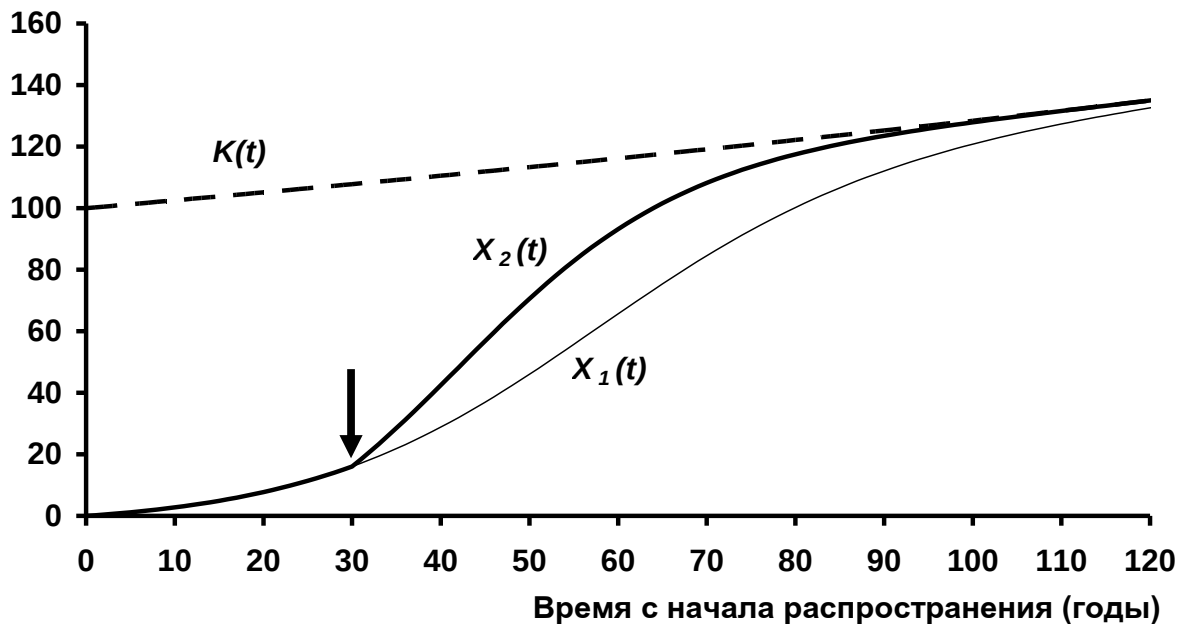


Рис. 1. Два сценария распространения нововведения

Литература

1. Centrone F., Goia, A., Salinelli E. Demographic processes in a model of innovation diffusion with a dynamic market // Technological Forecasting and Social Change, 74, 2007. – P. 247-266.
2. Делицын Л.Л. Обобщенная модель CGS распространения нововведения в растущей популяции // Труды вольного экономического общества России. – 2010. – Т. 164. – С. 412-420.
3. Linz P. Analytical and Numerical Methods for Volterra Equations. – SIAM Studies in Appl. Math., SIAM, Philadelphia, Pa., 1985.

УДК 629.3.02/.06

ИНТЕЛЛЕКТ В ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМОБИЛЯ

Д.А. Кошель, Е.А. Винник, А.Е. Грошев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассматриваются вопросы применения компьютерных технологий в сфере автомобильной промышленности. Описана антиблокировочная система тормозов, создание которой стало возможным вследствие развития информационных технологий, а также принцип действия и основные достоинства системы.

В современном мире решающее место заняли компьютерные технологии. Широкое применение компьютерные технологии нашли в автомобильной промышленности. Действительно, сейчас наибольшую стоимость автомобиля составляет именно электронное оборудование, управляемое именно компьютером, в том числе и обеспечение безопасности движения. Одним из ярких примеров систем безопасности, управляемых компьютером, является антиблокировочная система (АБС) тормозов. Основное предназначение системы – предотвращение блокировки колёс транспортного средства при торможении и сохранение контроля над курсовой устойчивостью и поворачиваемостью, а также сокращение тормозного пути при недостаточном сцеплении с дорожным покрытием [1].

При торможении, как только датчик (1) определяет, что колесо начинает блокироваться, электронный блок (4), обрабатывающий сигналы от всех датчиков, отдает управляющий импульс электромагнитным клапанам гидравлического блока (3). Гидравлический блок установлен в тормозной магистрали сразу после главного тормозного цилиндра (5), а его клапаны управляют давлением жидкости в контурах тормозной

системы. Если заторможенное колесо начало скользить, клапаны гидроблока понижают или временно прекращают подачу жидкости к рабочему тормозному цилиндру. Этого может оказаться недостаточно, чтобы колесо разблокировалось, и тогда электромагнитный клапан направит тормозную жидкость в отводную магистраль, снижая тем самым давление в рабочем тормозном цилиндре. Когда колесо вновь начинает вращаться, по достижении им некоторой угловой скорости электронный блок ABS снимает свою команду, клапаны открываются, и гидравлическое давление опять передается на тормозной механизм. Торможение и растормаживание колеса будут происходить периодически (этот процесс называется модуляцией, и гидроблок иногда называют модулятором тормозного давления), и водитель ощущает работу ABS частыми резкими толчками на педали тормоза, пока не исчезнет угроза блокирования или до полной остановки автомобиля [2].

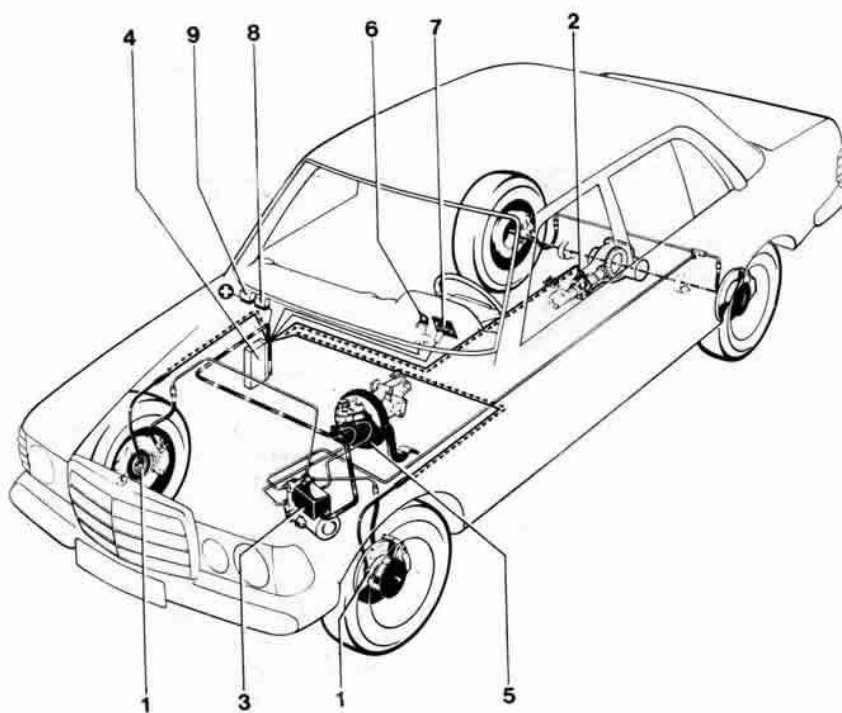


Рис. 1. ABS Mercedes W123

И всё же, ABS – не панацея, ведь, безусловно, основное участие в управлении автомобилем принимает сам водитель, и именно от его действий зависит безопасность дорожного движения. Развитие компьютерных технологий позволяет постоянно развивать данную систему и сводить к минимуму вероятность дорожно-транспортных происшествий.

Литература

1. ABS – 30 лет на страже жизни // За рулём. 2008.
2. Система экстренного торможения Brake Assist. AutoRelease.ru.

УДК 621.335.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ

А.Н. Крыгин

Омский государственный университет путей сообщения

В связи с широким вводом в эксплуатацию электрической тяги переменного тока и увеличением ее полигона, активно совершенствуются электровозы этой системы. Созданы локомотивы с плавным регулированием напряжения на тяговых двигателях (ТД) с последовательным и независимым возбуждением, разрабатываются автоматические системы управления мощностью локомотива. Поставлена задача о разработке способов и устройств, направленных на оптимальное использование их мощности.

Экспериментальные исследования поведения системы управления электроподвижного состава (ЭПС) позволяют получить наиболее полную и достоверную информацию о свойственных ей количественных и качественных закономерностях. Однако, эксперименты неосуществимы на стадии разработки системы управления. А опытные поездки связаны с большими затратами времени и средств на поиск эффективных решений.

Наиболее рациональным методом исследования сложных систем, таких как локомотив, является математическое моделирование. Исследование экономичности работы, установление функциональных зависимостей между параметрами регулирования мощности можно проводить путем анализа расчетных значений тягово-энергетических показателей ЭПС.

Тягово-энергетическая установка (ТЭУ) электровоза разделена на информационную и энергетическую части. Структурная схема ТЭУ приведена на рис. 1.

Энергетическая часть для электровозов с ТД последовательного возбуждения имеет два канала: первый канал образуют силовые элементы, участвующие в процессе преобразования энергии, и элементы, преобразующие информацию, необходимую для управления этим процессом; второй канал обеспечивает энергией цепи вспомогательных машин и оборудования.

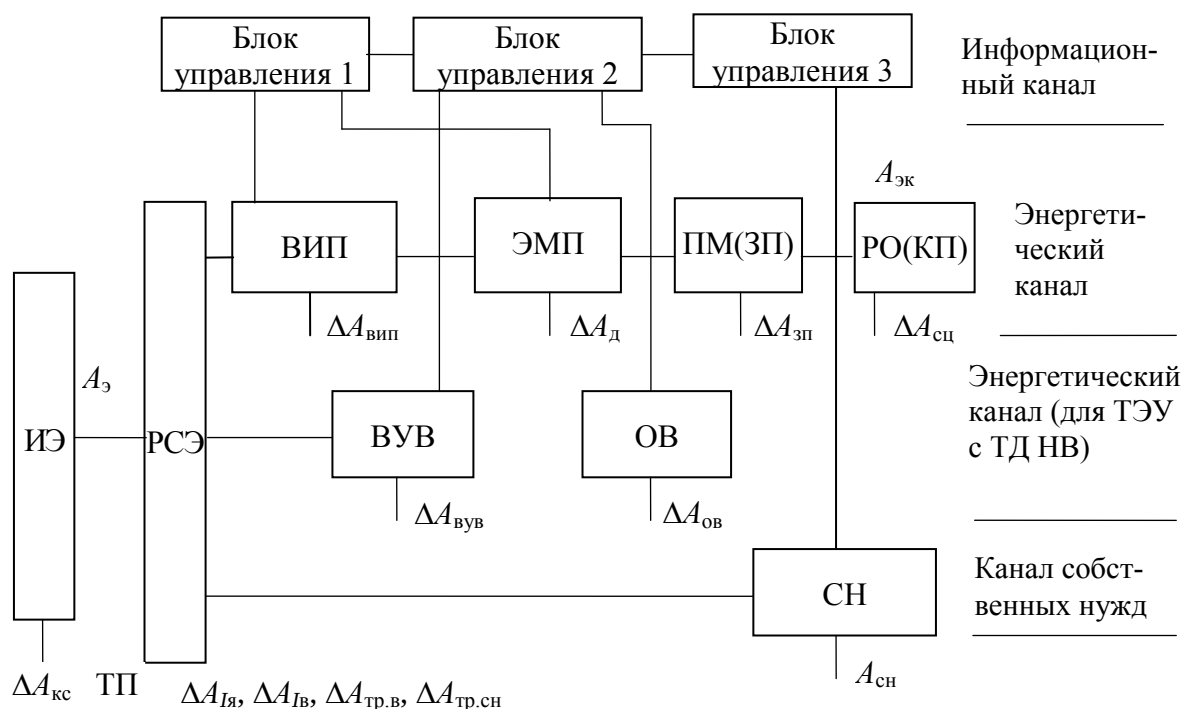


Рис. 1. Блок-схема преобразовательных элементов ТЭУ электровоза

Для ЭПС с ТД независимого возбуждения – три канала. Первый канал делится на два: канал с силовыми элементами, непосредственно участвующими в процессе преобразования энергии, и канал, содержащий силовые элементы, для питания обмоток возбуждения.

Информационная часть состоит из трех блоков. Первый блок имеет связь с силовыми элементами, второй – с элементами второго канала, а третий – со вспомогательными. Связи от информационного блока – управляющие, а от силовых элементов – сигналы обратных связей. Блоки информационной части взаимосвязаны.

Подвод электрической энергии от источника энергии (ИЭ) к каждому из каналов ТЭУ локомотива осуществляется от участка контактной сети через токоприемник (ТП) и распределительно-согласующий элемент (РСЭ) – тяговый трансформатор (ТТ). Для управления уровнями и направлениями потоков энергии к электромеханическим преобразователям (ЭМП) – тяговым двигателям, служит выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП). Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения определило наличие в силовом канале индуктивного элемента – сглаживающего реактора (СР).

Электрическая энергия преобразуется в механическую и задает с учетом параметров и нагрузок механической части характер движения рабочего органа (РО) колесной пары и переменные силу тяги на ободу движущего колеса и линейную скорость. Переменные, заданные ЭМП,

преобразуются к виду и параметрам, необходимым на РО, с помощью передаточного механизма (ПМ) – зубчатой передачи (ЗП), которая снижает частоту вращения на выходе ЭМП до уровня необходимого РО.

Энергия, потребляемая от РСЭ по цепи возбуждения, управляется выпрямительной установкой возбуждения (ВУВ), которая обеспечивает протекание заданного тока возбуждения I_v по последовательно соединенным обмоткам возбуждения ЭМП.

Процесс преобразования и передачи электрической энергии A , в механическую $A_{\text{эк}}$ сопровождается ее частичной потерей в каждом из элементов ТЭУ локомотива (см. рис. 1): в зубчатой передаче (с учетом трения в буксовых и моторно-осевых подшипниках) $\Delta A_{\text{з.п.}}$, в тяговом двигателе $\Delta A_{\text{д}}$, в сглаживающих реакторах $\Delta A_{\text{с.р.}}$, в вентилях выпрямительно-инверторного преобразователя $\Delta A_{\text{ви.п.}}$, в первичной и вторичной обмотках ТТ $\Delta A_{\text{тр.я.}}$. Линейное перемещение локомотива по рельсам сопровождается механическими потерями в месте контакта колес с рельсами $\Delta A_{\text{сц.}}$

Часть энергии в режимах тяги, выбега и торможения потребляется электрическими цепями управления и собственными нуждами электровоза $A_{\text{сн.}}$

Потери по каналу тока возбуждения состоят из потерь первичной и питающей обмоток ТТ $\Delta A_{\text{тр.в.}}$, потерь в управляемых вентилях ВУВ $\Delta A_{\text{вув}}$ и в обмотках возбуждения $\Delta A_{\text{ов.}}$

Для локомотива рассматривается два вида режимов работы: пусковое (тормозное) и регулирование вне пуска, которое называется ходовым. Ходовое регулирование относится к тяговым и тормозным процессам, не ограниченным по продолжительности. Пусковой режим и переход с одного уровня на другой кратковременны и при них возможны форсированные режимы. Поэтому входные, выходные и регулируемые параметры ТЭУ имеют ограничения.

Скорость движения определяется техническим состоянием пути и конструктивной скоростью подвижного состава. Сила тяги и торможения на ободе движущего колеса ограничивается силой сцепления $F_{\text{сц}}$ колеса с рельсом. Токи якорной цепи $I_{\text{я}}$, возбуждения I_v и напряжение на ТД $U_{\text{д}}$ ограничиваются допустимыми значениями по нагреву обмоток преобразовательных элементов и потенциальными условиями на коллекторе.

Протекание электромагнитных переходных процессов в ТЭУ быстро. Поэтому входные и выходные параметры математической

модели определяются по статическим характеристикам установившегося режима [1].

Затраты энергии на обеспечение работы вспомогательного оборудования $A_{\text{сн}}$, принимаются постоянными. Анализ этой составляющей представляет самостоятельную задачу.

Разработка математической модели основана на последовательном описании статических процессов преобразования энергии элементами ТЭУ.

При таком построении математической модели выполняется баланс мощностей по выходу предыдущего элемента и входу последующего $P_{\text{эки}} = P_{\text{эж}}$, как каждого отдельного элемента ТЭУ, так и системы в целом. С учетом потерь мощности ΔP в элементах ТЭУ баланс запишется $P_{\text{эkj}} = P_{\text{эки}} - \Delta P_{\text{эj}}$.

Выходная мощность элемента является полезной $P_{\text{эки}}$, а по входу последующего элемента эта $P_{\text{эки}}$ будет подведенной $P_{\text{эj}}$.

Описание математических зависимостей преобразования энергии в ТЭУ выполняется в обратном направлении, так как в качестве входных параметров принимаются сила тяги $F_{\text{к}}$ и скорость V .

Мощность сцепления колеса с рельсом $P_{\text{сц}}$ определяется полезной мощностью на ободе движущего колеса $P_{\text{эк}} = \alpha F_{\text{к}} V$ за исключением потерь на сцепление $\Delta P_{\text{сц}}$

$$P_{\text{сц}} = \alpha F_{\text{сц}} V = \alpha F_{\text{к}} V - \Delta P_{\text{сц}}.$$

Полезная мощность поступательного движения на ободе движущего колеса вычисляется по электромеханической мощности ТД за вычетом потерь в зубчатой передаче $\Delta P_{\text{зп}}$, механических $\Delta P_{\text{мех}}$, магнитных $\Delta P_{\text{маг}}$ и добавочных $\Delta P_{\text{доб}}$ в тяговых двигателях

$$P_{\text{эк}} = \alpha F_{\text{к}} V = n C_{\text{v}} V I_{\text{я}} - \Delta P_{\text{зп}} - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{маг}} - \Delta P_{\text{доб}}.$$

Электромеханическая мощность $P_{\text{эм}}$ ТД рассчитывается вычетом из электрической мощности n тяговых двигателей $P_{\text{д}} = n U_{\text{д}} I_{\text{я}}$, электрических потерь в якорной цепи ТД $\Delta P_{\text{Iя}}$, включая потери $\Delta P_{\text{мех}}$, $\Delta P_{\text{зп}}$, $\Delta P_{\text{маг}}$ и $\Delta P_{\text{доб}}$

$$P_{\text{эм}} = n C_{\text{v}} V I_{\text{я}} = n U_{\text{д}} I_{\text{я}} - \Delta P_{\text{д}}.$$

Подведенная мощность на токоприемнике электровоза определяется активной мощностью всех ТД и потерями мощности во всех элементах ТЭУ: в электрическом монтаже $\Delta P_{\text{эм}}$, в сглаживающих реакторах

$\Delta P_{\text{ср}}$, балластных резисторах $\Delta P_{\text{б.р.}}$, в выпрямительно-инверторных преобразователях $\Delta P_{\text{вип}}$, в ТТ $\Delta P_{\text{тр}}$ и затрат на собственные нужды $P_{\text{сн}}$

$$P_{\text{э}} = n(U_{\text{д}} I_{\text{я}}) + \Delta P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{ср}} + \Delta P_{\text{вип}} + \Delta P_{\text{тр}} + P_{\text{сн}}.$$

Мощность, затрачиваемая на поддержание магнитного потока $P_{\text{в}}$, определяется суммой потерь мощности в первичной и вторичной обмотках трансформатора $\Delta P_{\text{тр.в}}$, в вентильях ВУВ $\Delta P_{\text{вув}}$ и электрических потерь в обмотках возбуждения ТД $\Delta P_{\text{в}}$

$$P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{тр.в}} + \Delta P_{\text{вув}} + \Delta P_{\text{в}}.$$

Отличительной особенностью математических зависимостей, описывающих электромеханическое преобразование в ТЭУ для электровозов с ТД последовательного возбуждения, является отсутствие уравнения для определения потерь в цепи питания обмоток возбуждения, они учитываются в потерях для якорной цепи.

Таким образом, обобщенная математическая модель ТЭУ, учитывающая прямое преобразование энергии для электровозов с ТД последовательного и независимого возбуждения в режимах тяги, описывается системой уравнений:

$$P_{\text{сц}} = \alpha F_{\text{сц}} V$$

$$\alpha F_{\text{сц}} V = \alpha F_{\text{к}} V - \Delta P_{\text{сц}}$$

$$P_{\text{эк}} = \alpha F_{\text{к}} V = n C_{\text{в}} V I_{\text{я}} - (\Delta P_{\text{зп}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{доб}})$$

$$P_{\text{эм}} = n C_{\text{в}} V I_{\text{я}} = n U_{\text{д}} I_{\text{я}} - \Delta P_{\text{я}} + \mu \Delta P_{\text{в}}$$

$$P_{\text{э}} = n U_{\text{д}} I_{\text{я}} + (\Delta P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{ср}} + \Delta P_{\text{вип}} + \Delta P_{\text{тр}} + P_{\text{сн}} + P_{\text{в}}),$$

где $P_{\text{в}} = k(\Delta P_{\text{тр.в}} + \Delta P_{\text{вув}} + \Delta P_{\text{в}})$;

$$P_{\text{сн}} = P_{\text{сн.н}} + P_{\text{сн.в}} \mu;$$

α – коэффициент перевода единицы измерения механической и электрической энергий;

k, μ – коэффициенты равные 1 или 0 в зависимости от выбора, способа возбуждения ТД;

$C_{\text{в}}$ – постоянная ТД.

Оценка идентификации тягово-энергетических характеристик выполнена по критерию Стьюдента [2], позволила сделать вывод об адекватности, разработанной математической модели ТЭУ электровоза.

Для расчета тягово-энергетических показателей ЭПС переменного тока разработаны методика, алгоритм и программа [3].

Литература

1. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. М., 1974. 560 с.
2. Крыгин А.Н. Оценка достоверности математической модели функционирования тягово-энергетической установки электроподвижного состава // Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава: межвуз. темат. сб. науч.тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2003. С. 20-22.
3. Крыгин А.Н. Выбор оптимальных нагрузочных параметров регулирования мощности тягово-энергетической установки при решении тяговой задачи // Математическое моделирование и расчет узлов и устройств объектов железнодорожного транспорта: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС. 2004. С. 34-39.

644109, г. Омск, Сибирский проспект, д. 8/2, кв. 33, т. 31-18-66,
e-mail: krygin48@mail.ru

УДК 681.3.06

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН НА ОСНОВЕ РЕСУРСОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Д.Н. Куций

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассмотрена актуальность создания автоматизированной системы интегрированной оценки электронных образовательных ресурсов и приведена ее концептуальная модель с описанием основных модулей.

Неотъемлемой частью образовательного процесса является подбор учебной и методической литературы, необходимой для эффективного изучения преподаваемой дисциплины и качественной подготовки студентов. В силу современного развития IT-индустрии и активного использования информации в качестве общественного продукта весомым элементом в структуре методического обеспечения дисциплины являются ресурсы сети Интернет. Однако, данные образовательные материалы существенно отличаются как своим качеством, так и возможностью доступа к ним. Использование стандартных средств поиска, которые предоставляются известными поисковыми машинами, является затруднительным, так как их результаты не систематизированы.

Целью работы является создание специализированного математического и программного обеспечения, которое позволит по результатам

интегрированной экспертной оценки формировать список электронных образовательных ресурсов либо их печатных аналогов, рекомендуемых для обновления книжного фонда библиотеки.

Поскольку эффективное решение проблемы оценки образовательных материалов заключается в объединении реализации механизма сбора эвристических знаний экспертов, организации хранения и представления этих знаний и формировании на их основе интегрированной экспертной оценки средствами формальных математических методов, то в рамках реализации указанных подходов необходимо решать следующие задачи:

1. Формирование методики комплексной оценки мнения экспертов с использованием интегральных показателей, позволяющих создать единую информационно-аналитическую модель процесса поддержки принятия решений.

2. Разработка интеллектуальной системы как инструмента мониторинга, анализа и прогнозирования показателей в виде законченного программного продукта.

3. Выбор структуры и модели данных для хранения знаний о предметной области.

4. Определение методики формирования анкет, обработки и структуризации результатов анкетирования.

5. Разработка регламентных процедур, связанных с привлечением экспертов и использованием их знаний.

6. Разработка специализированной поисковой подсистемы формирования базы знаний предметной области.

В основу подсистемы для формирования интегрированной оценки мнения экспертов, встраиваемой в систему принятия решений, будет положен метод Дельфи комбинированный со статистической обработкой данных.

Реализация программного продукта в виде web-приложения позволит минимизировать временные затраты на коммуникацию с привлекаемыми экспертами, а также организовать эффективный механизм обратной связи метода. Кроме того будет обеспечена дополнительная анонимность при проведении опросов.

Общая структура программного продукта для поддержки процесса принятия решений на основе интегрированных экспертных оценок представлена на рис. 1, модульно-функциональная структура – на рис. 2.

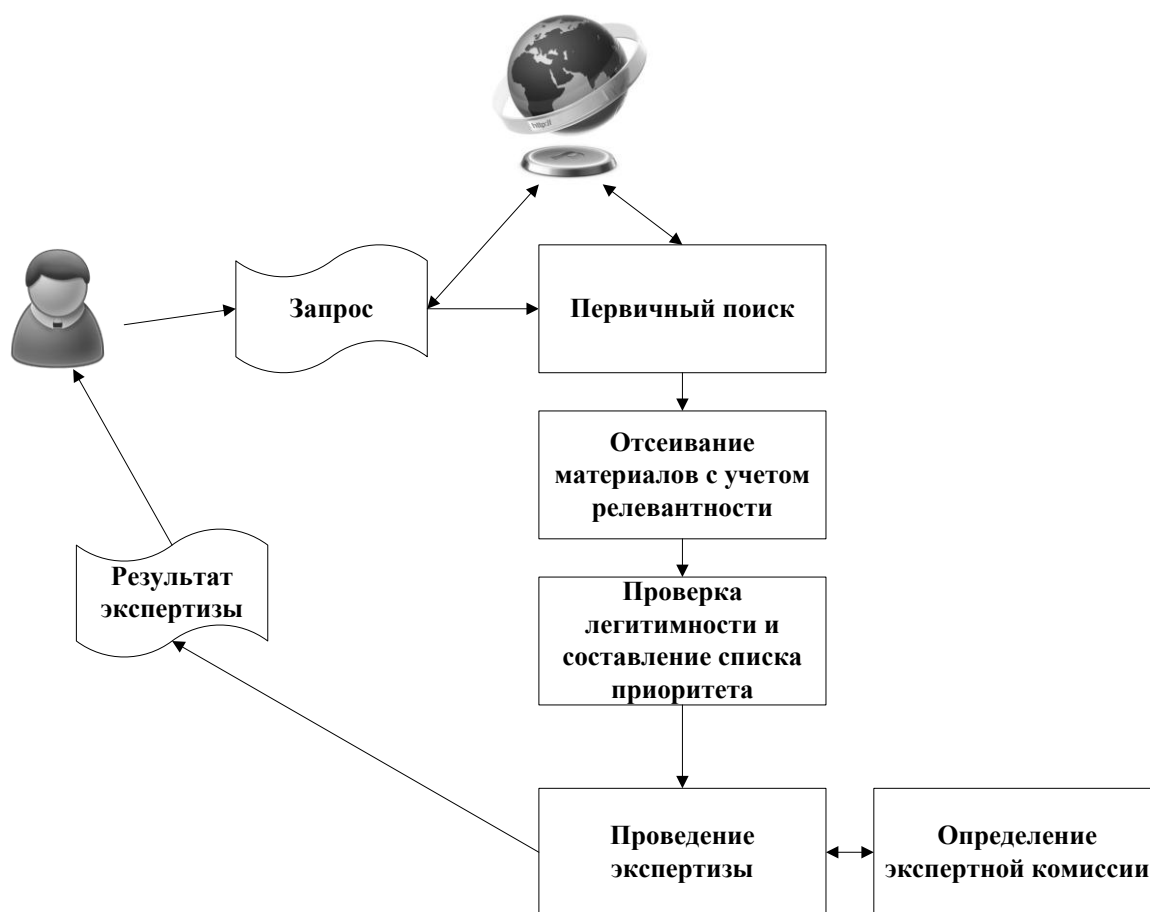


Рис. 1. Общая структура интеллектуальной информационной системы

Основные компоненты системы имеют следующее назначение:

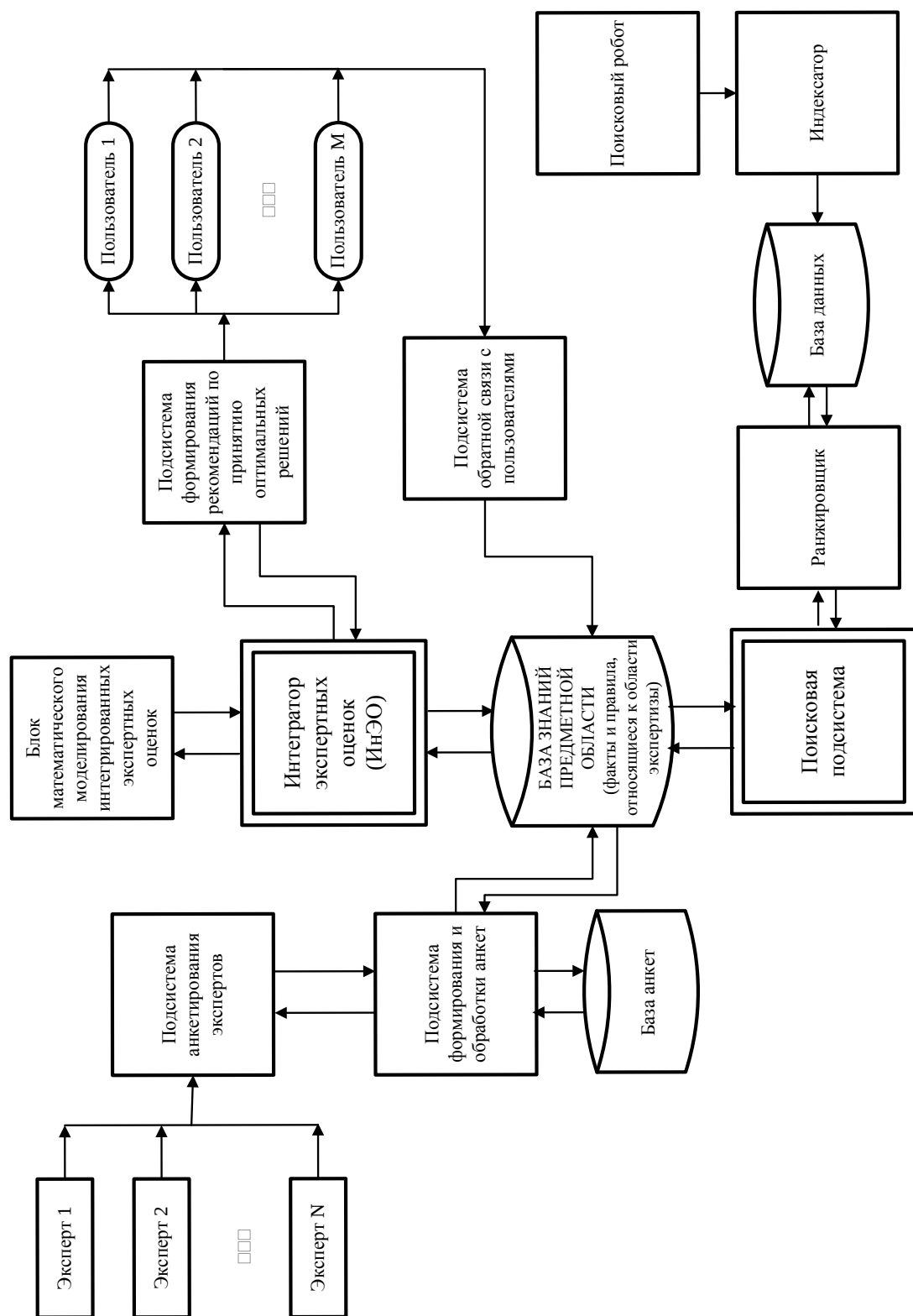
1. Интегратор экспертных оценок – ядро системы, обеспечивающее взаимодействие между базой знаний о предметной области и блоком математического моделирования для поддержки необходимых пользователю решений.

2. Блок математического моделирования интегрированных экспертных оценок реализует процедуру метода Дельфи.

3. Подсистема анкетирования экспертов организует работу с удаленными пользователями-экспертами и реализует интерфейс анкетирования.

4. Подсистема формирования и обработки анкет обеспечивает систематизацию первичной информации на основе статистического и анализа и преобразование данных в формализованные формы с последующим формированием базы знаний предметной области на основе базы анкет.

5. Подсистема обратной связи с пользователями реализует интерфейс взаимодействия конкретных пользователей с базой знаний системы.



6. Подсистема формирования рекомендаций по принятию оптимальных решений выполняет интерпретацию результатов обработки пользовательских запросов.

7. Поисковая подсистема формирования базы знаний предметной области.

Поисковая подсистема имеет конвейерный тип работы. Каждый этап выполняется независимо от остальных, каждый последующий использует уже готовые результаты работы предыдущего. Исключение составляет лишь связка модуля ранжирования с интерфейсом запросов, которые взаимодействуют друг с другом.

Литература

1. Ахо А.В., Хопкрофт Дж., Ульман Джеффри Д. Структуры данных и алгоритмы. М.: Вильямс, 2000. 384 с.
2. Маннинг К.Д., Рагхаван Прабхакар, Шютце Х. Введение в информационный поиск. М.: Вильямс, 2011. 528 с.
3. Мартемьянов Ю.Ф., Лазарева Т.Я. Экспертные методы принятия решений. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. 80 с.
4. Мыльник В.В., Титаренко Б.П., Волочиенко В.А. Исследование систем управления. М: Академический Проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2003. 352 с.
5. Старых В.А., Башмаков А.И., Павлов М.Н., Высоков А.С. Электронные образовательные ресурсы для высшего профессионального образования – технологические требования // XVII Всероссийская научно-методическая конференция. URL: <http://tm.ifmo.ru/tm2010/src/176c.pdf> (дата обращения: 21.09.2012).
6. Развитие электронных образовательных Интернет-ресурсов. URL: http://www.openclass.ru/dig_resources (дата обращения: 12.09.2012).

УДК 519.816

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ И ВЫБОРЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АСУТП В НЕЧЕТКОЙ СРЕДЕ

Е.В. Лубенцова, Г.В. Масютина

Невинномысский технологический институт (филиал)
Северо-Кавказского федерального университета

Рассмотрена разработанная методика оценки и выбора технических средств, структур и алгоритмов (законов регулирования) систем управления в условиях неполной, неточной и нечеткой информации. Методика апробирована на ПЭВМ при решении ряда задач оценки и выбора микропроцессорных средств автоматизации, алгоритмов управления нечетких и нейросетевых регуляторов.

В условиях неопределенности задача оценки и выбора решений сведена к задаче многокритериального сравнения и выбора технических средств, структур и алгоритмов управления систем на основе анализа содержательной (качественной и количественной) информации о перечне ранжируемых критериев и шкал. Практически всегда при проектировании нельзя описать строгое предпочтение выбора какого-то из вариантов САУ, так как этот выбор зависит от очень большого числа трудно учитываемых и плохо формализуемых факторов. Но в противоположность этому можно формализовать нестрогие предпочтения, используя шкалу оценки интенсивности относительной важности. В основу методики положены систематизация критериев и системных требований к САУ по различным группам и метод анализа иерархий. Этот метод основан на парных сравнениях альтернативных вариантов по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям. Группы содержат критерии, наиболее близкие к требуемым и характеризующие наперед заданные свойства выбранных структур САУ. Формально существующая схема методики иерархического решения многокритериальной задачи заключается в следующем.

Пусть рассматривается некоторая САУ, для которой необходимо выбрать структуру (под структурой можно понимать и алгоритм управления, закон регулирования), причем рациональным образом в смысле экспертных оценок значимости свойств системы (ее критериев). Свойства системы S образуют вектор $s = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, каждая компонента которого представляет одну из характеристик системы, входящих в данный вариант выбираемой системы. Каждая компонента вектора S характеризуется либо четкой, либо нечеткой информацией по шкале оценки интенсивности относительной важности критериев в интервале $[0,9]$. Из данного интервала формально описывают экспертную оценку (оценки) значимости (предпочтения) использования i -ой характеристики (свойства) в варианте S . Далее было бы логично использовать метод анализа иерархии (МАИ). Однако, большое количество требуемой экспертной информации, представляющей собой оценки предпочтительности, полученные в процессе парного сравнения альтернатив и критериев, и, как следствие, громоздкость и непрозрачность алгоритма иерархического синтеза, обуславливают необходимость модификации методики решения поставленной задачи на основе МАИ. Суть ее состоит в следующем.

Качество принятия решения в многокритериальных задачах (точность и скорость) зависит от выбора критериев и ограничений, а также от организации процесса принятия решения. Критерии оптимизации и ограничения формулируются на основе анализа свойств системы управления с учетом конкретных требований. Следует иметь в виду, что количество альтернативных вариантов очень быстро растет с увеличением числа элементов каждого уровня иерархической сети. Анализ большого количества альтернативных вариантов является одной из наиболее сложных проблем решения задачи выбора. Чтобы иметь высокую достоверность результата решения такой задачи, необходимо учесть множество факторов, так или иначе влияющих на формирование приоритета, прежде всего с точки зрения свойств, характеризующих функциональные качества работы системы управления. Но поскольку в этом перечне немало факторов качественных, напрямую количественно не описываемых, то следует говорить о необходимости принятия решения в нечеткой среде. В качестве пути разрешения проблемы предлагается многоэтапная методика решения задачи. Для этого вектор приоритетов рассчитывается дважды: на первом этапе – для выбора предпочтительной группы критериев, а затем, на втором этапе – для оценки приоритетов каждого критерия из выбранных групп и глобального вектора приоритетов, количественно характеризующих сравниваемые варианты и определяющих наилучший вариант системы как вариант с максимальным значением глобального вектора приоритетов.

Нечеткость условий выбора вариантов обуславливает необходимость дополнить методику использованием аппарата нечетких множеств. Для этого, сформировав матрицы парных сравнений – альтернатив по каждой компоненте критерия, при общем количестве матриц, совпадающем с количеством компонентов критерия, определяется ранг исхода – альтернативы. Значения компонент критерия на универсальном множестве исходов представимы в виде нечетких множеств:

$$e_s = \{\mu_{es}(A_1)/A_1; \mu_{es}(A_2)/A_2; \dots; \mu_{es}(A_m)/A_m\},$$

где $\mu_{es}(A_i)$ ($i = 1, \dots, m$) – степень принадлежности элемента A_i нечеткому множеству e_s ($s = 1, \dots, l \in S$).

При этом нечеткое решение получается как пересечение нечетких множеств всех компонент критерия, по которому делается вывод о выборе лучшего варианта технического решения, структуры, алгоритма управления. Чем больше число $\mu_{es}(A_i)$, тем выше оценка исхода $A_i \in A$ по компоненте e_s соответствующего критерия.

Применение методики, учитывающей нечеткость суждений, позволяет повысить качественный признак оценивания и выбора лучших вариантов. Достоверность ее подтверждена результатами решения на ПЭВМ многокритериальных задач выбора архитектуры нейронных сетей, структуры многоконтурных САУ биотехнологическими объектами с модифицированными нелинейными, нечеткими и нейросетевыми регуляторами. Благодаря возможности ранжирования вариантов решений, методика позволяет проводить многовариантный синтез САУ, а также решать задачи выявления тенденций развития различных систем управления.

УДК 629.7.023.4

МЕТОД РАСЧЕТА ОБЪЕМНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.И. Ляшенко, В.М. Абашев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Предложен метод, позволяющий рассчитывать объемную статическую прочность сложных оболочечных конструкций, состоящих из оболочек различных геометрических форм. В расчетах используются САЕ-системы для расчета на прочность.

К сложным оболочечным конструкциям можно отнести корпус, показанный на рис. 1.

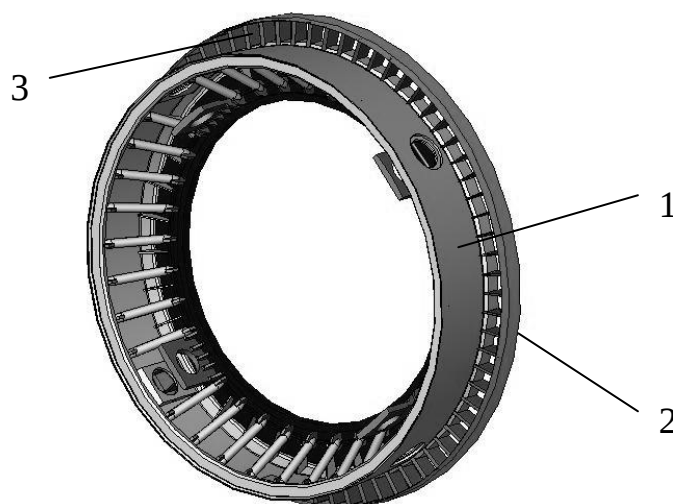


Рис. 1. Геометрическая модель корпуса:
1 – основание, 2 – кольцо 3 – направляющие ребра

Сложность конструкции определяют оболочечные элементы различных геометрических форм и сложные системы нагружения, содержащие комплексы растягивающих и сжимающих сил, изгибающих и крутящих моментов. Предварительные исследования показывают, что при проведении упругих и упруго-пластических расчетов напряженно-деформированного состояния, оптимизации массы при упругом и упруго-пластическом поведении конструкционных материалов сложной конструкции с применением систем типа NASTRAN [1], ANSYS [2], COSMOS [3] часто процесс оптимизации расходится, заполняется практически вся оперативная память компьютера, время расчета исчисляется десятками часов, происходят сбои компьютера, точность результатов не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Поэтому требуется создать новый метод расчета подобных сложных конструкций.

Предлагаемый метод основан на декомпозиции конструкции, проведении последовательной оптимизации и анализе расчетных и экспериментальных исследований.

Декомпозиция конструкции заключается в выделении и дальнейшем исследовании отдельных элементов конструкции (деталей и сборочных единиц) на основе упругого расчета напряженно-деформированного состояния всей конструкции. Критерием декомпозиции является влияние элемента конструкции на напряженно-деформированное состояние всей конструкции. Определяются наиболее опасный и другие элементы конструкции, оказывающие определяющее влияние на прочность всей конструкции.

Последовательная оптимизация выполняется в следующей последовательности: оптимизируется опасный элемент, у которого граничными условиями являются перемещения, полученные при расчете всей конструкции; оптимизируется вся конструкция, в состав которой входит оптимальный опасный элемент; выбирается следующий элемент конструкции, оказывающий значительное влияние на прочность всей конструкции; выполняется оптимизация конструкции с этим оптимальным элементом и т.д. Процесс последовательной оптимизации заканчивается после исследования всех выбранных элементов конструкции.

Расчеты проводятся с использованием оптимизационных подсистем, находящихся в составе CAE-систем типа NASTRAN, ANSYS, COSMOS. В данном исследовании использовалась система COSMOS.

Анализ расчетных и экспериментальных данных позволяет провести оценку расчетных исследований.

На рис. 2 показана блок-схема метода расчета объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций.

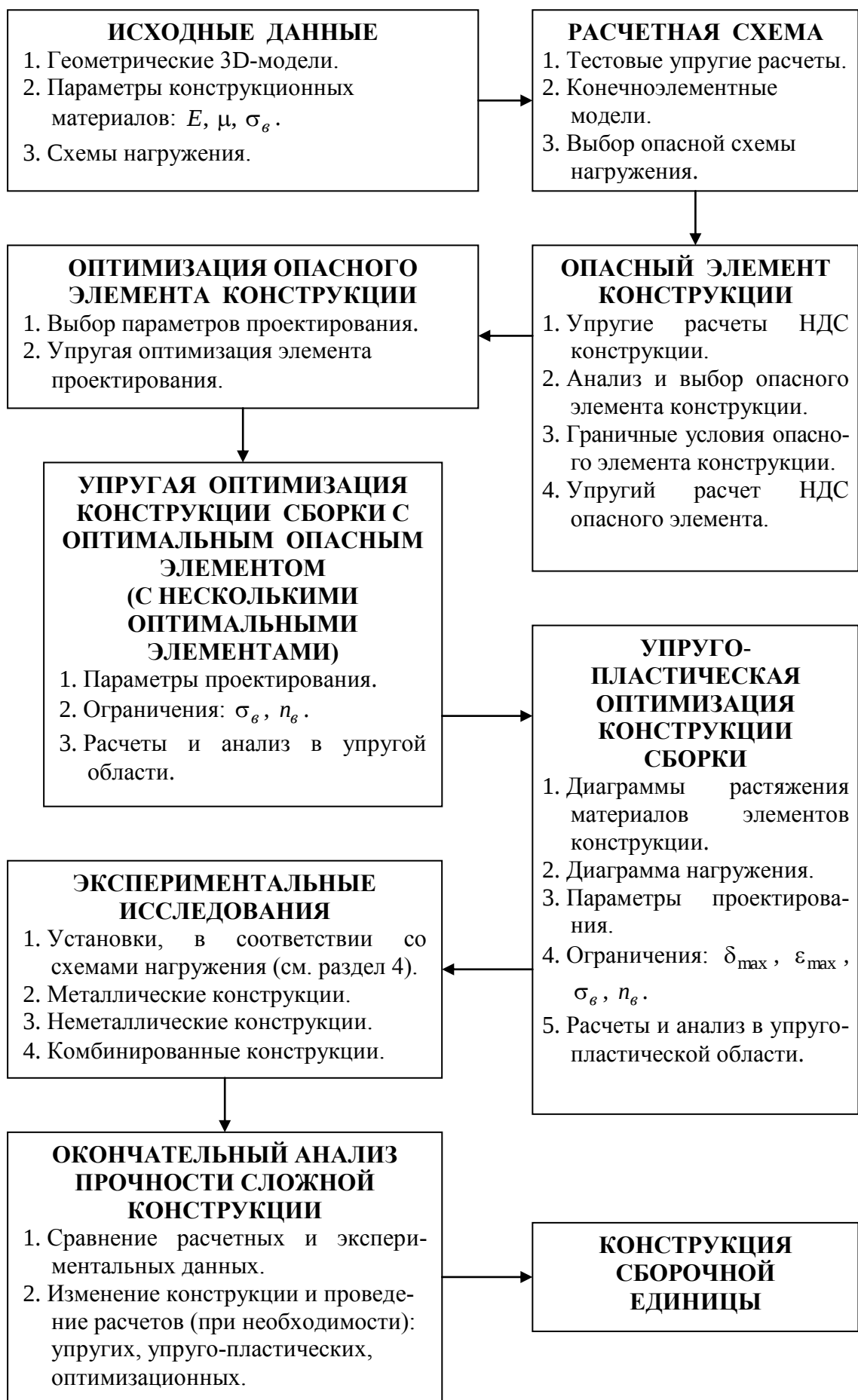


Рис. 2. Блок-схема метода расчета объемной статической прочности однослойных оболочечных конструкций

Методика расчета последовательной оптимизации элементов конструкции состоит в следующем:

- проводится расчет напряженно-деформированного состояния сборочной единицы. Определяются наиболее опасный элемент конструкции и другие элементы конструкции, оказывающие наибольшее влияние на напряженное состояние сборочной единицы;
- определяются переменные проектирования и компоненты перемещений в местах соединения опасного элемента со сборкой, которые служат граничными условиями;
- проводится оптимизация опасного элемента конструкции с учетом выбранных переменных проектирования и граничных условий по перемещениям;
- рассчитывается напряженно-деформированное состояние сборочной единицы, в состав которой входит оптимальный опасный элемент конструкции;
- при необходимости, осуществляются следующие итерации - оптимизация других элементов конструкции, оказывающих наибольшее влияние на напряженное состояние сборочной единицы, с последующим расчетом напряженно-деформированного состояния сборочной единицы, в состав которой входит оптимальный элемент конструкции;
- экспериментальные исследования расчетной оптимальной конструкции и других неоптимизированных конструкций;
- анализ результатов оптимизационных расчетов и экспериментальных испытаний.

Такая методика позволяет спроектировать и испытать конструкцию, имеющую локальный минимум массы, находящийся около глобального минимума. Исследования показывают, что с увеличением количества итераций происходит приближение локального минимума к глобальному.

Проведен расчет и экспериментальные исследования корпуса, показанного на рис. 1.

Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Удалось снизить массу конструкции корпуса на 11,6 %. При этом в месте соединения стержней с оболочкой присутствуют упруго-пластические деформации, а остальные части конструкции находятся в области упругих деформаций.

Наибольшие напряжения в местах соединения стержней с оболочкой составляют величину $\sigma = 9,152 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$. При решении упругой задачи соответствующие напряжения $\sigma = 11,64 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2$, т.е. удалось снизить напряжения на 21,4 %.

Заключение. Разработанный метод, использующий компьютерные САЕ-системы, показал свою эффективность при расчете статической прочности и оптимизации сложных конструкций.

Литература

1. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows. М.: ДМК Пресс, 2004. 704 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
3. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, т. 8-499-158-4441,
e-mail: ipk_avm@mai.ru

УДК 621.317.42:550.385.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ТОЧКИ НАБЛЮДЕНИЯ

Н.Р. Маркарян

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассмотрен метод выделения периодической составляющей напряженности геомагнитного поля (ГМП). Описан метод сезонной декомпозиции для выделения солнечно-суточных вариаций из ряда значений вектора напряженности ГМП.

Проблема изучения электромагнитных полей и их влияния на биологические объекты, в частности на человека, выходит на принципиально новый уровень, являясь одним из самых перспективных направлений развития современной науки. Одной из новых областей солнечно-земной и геомагнитной физики является изучение специфики возмущения магнитного поля Земли, так называемых магнитных бурь, и исследование их влияния на здоровье и психическое состояние людей. Прежде всего происходит обострение сердечно-сосудистых и других хронических

заболеваний, от которых страдает человек. Отмечено, что в дни сильных магнитных бурь увеличивается количество самоубийств, внезапных смертей [1].

Существует множество устройств и приборов для индикации геомагнитных возмущений, а также способов прогнозирования геомагнитных бурь, но достоверность известных способов прогнозирования магнитных бурь составляет около 20 %, а приборы для индикации магнитных бурь являются стационарными или труднопереносимыми и оперируют с одной или двумя составляющими геомагнитного поля [2].

Значения элементов земного магнетизма непрерывно меняются с течением времени, поэтому в случае, когда добиваются портативности и мобильности прибора, объемный характер магнитных возмущений требует трехмерного измерения магнитных составляющих, так как положение прибора во время измерения в пространстве будет иметь произвольный характер.

Для разработки портативного (мобильного) устройства прогнозирования, ориентационное положение в пространстве, а также географическое положение на Земном шаре которого не влияет на результаты измерений, необходимо исследовать значения полного вектора магнитного поля Земли, взятые в разных точках поверхности Земли.

В качестве исходных данных использовались данные обсерваторий: в ААЕ (1,2; 110,7 «ADDIS ABAB»), АИА (50,4; 9,4 «ARGENTINE»), СВВ (77,0; 310,1 «CAMBRIDGE»), ОНВ (31,6; 213,3 «ONAGAWA»), СПА (-74,2; 19,5 «SOUTH POLE»), ПАФ (-58,6; 122,3 «PORT AUX F»). Здесь в скобках указаны географические координаты обсерваторий в формате (φ; λ «название обсерватории»).

На первом этапе из временного ряда значений вектора напряженности геомагнитного поля была исключена постоянная составляющая для каждого месяца за 1995-2008 гг. Тем самым был получен временной ряд значений, представляющий собой переменную составляющую геомагнитного поля.

Далее, используя метод сезонной декомпозиции с периодом 24 часа, были получены ряды солнечно-суточной составляющей вектора напряженности геомагнитного поля для всех обсерваторий, некоторые из которых представлены на рисунке 1.

Из рисунка видно, что солнечно-суточные вариации вектора напряженности ГМП имеют похожий характер на близко расположенных по широте обсерваториях, имея некоторый сдвиг по фазе из-за различия долготы.

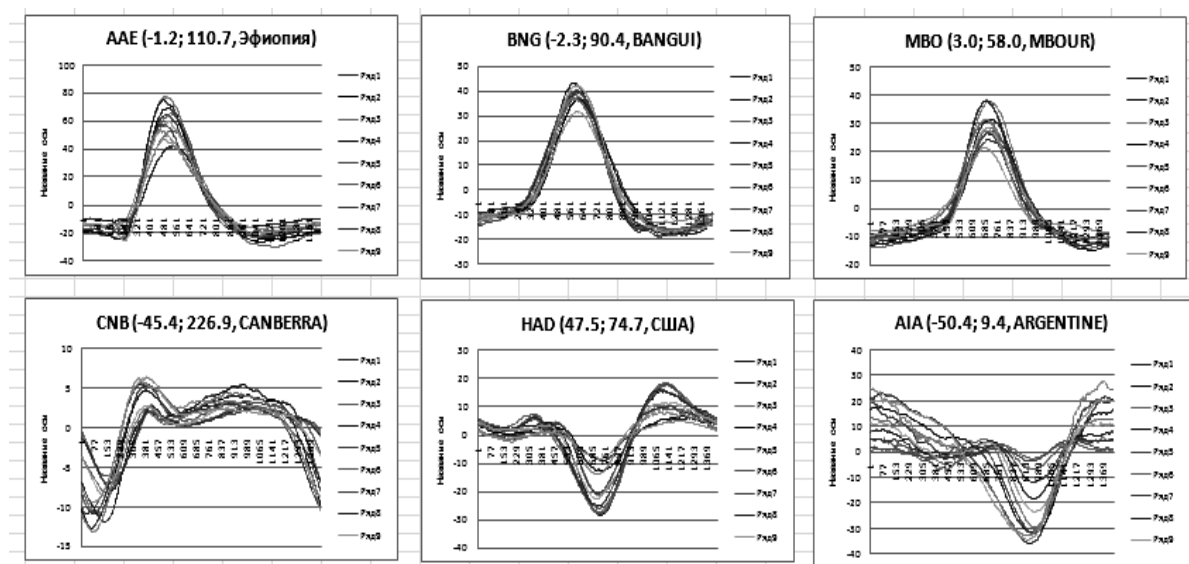


Рис. 1. Солнечно-суточные составляющие шести обсерваторий

Математическая модель вектора напряженности геомагнитного поля, учитывающая влияние географических координат точки наблюдения, позволит оптимизировать портативные устройства индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений.

Литература

1. Почтарев В.И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984. 232 с.
2. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

346428, г. Новочеркасск, ул. Энгельса, 85а, к. 207/2, т. 89508652815,
e-mail: nikal-markaryan@mail.ru

УДК 519.68

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

О.Г. Москалёва, Л.А. Белякова, А.А. Фёдоров, В.А. Немых

Московский технологический институт "ВТУ", филиал в г. Оренбурге

Показаны результаты анализа устойчивости и оценка качества модели линейной системы управления с помощью программного комплекса «МВТУ». Модель линейной системы управления задается структурной схемой и передаточными функциями отдельных функциональных элементов.

Моделирование – исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания явлений, интересующих исследователя [1].

Программный комплекс “Моделирование в технических устройствах” (“МВТУ”) – современная среда интеллектуального САПР, предназначенная для детального исследования и анализа нестационарных процессов в системах автоматического управления, в ядерных и тепловых энергоустановках, в следящих приводах и роботах, в любых технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования. Является альтернативой программным продуктам SIMULINK, VisSim, MATRIXx и др. [2].

Принцип моделирования в ПК “МВТУ” состоит в создании и исследовании виртуального аналога реальной системы – модели. Модель функционирует в соответствии с теми же уравнениями, что и моделируемая система. При моделировании не обязательно записывать эти уравнения в явном виде, об этом позаботится программа. Модель составляется пользователем в специальном окне программы соединением отдельных виртуальных блоков, соответствующих элементам реальной системы.

Программный комплекс «МВТУ» реализует следующие режимы работы:

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ. Обеспечивающий:

- моделирование процессов в непрерывных, дискретных и гибридных динамических системах, в том числе и при наличии обмена данными с внешними программами и устройствами;
- редактирование параметров модели в режиме «on-line»;
- расчет в реальном времени или в режиме масштабирования модельного времени;
- рестарт, архивацию и воспроизведение результатов моделирования;
- статистическую обработку сигналов, основанную на быстром преобразовании Фурье.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ. Позволяющий решать задачи:

- минимизации (максимизации) заданных показателей качества;
- нахождения оптимальных параметров проектируемой системы в многокритериальной постановке при наличии ограничений на показатели качества и оптимизируемые параметры.

3. АНАЛИЗ. Обеспечивающий:

- расчет и построение частотных характеристик и годографов;
- расчет передаточных функций, их полюсов и нулей;
- реализацию метода D-разбиения на плоскости одного комплексного параметра.

4. СИНТЕЗ. Позволяющий конструировать регуляторы:

- по заданным желаемым частотным характеристикам;
- по заданному расположению доминирующих полюсов.

5. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ. Позволяющий создавать виртуальные аналоги:

- пультов управления с измерительными приборами и управляющими устройствами;
- мнемосхем с мультимедийными и анимационными эффектами.

Системы управления называют линейными, если выполняются принцип суперпозиции. Если этот принцип несправедлив, то систему называют нелинейной [3, 4].

Целью нашего исследования является анализ устойчивости и оценка качества модели линейной системы управления. Модель линейной системы управления задается структурной схемой и передаточными функциями отдельных функциональных элементов.

Линейная система управления включает в себя следующие функциональные элементы: объект управления ОУ, датчик Д, задающее устройство ЗУ, сравнивающий элемент СЭ, усилитель У, исполнительное устройство ИУ. Система работает по принципу управления по отклонению. Структурная схема представлена на рис. 1. Исходные данные представлены в таблице.

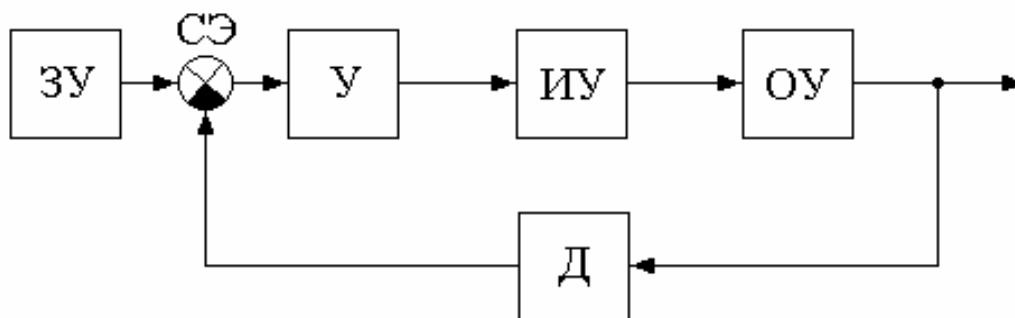


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Таблица

Исходные данные

K_D	K_{OU}	K_{IU}	K_U	T_1, c	T_2, c	T_3, c	T_4, c
0,17	0,58	0,51	10	0,66	0,1	0,73	0,07

Элементы системы имеют следующие передаточные функции:

- передаточная функция усилителя: $W_U(S) = K_U$;
- передаточная функция исполнительного устройства:

$$W_{ИУ}(S) = \frac{K_{ИУ}}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)};$$

– передаточная функция объекта управления:

$$W_{ОУ}(S) = \frac{K_{ОУ}}{T_3 T_4 S^2 + T_3 S + 1} = \frac{K_{ОУ}}{T^2 S^2 + 2TdS + 1},$$

где $T = \sqrt{T_3 T_4} = \sqrt{0.72 * 0.05} = 0.190$ с, а $d = \frac{\sqrt{T_3}}{2\sqrt{T_4}} = \frac{\sqrt{0.72}}{2\sqrt{0.05}} = 1.9$;

– передаточная функция датчика: $W_Д(S) = K_Д$.

Вводим структурную схему и исходные данные с помощью программного комплекса «МВТУ» (рис. 2).

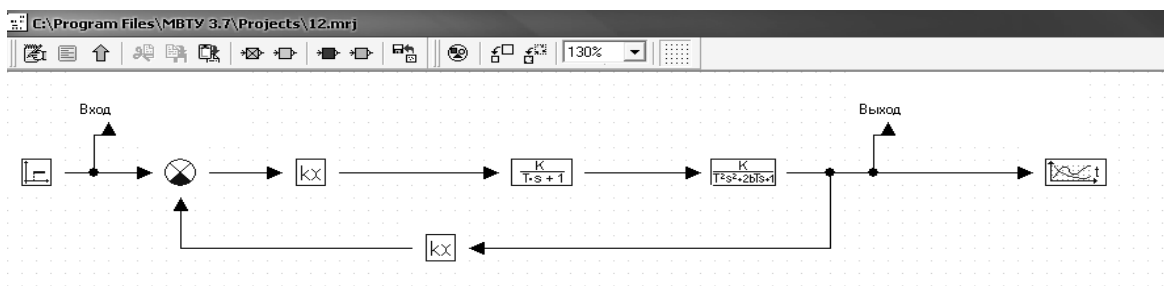


Рис. 2. Ввод структурной схемы и исходных данных

На основании функциональной схемы проведем моделирование и построим переходную функцию (рис. 3).

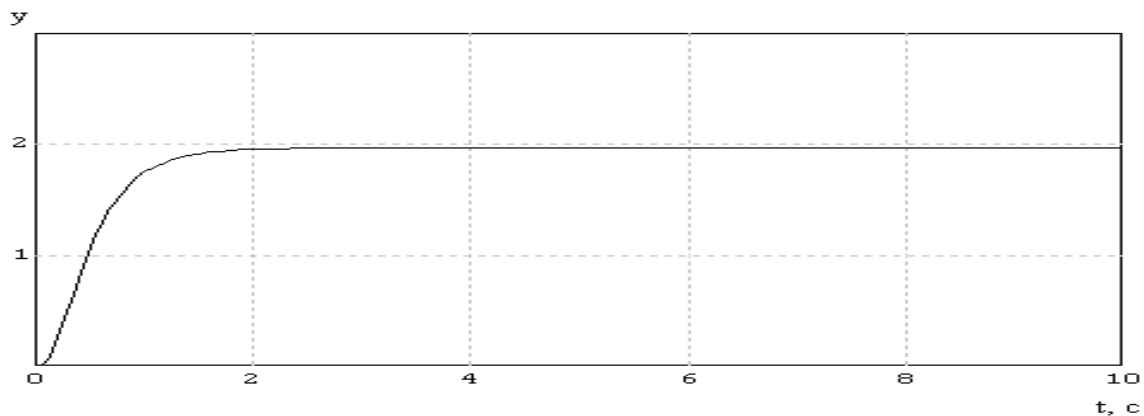


Рис. 3. Переходная характеристика

Данная система является восходящей и устойчивой.

Оценим показатели качества:

– Время регулирования – 4,89 сек.

– Относительное перерегулирование –

$$((h_{\max} - h_{\text{уст}}) / h_{\text{уст}}) * 100\% = 0\%.$$

Оценим запасы устойчивости оптимизированной СУ с помощью логарифмического частотного критерия. Построим логарифмические характеристики СУ (рис. 4):

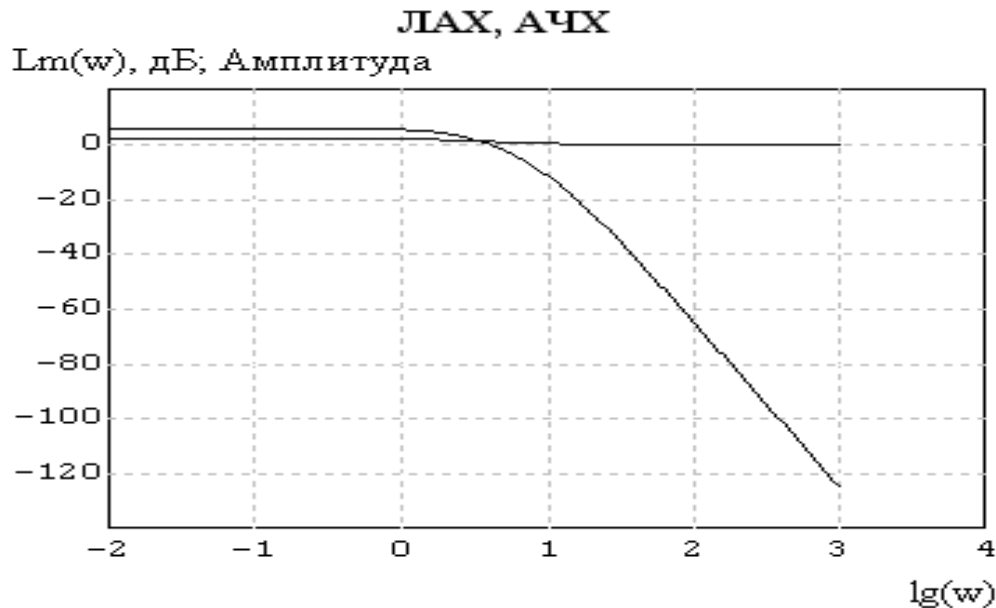


Рис. 4. Частотный анализ

Амплитудная частотная характеристика – это коэффициент усиления гармонического сигнала. Очевидно, что если на какой-то частоте ω значение $A(\omega) > 1$, входной сигнал усиливается, если $A(\omega) < 1$, то вход данной частоты ослабляется. Данная СУ будет устойчива в замкнутом состоянии. Запас устойчивости по амплитуде стремится к бесконечности.

Оценим запасы устойчивости СУ по частотному критерию Найквиста. Для этого построим годограф Найквиста разомкнутой СУ.

Для каждой частоты ω значение $W(j\omega)$ – это точка на комплексной плоскости. При изменении ω от 0 до ∞ получается кривая, которая называется годографом Найквиста (диаграммой Найквиста).

Асимптотическая ЛАЧХ этого звена образована двумя прямыми, которые пересекаются на сопрягающей частоте с $T\omega = 1$. На низких частотах она имеет нулевой наклон (так как звено позиционное), причем в этой области $L_k m \approx 20 \lg$.

На высоких частотах наклон ЛАЧХ равен -20 дБ/дек, так как степень знаменателя передаточной функции на единицу больше степени ее числителя. Фазовая характеристика меняется от 0 до -90° , причем на сопрягающей частоте с ω она равна -47° .

Из критерия Найквиста известно, что САР, находящаяся на апериодической границе устойчивости в разомкнутом состоянии, станет

устойчивой при ее замыкании единичной Главной обратной связью, если годограф АФЧХ не охватывает на комплексной плоскости "точку Найквиста" $(-1, 0(i))$.

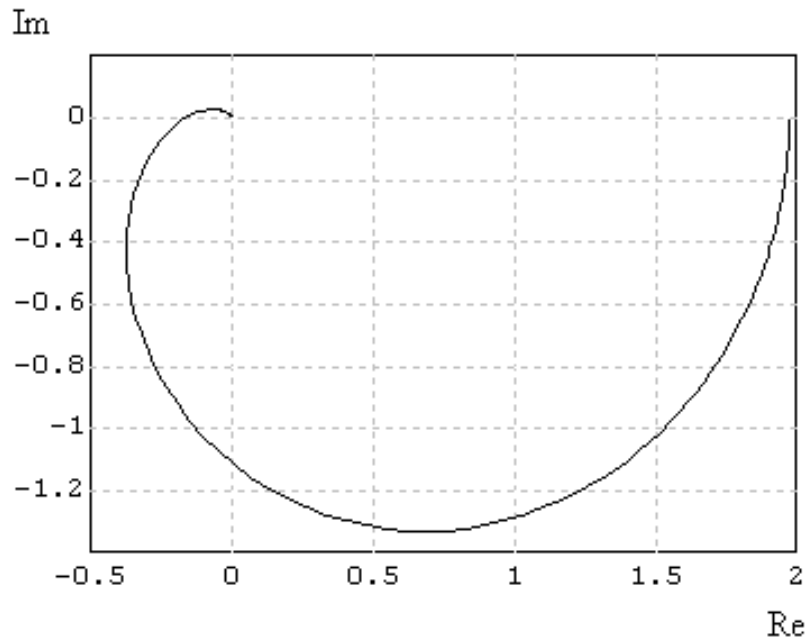


Рис. 5. Годограф Найквиста

Выполнив параметрическую оптимизацию в соответствии с ограничениями на качество процесса управления, добились требуемых запасов устойчивости СУ.

Очевидно, годограф не охватывает точку $(-1; 0j)$, поэтому СУ в замкнутом состоянии будет устойчивой.

Литература

1. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. 574 с.
2. Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Л.М., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В. Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ») [Электронный ресурс]. // Сайт о моделировании систем и явлений. URL: [www.http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html](http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html)
3. Яковенко П.Г. Моделирование систем. Лабораторный практикум. [Электронный ресурс]. // Единое окно доступа к образовательным ресурсам: [сайт]. [2009]. URL: [www.http://window.edu.ru/library/pdf2txt/880/73880/52951/page7](http://window.edu.ru/library/pdf2txt/880/73880/52951/page7)
4. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следящие системы) [Электронный ресурс] // Научная библиотека избранных естественно-научных изданий научная-библиотека.рф: [сайт]. [2001]. URL: http://www.sernam.ru/tau_12.php.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, 75, т. (3532)30-61-34,
e-mail: mos_oq25@mail.ru, belikova8989@bk.ru,
tima60587@mail.ru, nemih89@mail.ru

АНАЛИЗ МЕТОДА УСКОРЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*К.У. Нгуен, К.Ю. Соломенцев, О.А. Новоселова, А.Б. Рассохина,
А.Ю. Овсянников, Р.Е. Харченко*

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассмотрены вопросы измерения сопротивления изоляции при наличии большого тока абсорбции, проанализированы погрешности, возникающие при экстраполяции кривой тока абсорбции.

Для измерения сопротивления изоляции сетей, изолированных от земли, существует ряд методов [1, 2]. При этом, как правило, к сети прикладывают постоянное измерительное напряжение. Реальные объекты имеют неидеальную изоляцию, в которой возникают токи абсорбции. При этом измерительный ток, протекающий в цепи, довольно долго приходит к своему установившемуся значению. При постоянном измерительном напряжении изменение тока абсорбции во времени подчиняется гиперболическому закону (1).

$$i(t) = i_{\text{уст}} + \frac{k}{t - a}. \quad (1)$$

Задача предлагаемого метода заключаем в том, чтобы как можно быстрее определить установившееся значение тока $i_{\text{уст}}$, не дожидаясь окончания переходного процесса. Пусть измерения произведены в моменты времени t_1, t_2, t_3 , причём $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, и получены соответствующие значения тока i_1, i_2, i_3 . Тогда:

$$i_{\text{уст}} = \frac{2 \cdot i_1 \cdot i_3 - i_1 \cdot i_2 - i_2 \cdot i_3}{i_1 - 2 \cdot i_2 + i_3}. \quad (2)$$

При использовании формулы (2) возникает методическая погрешность. Необходимо выяснить влияние выбора интервала времени Δt , первого момента времени t_1 и погрешности измеряемого тока на погрешность вычисления результатов. Так как $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \Delta t$, будем рассматривать только влияние величин Δt и t_1 на погрешность, которая возникает при использовании формулы (2), учитывая наличие погрешности исходных данных $\Delta i_1 = \Delta i_2 = \Delta i_3 = \Delta i$. Определим абсолютную погрешность $\Delta i_{\text{уст}}$ величины $i_{\text{уст}}$ по методике, приведенной в [3]:

$$\Delta i_{уст} = \sqrt{\left(\frac{(t_1 - a)^4 + 4(t_2 - a)^4 + (t_3 - a)^4}{4\Delta t^4}\right)\Delta i^2},$$

$$\Delta i_{уст} = \frac{\Delta i}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{t_1 - a}{\Delta t}\right)^4 + 4\left(\frac{t_1 - a}{\Delta t} + 1\right)^4 + \left(\frac{t_1 - a}{\Delta t} + 2\right)^4} \quad (3)$$

Из (3) следует, что погрешность $\Delta i_{уст}$ обратно пропорциональна интервалу времени Δt и прямо пропорциональна значению t_1 .

Эксперименты показали, что наиболее целесообразно первое измерение делать через 3 с после начала переходного процесса, то есть $t_1 = 3$ с, а интервал времени Δt делать равным 2 с, при этом методическая погрешность не превышает 10 %.

Литература

1. А.с. 1737363 СССР, МКИ G01R 27/18. Способ измерения сопротивления изоляции электрических сетей / Лачин В.И., Иванов Е.А., Малина А.К., Холодков В.П., Соломенцев К.Ю. и др. Оpubл. 1992; Бюл. № 20.
2. Пат. 60225 РФ, МПК G01R 27/16. Устройство для измерения сопротивления изоляции электрических сетей / Лачин В.И., Кильдияров А.В., Соломенцев К.Ю., Иванов Е.А. Оpubл. 10.01.07; Бюл. № 1.
3. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. М.: Логос, 2001. 408 с.

УДК 519.816

МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.Н. Панфилов, А.С. Погорелов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Целью работы является разработка модели задачи принятия решений на основе нечетких аналогов критериев. Для достижения поставленной цели используются методы теории нечетких множеств. Представленный в работе вычислительный эксперимент показывает состоятельность методов принятия решений, основанных на теории нечетких множеств. Дальнейшим развитием идей, изложенных в данной работе, является совершенствование предложенного подхода.

Проблема принятия решений или проблема выбора альтернатив – это, возможно, самый распространенный класс задач, возникающих при управлении сложными объектами [1]. При этом часто задача управления характеризуется некоторой степенью неопределенности, которая может проявляться при задании исходных данных, при описании параметров

внешней среды и т.д. В этом случае следует рассматривать задачу принятия слабоструктурированных решений.

Пусть модель задачи принятия решений характеризуется следующим кортежем:

$$\langle D, S, F, \alpha \rangle \quad (1)$$

где $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – множество взаимоисключающих решений, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ – множество состояний объекта управления, $F = \{f_{ij}\}$ – оценочный функционал, позволяющий качественно оценить эффективность процесса управления для каждой пары $\langle d_i, s_j \rangle \in D \times S$. При этом значение f_{ij} отражает эффективность процесса управления в случае принятия решения d_i при условии, что объект перейдет в состояние s_j .

Оценочный функционал F описывается лингвистической переменной α , которая, как показано в [2], может быть представлена в следующем виде:

$$\alpha = \langle N, X, T \rangle, \quad (2)$$

где N – наименование лингвистической переменной, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – универсальное множество, на котором определены термы лингвистической переменной, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$ – терм-множество, элементами которого являются нечеткие переменные с функцией принадлежности $\mu_{t_i}(x), i = \overline{1..s}, x \in X$.

Пусть заданы функции принадлежности $\mu_{t_i}(x)$, а также вектор $\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ распределения вероятностей на множестве состояний S . Тогда решим задачу (1), применив нечеткий аналог критерия Байеса, известного критерия принятия решений в статической ситуации.

Как показано в [3], нечеткий аналог критерия Байеса может быть представлен в виде:

$$B(\bar{p}, d_{opt}) = \max_{d_i \in D} B(\bar{p}, d_i),$$

где $B(\bar{p}, d_i)$ – оценка альтернативы d_i , вычисляемая по формуле:

$$B(\bar{p}, d_i) = \sum_{j=1}^m p_j \cdot a(d_i, s_j), \quad (3)$$

где $a(d_i, s_j)$ – четкое число, полученное в результате процедуры дефаззификации нечеткого множества терма, характеризующего показатель эффективности f_{ij} , и вычисляемое по формуле:

$$a(d_i, s_j) = \frac{\sum_{x \in X} \mu_{t_i}(x) \cdot x}{\sum_{x \in X} \mu_{t_i}(x)}, \quad (4)$$

где $l = \overline{1..s}$ – номер элемента из терм-множества, характеризующего показатель эффективности f_{ij} .

Рассмотрим задачу по наблюдению заданных районов Земли при проведении эксперимента в течение нескольких витков. Пусть имеется задача, связанная с наблюдением районов Земли (район d_1, d_2, d_3), при этом на каждом витке возможно изменение погодных условий. От этого будут зависеть длительность наблюдения и результаты эксперимента.

Возможны следующие погодные условия: s_1 – ясная погода; s_2 – малооблачная погода; s_3 – сильная облачность; s_4 – сплошная облачность. Необходимо выбрать район наблюдения с учетом погодных условий и ожидаемых результатов от наблюдения.

Пусть для оценки эффективности альтернатив используется лингвистическая переменная «Время наблюдения», заданная в виде (2) на универсальном множестве $X = \{2, 6, 10, 14, 18, 22, 26, 30\}$, характеризующим время наблюдения. $T = \{t_1, t_2, t_3\}$ – терм-множество лингвистической переменной, где

t_1 – нечеткая переменная «Большое время наблюдения», характеризующаяся функцией принадлежности:

$$\mu_{t_1}(x) = \left\{ 0/2, 0,1/6, 0,3/10, 0,4/14, 0,5/18, 0,7/22, 0,9/26, 1/30 \right\};$$

t_2 – нечеткая переменная «Среднее время наблюдения», характеризующаяся функцией принадлежности:

$$\mu_{t_2}(x) = \left\{ 0,1/2, 0,4/6, 0,7/10, 1/14, 0,9/18, 0,5/22, 0,2/26, 0/30 \right\};$$

t_3 – нечеткая переменная «Малое время наблюдения», характеризующаяся функцией принадлежности:

$$\mu_{t_3}(x) = \left\{ 1/2, 0,9/6, 0,7/10, 0,5/14, 0,4/18, 0,3/22, 0,1/26, 0/30 \right\}.$$

Проведем вычислительный эксперимент и определим оптимальное решение по критерию Байеса, если оценочный функционал F задан таблицей следующего вида.

Таблица

Матрица оценочного функционала

Альтернативы	s_1 – ясная погода	s_2 – малооблачная погода	s_3 – сильная облачность	s_4 – сплошная облачность
Район d_1	t_1	t_2	t_2	t_3
Район d_2	t_2	t_2	t_3	t_3
Район d_3	t_1	t_1	t_2	t_2
Вероятности состояний	0,4	0,3	0,1	0,2

Выполнив дефаззификацию нечетких множеств по формуле (4), получим:

$$a(t_1) = \frac{0 \cdot 2 + 0,1 \cdot 6 + 0,3 \cdot 10 + 0,4 \cdot 14 + 0,5 \cdot 18 + 0,7 \cdot 22 + 0,9 \cdot 26 + 1 \cdot 30}{0 + 0,1 + 0,3 + 0,4 + 0,5 + 0,7 + 0,9 + 1} = 22,3;$$

$$a(t_2) = \frac{0,1 \cdot 2 + 0,4 \cdot 6 + 0,7 \cdot 10 + 1 \cdot 14 + 0,9 \cdot 18 + 0,5 \cdot 22 + 0,2 \cdot 26 + 0 \cdot 30}{0,1 + 0,4 + 0,7 + 1 + 0,9 + 0,5 + 0,2 + 0} = 15,2;$$

$$a(t_3) = \frac{1 \cdot 2 + 0,9 \cdot 6 + 0,7 \cdot 10 + 0,5 \cdot 14 + 0,4 \cdot 18 + 0,3 \cdot 22 + 0,1 \cdot 26 + 0 \cdot 30}{1 + 0,9 + 0,7 + 0,5 + 0,4 + 0,3 + 0,1 + 0} = 9,7.$$

Тогда значение критерия Байеса по формуле (3) для района d_1 равно:

$$B(\bar{p}, d_1) = 0,4 \cdot 22,3 + 0,3 \cdot 15,2 + 0,1 \cdot 15,2 + 0,2 \cdot 9,7 = 16,94.$$

Значение критерия Байеса по формуле (3) для района d_2 равно:

$$B(\bar{p}, d_2) = 0,4 \cdot 15,2 + 0,3 \cdot 15,2 + 0,1 \cdot 9,7 + 0,2 \cdot 9,7 = 13,55.$$

Значение критерия Байеса по формуле (3) для района d_3 равно:

$$B(\bar{p}, d_3) = 0,4 \cdot 22,3 + 0,3 \cdot 22,3 + 0,1 \cdot 15,2 + 0,2 \cdot 15,2 = 20,17.$$

Из представленных расчетов можно сделать вывод, что по критерию Байеса оптимальным решением является наблюдение района d_3 .

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы 7.12.

Литература

1. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 208 с.
2. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2000. 352 с.
3. Бекмуратов Т.Ф. Модели нечетких критериев и алгоритм принятия слабоструктурированных решений // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. № 7.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 255-4-33,

e-mail: pogorelov-alserg@yandex.ru, panfiloff@rambler.ru

УДК 620.179.16

ИЗМЕРИТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА ЖИДКИХ СРЕД ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

М.Л. Логанчук, К.Д. Саввина

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Целью разработки является создание современного, недорогого прибора для контроля физико-химических параметров жидких сред, работа которого основывается на измерении и анализе акустического импеданса контролируемой среды.

Прибор предназначен для использования в технологических процессах производства, биофизике, медицине, и т.д., что обусловлено зависимостью акустического импеданса исследуемых сред от таких параметров как: концентрация растворов и взвесей, степень полимеризации, плотность, вязкость, упругость, прочность, сжимаемость, толщина, распределение неоднородностей, и т.п.

Основой разработки послужили работы д-ра физ.-мат наук П.О. Липовко [1], [2] и созданные им приборы МАРИ-4 (одноканальный, одночастотный (4,5 МГц) импедансометр для исследования жидких сред) и МАРИ-5 (двухканальный, широкополосный (1-10 МГц) рефлектметр-импедансометр для жидких, твердых, эластомерных, консистентных сред). Оба эти прибора являются аналогово-цифровыми, имеют разные схемно-конструктивные решения и метрологические особенности, основная их погрешность при измерении импеданса менее 1,0 %.

Задачей настоящей разработки является достижение следующих метрологических и технических характеристик прибора: погрешность измерения акустического импеданса не более 0,1 %; диапазон измерений – 1 МПа*с/м – 3,15 МПа*с/м; количество отдельно настраиваемых диапазонов контроля – 30; индикация результатов измерения и контроля в дискретном и цифробуквенном виде; возможность подключения к ПК через интерфейсы USB2.0, RS485; документирование результатов измерения и контроля с привязкой к реальному времени; питание – батарея (или от адаптера от однофазной сети 220 В).

Фотография макетного образца измерителя импеданса и его функциональная схема представлены на рис. 1.

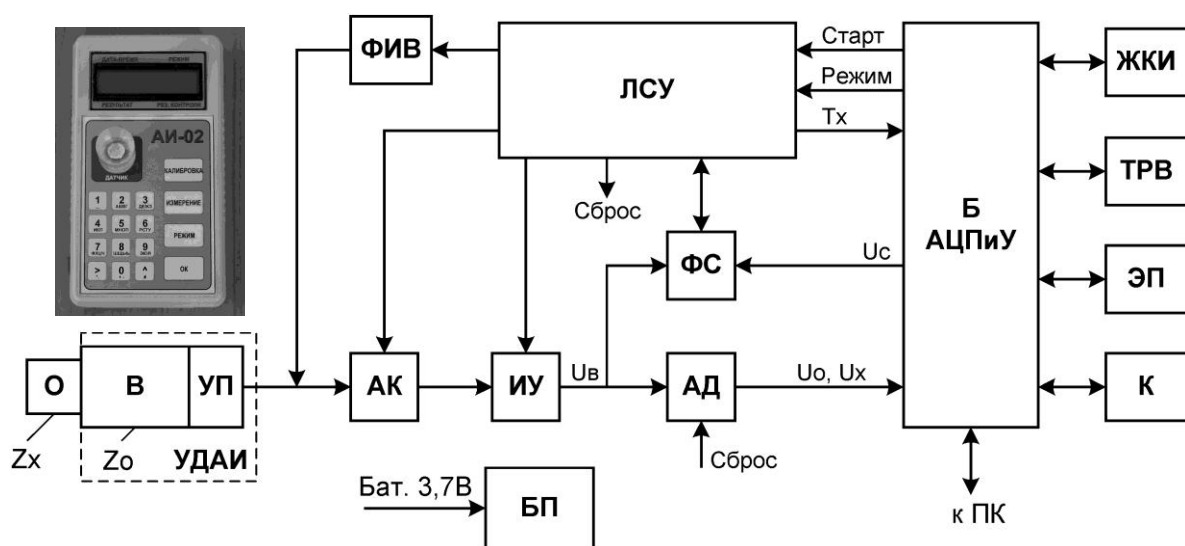


Рис. 1. Внешний вид измерителя импеданса АИ-02 и его функциональная схема

В основу работы прибора положена известная формула Френеля, связывающая коэффициент отражения (R) и акустические импедансы измеряемой (z_x) и образцовой среды (z_0):

$$R = \frac{z_x - z_0}{z_x + z_0}.$$

Учитывая, что $R = A_{\text{отр}}/A_{\text{пад}}$, где $A_{\text{отр}}$ и $A_{\text{пад}}$ – амплитуды отраженной от нагрузки и падающей на нагрузку волн давления. Априорно зная величину z_0 , возможно вычисление z_x при методической замене $A_{\text{отр}}$, $A_{\text{пад}}$ на эквивалентные выходные напряжения ультразвукового датчика акустического импеданса УДАИ U_x , U_0 .

На схеме использованы следующие обозначения: волновод – В; ультразвуковой преобразователь – УП; формирователь импульсов возбуждения – ФИВ; логическая схема управления – ЛСУ; аналоговый коммутатор – АК; измерительный усилитель – ИУ; амплитудный детектор – АД; фазовый селектор – ФС; блок аналого-цифрового преобразования и управления – БАЦПиУ; жидкокристаллический индикатор – ЖКИ; таймер реального времени – ТРВ; энергонезависимая память – ЭП; клавиатура – К; блок питания – БП. Акустической нагрузкой с измеряемым z_x служит образец О.

К особенностям реализации данной схемы возможно отнести: ЛСУ реализована на программируемой логической матрице EPM3064 фирмы Altera; УП служит как излучателем, так и приемником отраженной акустической волны на частоте 4,5 МГц; БАЦПиУ реализован на процессоре ADUC847; АК и ИУ реализованы на интегральных сверхбыстродействующих компонентах фирмы Analog Devices.

Предлагаемая структура и особенности её реализации обеспечивают высокие метрологические параметры, конкурентоспособность и невысокую себестоимость прибора.

Управление работой прибора может осуществляться как с клавиатуры самого прибора, так и с компьютера, к которому прибор может подключаться через соответствующий интерфейс. Обобщенная структурная схема алгоритма основной программы, управляющей работой прибора, приведена на рис. 2.

Программа обеспечивает контроль за действиями оператора в процессе калибровки и измерения. После выполнения процедуры инициализации и вывода на экран справочной информации (наименование прибора, версия программы и т.п.) запускается процесс определения смещения

измерительных каналов с целью последующего уточнения результатов измерений.

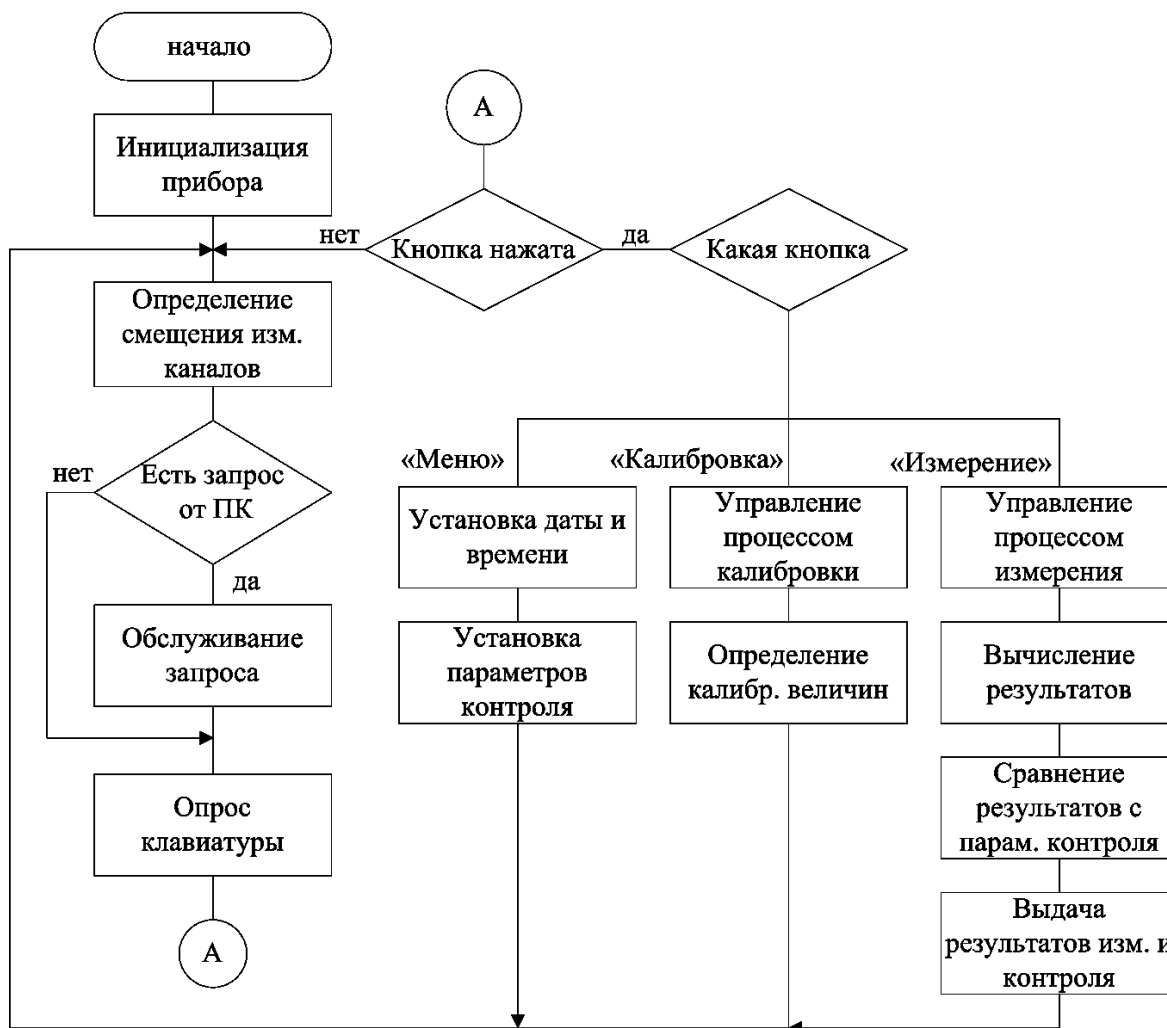


Рис. 2. Структурная схема алгоритма основной программы измерителя импеданса

Дальнейшая работа программы заключается в циклическом опросе клавиатуры прибора и отслеживании запросов, поступающих от компьютера. В зависимости от поступивших запросов (или нажатых кнопок) выполняются соответствующие функции настройки, калибровки, измерения и контроля.

При разработке использовалась интегрированная среда Keil uVision.

Литература

1. Пат. РФ № 2362128 Способ измерения акустического сопротивления однородных сред и устройство для его осуществления / П.О. Липовко. Опубл. 20.07.2009.
2. Пат. РФ №2400744 Ультразвуковой контрольно-измерительный преобразователь / П.О. Липовко. Опубл. 27.09.2010.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н.С. Савёлов, А.В. Кочнев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Предложен новый способ реализации модификации метода исключения Гаусса с использованием оптимизированного способа хранения матриц. Приводятся результаты численных экспериментов с применением различных процессоров.

Применение новой модификации метода исключения Гаусса в качестве основного алгоритма преобразования матриц систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в задачах анализа электронных схем обеспечивает во многих случаях существенное сокращение вычислительных затрат и предоставляет новые возможности по исследованию схем [1-4].

В настоящей работе излагаются новые результаты исследований, направленных на повышение эффективности указанной модификации, которые обеспечивают сокращение вычислительных затрат при анализе электронных схем.

Обратимся к задаче решения СЛАУ вида

$$A \cdot x = b, \quad (1)$$

где A – квадратная вещественная матрица порядка n , $\det A \neq 0$; b – вещественный столбец.

Для анализа электронных схем характерно, что не требуется вычислять значения всех неизвестных [3]. Поэтому элементы столбца x разделены на искомые, подлежащие определению, и неискомые. При использовании модификации преобразуется дополнительная квадратная матрица F . Используются обозначения: a_i – i -ый столбец A ; f_i – i -ая строка F ; F^m , f_i^m – соответственно F и f_i после m -го преобразования, $m = \overline{0, n}$; E – единичная матрица порядка n .

Для сокращения вычислительных затрат и объема памяти предлагается использовать приведенные ниже видоизмененные выражения и хранить элементы матрицы F на месте не требующихся в дальнейшем элементов матрицы A (подобно тому, как при использовании алгоритма Краута элементы матриц L и U могут храниться на месте элементов матрицы A).

При анализе электронных схем после первоначального решения СЛАУ часто необходимо выполнять повторные решения, соответствующие изменениям матрицы A вследствие изменений параметров элементов [3].

Вначале обратимся к задаче первоначального решения системы (1). Используем следующие выражения:

$$F^0 = E;$$

$$f^{m+1}_i = f^m_i$$

для $i < m+1$ (при $m = \overline{1, n-1}$) и одновременно при условии, что x_i – иско-
мое;

$$f^{m+1}_{m+1} = (1/(f^m_{m+1} \cdot a_{m+1})) \cdot f^m_{m+1}$$

для $m = \overline{0, n-1}$, причем предполагается, что $f^m_{m+1} \cdot a_{m+1} \neq 0$ (иначе дос-
таточно выполнить перестановку двух строк матрицы F^m);

$$f^{m+1}_i = f^m_i - (f^m_i \cdot a_{m+1}) \cdot f^{m+1}_{m+1}$$

для остальных i ;

$$x_i = f^n_i \cdot b$$

для каждого искомого x_i .

Приведенные выражения часто более удобны при программирова-
нии в сравнении с ранее использовавшимися, хотя сущность модифика-
ции при этом сохраняется.

Называем обработкой столбца a_i совокупность описанных операций
по изменению матрицы F при обращении к столбцу a_i . Пусть x_i – иско-
мое неизвестное. Называем образующей строкой для столбца a_i строку f^n_i . Можно заметить, что $f^n_i \cdot a_i = 1$, $f^n_i \cdot a_j = 0$ для $j \neq i$, $i, j = \overline{1, n}$. Далее
верхний индекс в обозначении f^n_i для упрощения записей опускается.

Опишем способ хранения элементов матрицы F в предположении,
что перестановка ее строк не производится. Пусть выполняется обработ-
ка 1-го столбца матрицы A . Покажем структуру матрицы F^1 для $n = 4$:

$$\begin{bmatrix} * & 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & 0 & 0 \\ * & 0 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Знаком «*» обозначены элементы, которые могут быть ненулевыми.
Первый столбец матрицы F^1 записывается (и после изменений остается)
на месте 1-го столбца матрицы A , так как столбец a_1 в дальнейшем не
используется. Аналогично хранятся остальные столбцы матрицы F^m
(единичные элементы матрицы F^m , как наперед известные, не хранятся).

Пусть для невырожденной матрицы A сформирована матрица F , после чего столбец a_i , соответствующий искомому неизвестному x_i , заменен на столбец a'_i . В результате матрица A преобразуется в матрицу A' . Эффективность модификации при повторных решениях обусловлена тем, что искомые неизвестные можно определить из следующих, требующих малого количества арифметических операций, выражений, в которых x_j – другое, по отношению к x_i , искомое неизвестное:

$$\begin{aligned} f'_i &= (1/(f_i \cdot a'_i)) \cdot f_i, \\ x'_i &= f'_i \cdot b = (1/(f_i \cdot a'_i)) \cdot x_i, \\ f'_j &= f_j - (f_j \cdot a'_i) \cdot f'_i, \\ x'_j &= f'_j \cdot b = x_j - (f_j \cdot a'_i) \cdot x'_i. \end{aligned}$$

Модификация особенно эффективна, когда число искомых неизвестных невелико по сравнению с общим числом неизвестных.

Были проведены многочисленные эксперименты по применению приведенных выше выражений и описанного способа хранения матриц, показавшие их высокую эффективность. Для примера приведем результаты первоначального решения СЛАУ разработанными на языке C++ программами с использованием процессоров *Intel Atom* с тактовой частотой 1,67 ГГц, *Intel Pentium Dual Core* (1,86 ГГц) и *Intel Pentium Dual Core* (3,0 ГГц) (см. табл.). Используем следующие обозначения: n – число неизвестных (как и ранее); p – число искомых неизвестных, t_1, t_2 – время решения СЛАУ при использовании соответственно первоначального и предложенного способа реализации модификации метода исключения Гаусса; $\Delta t = t_1 - t_2$, $\delta t \% = (\Delta t / t_2) \cdot 100 \%$.

Таблица

Результаты экспериментов

$p = n = 1000$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$\delta t \%$
<i>Intel Atom Core</i> (1,86 ГГц)	146,146	108,597	37,549	34,577
<i>Intel Pentium Dual</i>	76,230	66,448	9,782	14,722
<i>Intel Pentium Dual Core</i> (3,0 ГГц)	33,878	27,763	6,115	22,027

Проведенные эксперименты показали, что описанные выражения и способ хранения дают заметный выигрыш по времени и приближающийся к двукратному выигрыш по памяти.

Литература

1. Савёлов Н.С. Формирование уравнений состояния при изменениях в электрических цепях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1987. № 12. С. 13-18.

2. Савёлов Н.С., Кочубей П.М. Ускоренный анализ электрических цепей при использовании многоядерных вычислительных систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 5. С. 3-6.
3. Савёлов Н.С., Лыонг С.Т. Метод ускоренного расчета частотных характеристик // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: тр. 53-й науч. конф. МФТИ. М., 2010. Т. III: Управление и прикладная математика. С. 51-52.
4. Савёлов Н.С., Ревин М.С. Программная реализация метода ускоренного анализа электронных цепей // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: материалы 50-й науч. конф. МФТИ. М., Долгопрудный, 2007. Т. II., ч. VII: Управление и прикладная математика. С. 137-138.

346407, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Крылова, 2а, кв. 35,
т. 8 928 160 52 94, e-mail: savelovn@mail.ru

346717, Ростовская область, Аксайский район, п. Октябрьский, ул. Южная, 25,
кв. 1, т. 8 989 715 70 48, e-mail: avkochnev@yandex.ru

УДК 621.311:681.3

НОВЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Н.С. Савёлов, С.Г. Хлынцев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Предлагается метод параметрического синтеза электронных схем, позволяющий предельно эффективно вычислять значения параметров элементов, обеспечивающих требуемые токи или напряжения схемы.

Параметрический синтез электронных схем может быть существенно упрощён при использовании в качестве алгоритмической основы модификации метода исключения Гаусса для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), предложенной для анализа устройств электроники [1-5].

Обратимся к задаче определения такого параметра элемента линейной электронной схемы (например, сопротивления резистора), который обеспечивает заданный ток этого элемента (задача обеспечения заданного напряжения решается совершенно аналогично). Ограничения на число узлов и ветвей схемы не накладываются.

Для определённости рассмотрим режим постоянного тока.

Предлагаемый метод базируется на использовании указанной выше новой модификации метода исключения Гаусса. Дадим её краткое описание.

Пусть необходимо решить СЛАУ вида

$$A \cdot x = b, \quad (1)$$

где A – квадратная вещественная матрица порядка n , $\det A \neq 0$; b – вещественный столбец.

Неизвестные, входящие в столбец x , разделены на искомые, подлежащие определению, и неискомые. Для решения СЛАУ выполняется преобразование дополнительной матрицы F порядка n .

Сделаем обозначения: a_i – i -ый столбец матрицы A ; f_i – i -ая строка матрицы F ; F^m , f_i^m – соответственно F и f_i после m -го преобразования, $m = \overline{0, n}$; E – единичная матрица порядка n .

Для первоначального решения СЛАУ используем выражения:

$$F^0 = E;$$

$$f^{m+1}_i = f^m_i$$

для $i = m + 1$ (при $m = \overline{0, n-1}$), а также для $i < m + 1$ (при $m = \overline{1, n-1}$) и одновременно при условии, что x_i – неискомое;

$$f^{m+1}_i = f^m_i - (f^m_i \cdot a_{m+1} / f^m_{m+1} \cdot a_{m+1}) \cdot f^m_{m+1} \quad (2)$$

для остальных i , причем предполагается, что $f^m_{m+1} \cdot a_{m+1} \neq 0$ (иначе следует выполнить перестановку двух строк матрицы F^m);

$$x_i = (f^n_i \cdot b) / (f^n_i \cdot a_i)$$

для каждого искомого x_i .

Используем следующие термины: обработка столбца a_i – совокупность описанных операций по преобразованию матрицы F при обращении к a_i ; ведущая строка матрицы F для столбца a_i – строка матрицы F , используемая для изменения других строк матрицы F при обращении к a_i ; образующая строка для a_i – строка $f_{io} = (1 / (f^n_i \cdot a_i)) f^n_i$, где f^n_i – ведущая для a_i , причем x_i – искомое неизвестное. Очевидно, что $f_{io} \cdot a_i = 1$. Из (2) также следует, что $f_{jo} \cdot a_i = 0$ при $j \neq i$, $i, j = \overline{0, n}$.

Обратимся к характерной для анализа электронных схем задаче повторного решения СЛАУ после изменения некоторого столбца матрицы A .

Пусть для матрицы A ($\det A \neq 0$) получена матрица F , и затем столбец a_i , соответствующий искомому неизвестному x_i , заменён на столбец a'_i , в результате чего A преобразована в A' . Пусть f_{io} – образующая для a_i . При этом $f_{io} \cdot a'_i = 0$ тогда и только тогда, когда $\det A' = 0$ [1].

Пусть, кроме x_i , имеется другое искомое неизвестное x_j и f_{jo} – образующая для столбца a_j , соответствующего x_j . Новые значения неизвестных при $\det A' \neq 0$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} f'_{io} &= (1/(f_{io} \cdot a'_i)) \cdot f_{io}; \\ x'_i &= f'_i \cdot b = (1/(f_{io} \cdot a'_i)) \cdot x_i; \\ f'_{jo} &= f_{jo} - (f_{jo} \cdot a'_i) \cdot f'_{io}; \\ x'_j &= f'_{jo} \cdot b; \\ x'_j &= x_j - (f_{jo} \cdot a'_i) \cdot x'_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Для задач анализа электронных схем характерно такое изменение некоторого столбца a_i , при котором изменяется малое число его элементов, вне зависимости от порядка n матрицы A . Это позволяет резко сократить объём вычислений при повторных решениях.

Пусть Δa_i – изменение столбца a_i , так что $a'_i = a_i + \Delta a_i$. Тогда

$$f_{io} \cdot a'_i = 1 + f_{io} \cdot \Delta a_i. \quad (4)$$

При программной реализации (4) целесообразно обращаться только к изменённым элементам столбца a_i , число которых часто не превышает 2, вследствие чего вычисление $f_{io} \cdot a'_i$ часто требует не более двух скалярных умножений вне зависимости от значения n (которое может составлять тысячи и более).

В соответствии с (3) и (4) получаем

$$\begin{aligned} x'_i &= (1/(1 + f_{io} \cdot \Delta a_i)) \cdot x_i, \text{ откуда} \\ x_i &= (1 + f_{io} \cdot \Delta a_i) \cdot x'_i. \end{aligned}$$

Используем обозначение $\Delta x'_i = x_i - x'_i$ (что соответствует точке зрения, в соответствии с которой x'_i – исходное значение, а x_i – конечное значение, так что $x_i = x'_i + \Delta x'_i$).

Получаем

$$\Delta x'_i = x_i - x'_i = (1 + f_{io} \cdot \Delta a_i) \cdot x'_i - x'_i = f_{io} \cdot \Delta a_i \cdot x'_i. \quad (5)$$

Полученный результат позволяет радикально упростить решение некоторых задач параметрического синтеза электронных схем.

Пусть, для определённости, x_i – ток некоторого резистора, соответствующего столбцу a_i . Пусть произошло изменение сопротивления этого резистора на величину ΔR ($\Delta R = R' - R$, где R – исходное, а R' – изменённое значение сопротивления). Пусть в столбце a_i один из изменяющихся элементов, расположенный в строке s матрицы A , имеет значение R , а другой элемент, расположенный в строке t матрицы A , имеет значение $-R$ (что характерно для систем уравнений, составленных по законам Кирхгофа).

Обозначим через $f_{io/s}$ элемент строки f_{io} , расположенной в столбце s матрицы F , а через $f_{io/t}$ – элемент строки f_{io} , расположенной в столбце t матрицы F .

Тогда, в соответствии с (5),

$$\Delta x'_i = (f_{io/s} \cdot \Delta R - f_{io/t} \cdot \Delta R) \cdot x'_i = \Delta R \cdot (f_{io/s} - f_{io/t}) \cdot x'_i, \text{ откуда} \\ \Delta R = \Delta x'_i / ((f_{io/s} - f_{io/t}) \cdot x'_i). \quad (6)$$

Выражение (6), по существу, определяет требуемое изменение сопротивления, обеспечивающее заданное относительное изменение тока резистора при использовании одного скалярного умножения и одного деления вне зависимости от сложности схемы, что позволяет говорить о предельном сокращении вычислительных затрат.

Если в качестве неизвестного используется напряжение или если элемент определяет другое число изменяющихся элементов столбца a_i (не равное двум, как в описанном выше случае), то изложенный подход также, по существу, не изменяется. Полученный результат применим и для параметрического синтеза цепей в режиме переменного тока, когда используются матрицы с комплексными числами.

По предложенным выражениям написана программа и проведены многочисленные вычислительные эксперименты, показавшие высокую эффективность описанного подхода.

Литература

1. Савёлов Н.С. Расчет переходных процессов в предварительно упорядоченных электрических цепях // Изв. вузов. Электромеханика. 1985. № 4. С. 85-92.
2. Савёлов Н.С. Формирование уравнений состояния при изменениях в электрических цепях // Изв. вузов. Электромеханика. 1987. № 12. С. 13-18.
3. Савёлов Н.С., Лыонг С.Т. Метод ускоренного расчёта частотных характеристик // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: тр. 53-й науч. конф. М.: МФТИ, 2010. Т. 3, ч. VII. Управление и прикладная математика. С. 51-52.
4. Савёлов Н.С., Лыонг С.Т. Эффективный метод расчёта частотных характеристик электрических цепей // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 5. С. 31-34.
5. Савёлов Н.С., Ревин М.С. Программная реализация метода ускоренного анализа электрических цепей // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: тр. 50-й науч. конф. МФТИ, Долгопрудный, 2007 г. М., 2007. Т. 2, ч. VII. Управление и прикладная математика. С. 137-138.

346407, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Крылова, 2а, кв. 35,
т. 8 928 160 52 94, e-mail: savelovn@mail.ru

357201, Ставропольский край, г. Минеральные Воды, ул. Луначарского, 18,
т. 8 951 493 09 10, e-mail: khlyntcevsergey@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ: СОПРОВОЖДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ Micro CAP

Ю.К. Ситников

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Рассматриваются особенности применения пакетов прикладных программ при обучении студентов технических и физических специальностей. Предлагается методика проведения занятий.

Важной частью процесса обучения студентов естественнонаучных и инженерных факультетов (институтов) является работа в лабораториях, сопровождающая различные учебные дисциплины. Этим занятиям отводится значительное время в учебных планах инженерных и естественнонаучных специальностей. Теоретические занятия и расчётные работы дают базовые знания основных законов, процессов, методов и правил. Однако, теория, построенная в упомянутых дисциплинах, на математических моделях не рассматривает действие ряда дополнительных факторов, учёт которых необходим при исследовательской работе, разработке реальных изделий, конструировании или определении технологических приёмов изготовления работоспособной продукции. В зависимости от типа изделия такими, не учитываемыми в теории факторами, могут быть старение компонентов, температура, давление, влажность, разброс параметров и.т.п. Эти вопросы по возможности переносятся в учебную лабораторию.

Лабораторная установка, являющаяся реальным объектом, исследуемым в реальных условиях с помощью измерительной аппаратуры, то есть в системе, подвергается большинству из перечисленных выше воздействий. В этом и заключается необходимость и ценность лабораторных исследований, позволяющих оценить сходимость (или расхождение) теоретических расчётов и экспериментальных результатов.

К сожалению, лабораторным установкам свойственны ограничения возможностей эксперимента, так как в них сложными, дорогими, а иногда и невозможными являются вариации параметров в широких пределах, что ограничивает методические возможности этих занятий.

Рассмотрим конкретный пример. В курсах «Теория электрических цепей», «Теоретические основы радиоэлектроники», «Радиопередающие устройства» и других рассматриваются электрические резонансные цепи, частоты собственных колебаний в таких цепях, понятие добротности

резонансной системы. В лаборатории измерения резонансной частоты могут быть выполнены с помощью генератора сигналов и осциллографа или вольтметра. Добротность можно определить с помощью Q-метра. Такой способ выполнения измерения можно считать контрольным, но не исследовательским, так как особенности явления, называемого резонансом в этом случае не выявляются. Полную картину в лаборатории можно было бы получить, изменяя значения индуктивности, ёмкости, сопротивления контура, внутреннее сопротивление задающего генератора и параметры нагрузки контура. Предлагаемый вариант естественно слишком сложен для реализации в лабораторном практикуме. Поэтому целесообразно лабораторное исследование предварить компьютерным моделированием [1].

Для обсуждаемого здесь примера исследования параметров колебательного контура удобно воспользоваться известным приёмом: проследить процесс затухания колебаний. Для этого подают на электрический колебательный контур импульс, чтобы запasti энергию в реактивных элементах. Такая схема называется «Ударный контур» (или «Контур ударного возбуждения»). При отключении сигнала в течение некоторого времени наблюдаются затухающие колебания, как показано на рис. 1 (рисунок получен путём моделирования с помощью программы Micro CAP).

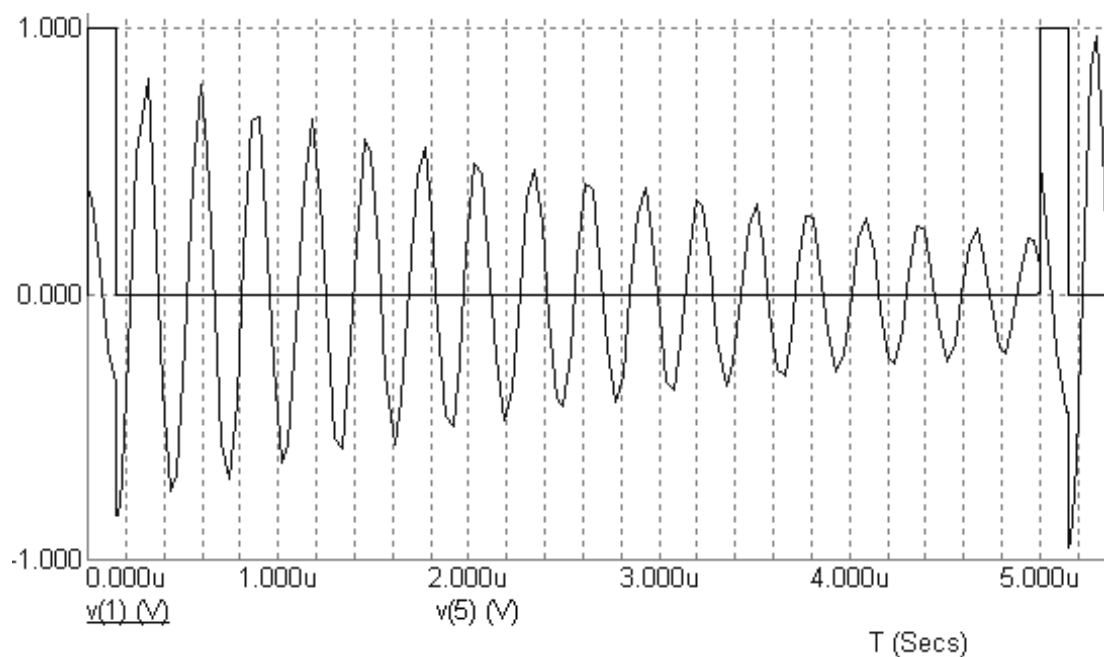


Рис. 1. Затухание колебаний в ударном контуре

На рис. 1 видны два возбуждающих импульса и между ними собственные колебания контура. На рисунке, воспроизведённом с экрана, как

принято в используемой программе, буква U означает микросекунду [2]. Схема, применяемая для моделирования ударного контура, содержит небольшое количество элементов (рис. 2), что не вызывает у обучаемых затруднений при составлении схемы на экране. Номиналы всех компонентов видны на рис. 2. Транзистор, обозначенный Q1 (2N2222), выбран из библиотеки компонентов моделирующей программы Micro CAP.

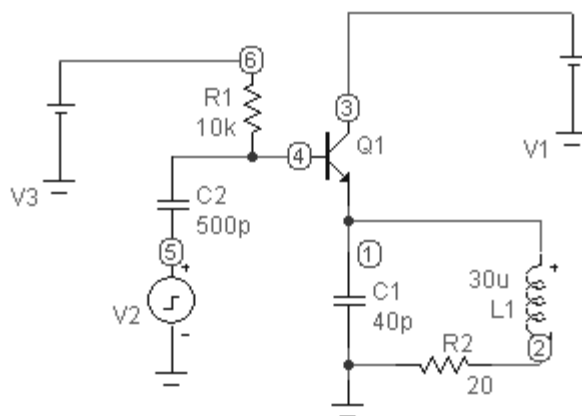


Рис. 2. Схема модели ударного контура.
V2 обозначен генератор прямоугольных импульсов

При определении добротности попутно определяется декремент затухания. Для этого следует измерить максимальные значения соседних отклонений на диаграмме, рис. 3. Достаточно подвести указатель мыши к этим точкам. Программа в ответ на это выдаёт на экране численные значения «амплитуд» и соответствующих выбранным точкам моментов времени.

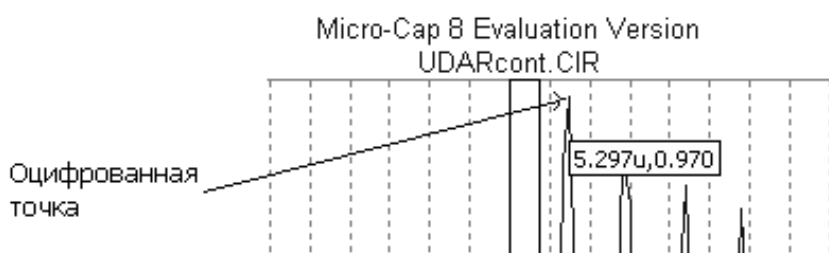


Рис. 3. Отметка времени и напряжения для конкретного значения сигнала

В рассматриваемом примере значения отклонений составляют 0,970 и 0,866, а значения времени 5,297u и 5,563u, что позволяет вычислить период в микросекундах, равный в данном случае 0,264u и определить собственную частоту колебаний (3787879 Гц). Если подсчитать частоту, учитывая только величины C1 и L1, то частота получится на 800 кГц выше модельной. На это следует обращать внимание студентов, чтобы они разобрались и объяснили, почему модель даёт более низкое значение.

Студенты по значениям соседних «амплитуд» подсчитывают логарифмический коэффициент затухания и, используя полученный результат, вычисляют добротность.

Сопровождение лабораторных экспериментов компьютерным моделированием осуществляется на кафедре радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета уже несколько лет. Опыт проведения занятий и их результаты позволяют положительно оценивать учебную триаду: теория, лабораторные исследования, моделирование.

Литература

1. Ситников Ю.К. Применение промышленных пакетов прикладных программ при моделировании электронных устройств // Инновационные технологии в системе современного естественно-научного образования: материалы первой междунар. интернет-конф., г. Екатеринбург, 20 марта 2010 г. Екатеринбург, 2010. С. 123-127.
2. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.

420008, г. Казань, Кремлёвская, 18, университет, институт физики,
Ситникову Ю.К., e-mail: Jury.Sitnikov@ksu.ru

УДК 669.018:541.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ, ПРОТЕКАЮЩЕГО ПРИ НАНЕСЕНИИ Ni-P-ПОКРЫТИЙ

*А.В. Скориков, В.Г. Шишка, Ю.М. Бережной,
В.Ю. Пономарев, Т.В. Литвинов*

Особое конструкторское техническое бюро "Орион", г. Новочеркасск
Южно-Российский государственный технический университет,
г. Новочеркасск

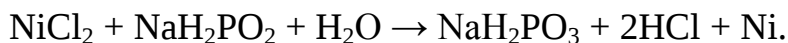
Приведен пример использования математического моделирования в химической кинетике превращения веществ. Описана элементарная модель превращений, протекающих при химическом никелировании.

Вторая половина XX века связана с появлением и широким распространением новой методологии исследования сложных объектов и систем. В ее основе лежит метод математического моделирования и реализованные на его основе вычислительные эксперименты [1].

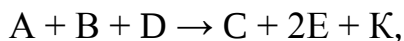
Все естественные и общественные науки, использующие математический аппарат, по сути, занимаются математическим моделированием: заменяют реальный объект его моделью и затем изучают последнюю. Как и в случае любого моделирования, математическая модель не

описывает полностью изучаемое явление, и вопросы о применимости полученных таким образом результатов являются весьма содержательными [2].

Рассмотрим кинетическое уравнение химического никелирования:



Данное уравнение обозначим при помощи условных обозначений:



где А, В и D это исходные вещества, вступающие в химическую реакцию; С, Е и К – продукты реакции.

Составим таблицу, в которой указаны количества веществ до реакции, вступивших в реакцию и после реакции. Долю прореагировавших веществ обозначим x .

Таблица

Количества веществ, моль	А	В	Д	С	Е	К	Всего
Количество веществ до реакции	1	1	1	0	0	0	
Количество веществ, вступивших в реакцию	x	x	x	x	$2x$	x	
Количество веществ после реакции	$1-x$	$1-x$	$1-x$	x	$2x$	x	$3+x$

Неизвестное x можно определить из уравнения, выражающего константу равновесия через концентрации находящихся в смеси веществ:

$$K = \frac{C_A C_B C_D}{C_C C_E^2 C_K} = \frac{\left(\frac{x}{3+x}C\right)\left(\frac{2x}{3+x}C\right)^2\left(\frac{x}{3+x}C\right)}{\left(\frac{1-x}{3+x}C\right)\left(\frac{1-x}{3+x}C\right)\left(\frac{1-x}{3+x}C\right)}.$$

Данное уравнение описывает константу скорости протекания химической реакции данного процесса. И может иметь несколько решений. Такой результат совершенно типичен для расчетов химических равновесий: каким бы сложным ни было уравнение относительно степени превращения реагентов в продукты и сколько бы корней (в том числе и положительных) оно ни имело, всегда только один корень будет обладать химическим смыслом, то есть приводить к положительным равновесным концентрациям всех веществ. Данную модель можно уточнить, приняв во внимание какие-то из этих факторов. Это приведет к новой модели, с более широкой (хотя и снова ограниченной) областью применимости. Впрочем, при уточнении модели, сложность ее математического исследования может существенно возрасти и сделать модель фактически бес-

полезной. Зачастую более простая модель позволяет лучше и глубже исследовать реальную систему, чем более сложная.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14. U01.21.1078.

Литература

1. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ Колледж, 2005.
2. Ашихмин В.Н., Гитман М.Б., Кэллер И.Э. и др. Введение в математическое моделирование: уч. пособие / Под ред. П.Д. Трусова. М.: Логос, 2005. 440 с.

Скориков А.В., 346410, г. Новочеркасск, ул. Атаманская, 50, кв. 15.

Шишка В.Г., 346422, г. Новочеркасск, ул. Бакунина, 50/139, кв. 2.

Бережной Ю.М., 352460, г. Хадыженск, ул. Кубанская, 9.

УДК 661.56

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

Н.А. Степовая, Л.В. Пешкова

Невинномысский технологический институт (филиал)

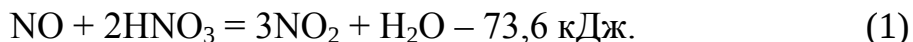
Северо-Кавказского федерального университета

Приведены данные, полученные в результате математического эксперимента на модели поглотительной колонны в производстве концентрированной азотной кислоты. Целью расчета являлось определение оптимального технологического режима работы узла абсорбции по снижению NO_x в выхлопных газах и достаточном выходе нитроолеума при максимальной концентрации получаемой кислоты в нижней – окислительной части колонны.

В работе были изучены стадии окисления оксида азота и абсорбция оксидов азота концентрированной азотной кислотой технологической схемы производства азотной кислоты из нитрозных газов, полученных окислением NH_3 кислородом воздуха. Гомогенное окисление оксида азота кислородом в газовой фазе и гетерогенное окисление концентрированной азотной кислотой проводится после выделения избыточной реакционной воды. Степень и скорость окисления NO при известном исходном содержании NO и O_2 в заданных температуре и давлении определяют с помощью констант равновесия и скорости реакции окисления NO до NO_2 .

В системах производства концентрированной азотной кислоты при атмосферном давлении окисление NO до NO_2 кислородом, содержащимся

в нитрозных газах, протекает в окислительных объемах. Для достижения полного окисления NO газ доокисляется 98 %-ной азотной кислотой по реакции



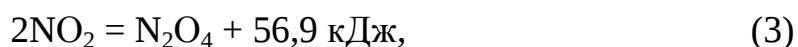
При этом азотная кислота разбавляется, а нитрозные газы обогащаются NO₂. Процесс доокисления целесообразно вести до разбавления кислоты не ниже 68 %, т.к. в интервале концентраций азотной кислоты от 68 до 100 % равновесная концентрация оксида азота над кислотой очень мала [1].

При атмосферном давлении можно достичь 99 %-го окисления оксида азота концентрированной азотной кислотой. При повышенных давлениях целесообразно провести наиболее полное гомогенное окисление высококонцентрированных оксидов азота кислородом под давлением, которое протекает с высокой скоростью, и доокисление провести концентрированной кислотой [2]. Возможно также окисление NO в газовой фазе парами азотной кислоты [3]. Однако, в промышленности гомогенное окисление NO парами азотной кислоты не применяется, так как скорость гетерогенного окисления на 2-3 порядка выше.

Несмотря на то, что скорость окисления NO концентрированной азотной кислотой с понижением температуры уменьшается, процесс ведут при пониженных температурах, так как при этом уменьшается количество паров азотной кислоты, уносимых отходящими газами [2]. Одновременно с гетерогенным окислением оксида азота азотной кислотой происходит его окисление в жидкой фазе растворенным в кислоте кислородом. Увеличение температуры способствует повышению скорости окисления оксида азота в жидкой фазе.

Процесс получения концентрированной азотной кислоты – сложный гомогенно-гетерогенный процесс, на скорость которого оказывают влияние кинетические и диффузионные факторы. Лимитирующая стадия процесса кислотообразования меняется в зависимости от концентрации азотной кислоты в растворе, давления и температуры [3].

Равновесие реакций



хорошо изучено, и числовые значения констант равновесия могут быть найдены практически в любом химическом справочнике.

Температурную зависимость константы равновесия реакции (2) вычисляем по уравнению Боденштейна [2]:

$$\lg K = \lg \frac{P_{NO}^2 P_{O_2}}{P_{NO_2}^2} = \left(-\frac{5749}{T} + 1,75 \lg T - 0,0005 T + 1,8306 \right).$$

С понижением температуры равновесие реакции сдвигается в сторону образования диоксида азота. Повышение давления сдвигает равновесие в сторону образования NO_2 . Особенностью реакции (2) является то, что скорость ее имеет отрицательный температурный градиент – она увеличивается с понижением температуры. Изменение скорости реакции (2) через парциальные давления можно выразить уравнением в интегральной форме, наиболее часто применяемой для расчетов [2]:

$$Kp \cdot \tau \cdot P^2 = \frac{1}{(b-a)^2} \left[\frac{(b-a)x}{(1-x)a} + \ln \left(\frac{1-x}{1-\frac{a}{b}x} \right) \right].$$

Для изучения факторов, влияющих на абсорбцию нитрозного газа и поглощение оксидов азота концентрированной азотной кислотой, было предложено составить математическую модель, которая позволила бы ускорить и упростить процесс расчета. Узел абсорбции был условно разделен на несколько частей: скоростной газовый холодильник, окислитель, доокислитель, рассольный холодильник, поглотитель оксидов азота концентрированной кислотой, промывная башня. Материальные балансы холодильника, окислителя, доокислителя, рассольного холодильника рассчитывались по уравнениям протекающих там реакций с использованием данных производства.

Созданная математическая модель процесса абсорбции позволяет, изменяя исходные данные (например, объем продувочных газов, давление газа, состав исходного газа и т.д.), получать результаты в виде графиков и таблиц. Было проведено изучение влияния различных факторов на процесс поглощения NO_2 концентрированной азотной кислотой. На рис. 1 показано влияние объема подаваемых продувочных газов на концентрацию оксидов азота по стадиям процесса.

От объема продувочных газов также зависит расход кислоты, идущей на окисление NO (реакция 1) в доокислителе (рис. 2). При объеме продувочных газов равном 300 м^3 количество кислоты минимально.

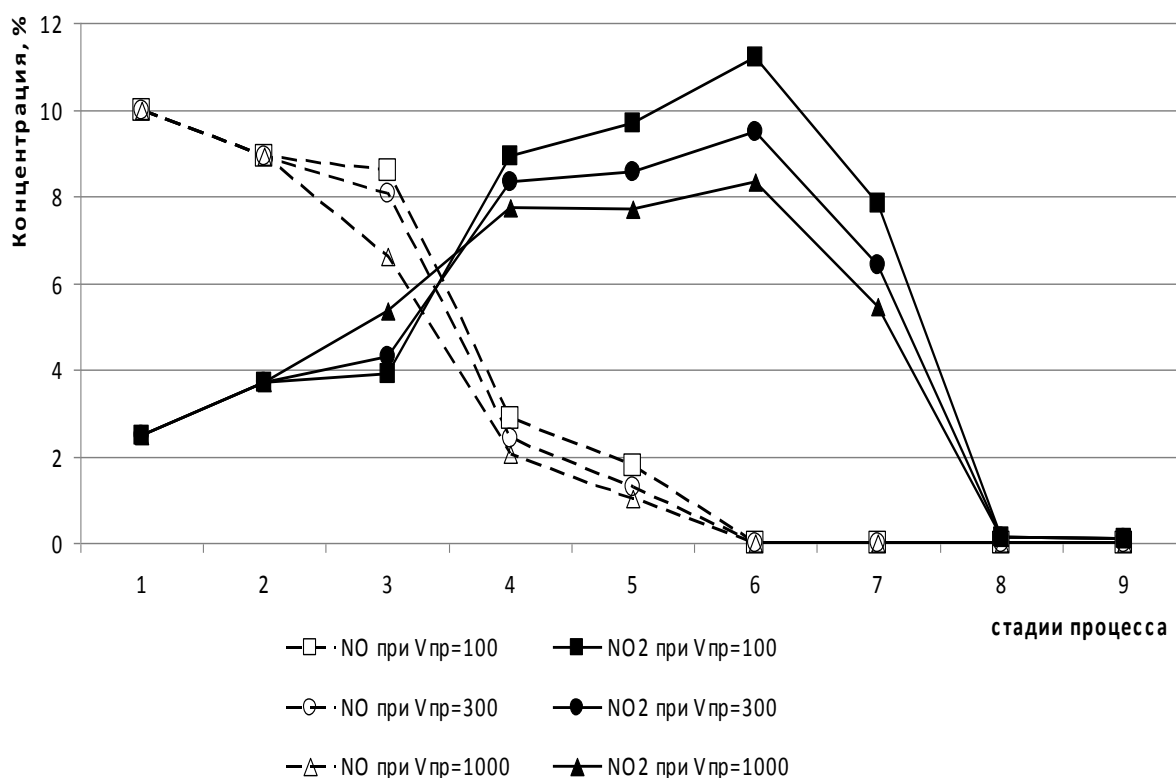


Рис. 1. Зависимость концентрации оксидов азота от объема продувочных газов по стадиям процесса: 1 – поступающие газы, 2 – газ после окисления в скоростном холодильнике, 3 – газ после смешения с продувочными газами, 4 – после первой тарелки, 5 – после второй тарелки, 6 – газ после доокисления, 7 – после охлаждения в рассольном холодильнике, 8 – после поглотительной части колонны, 9 – после промывной части колонны

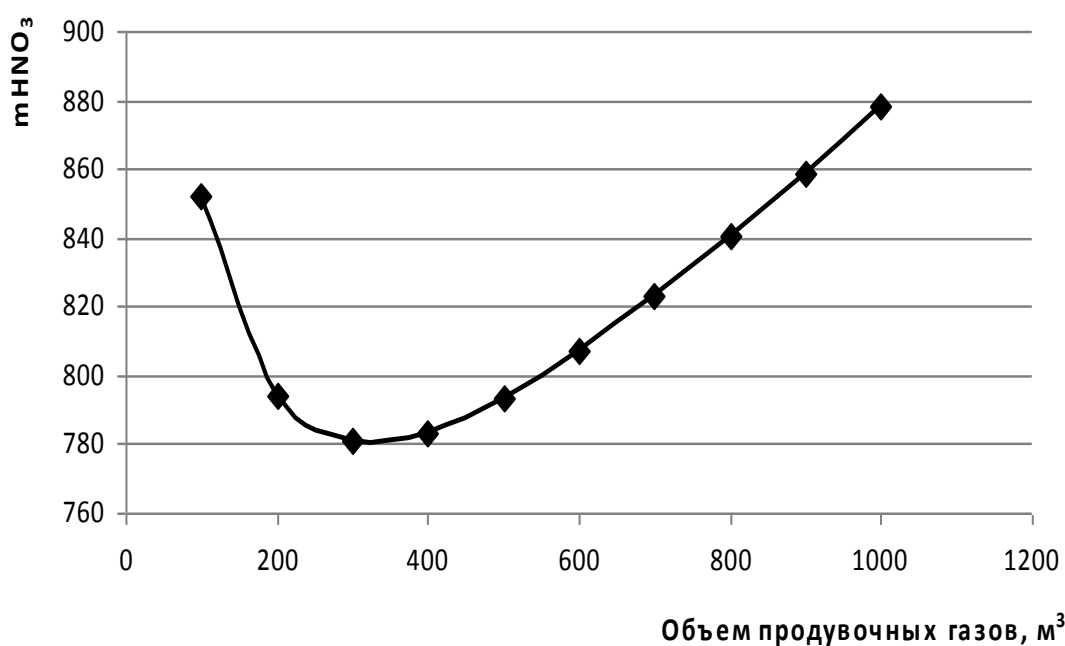


Рис. 2. Зависимость расхода концентрированной азотной кислоты, идущей на окисление NO в нижнюю часть нитроолеумной колонны, от объема подаваемых продувочных газов

Это связано с тем, что концентрация NO на входе в доокислитель при малом объеме подаваемых продувочных газов высока, т.к. из-за недостаточного объема кислорода в окислительных башнях окисление NO проходило слабо. Аналогичный характер кривых получается при исследовании влияния объема продувочных газов на образование NO₂ и полимеризацию оксида азота (IV). Минимальное значение достигается при объеме продувочных газов, подаваемых в нитроолеумную колонну, в объеме 400 м³/ч.

Результаты расчетов показали: концентрация азотной кислоты в газовых и жидких фазах изменяется прямо пропорционально объему продувочных газов. Это говорит о возрастании уноса HNO₃ с газовым потоком. Одновременно происходит увеличение растворимости кислорода в жидкой фазе.

На рис. 3 представлена зависимость массы NO и NO₂ на выходе из нитроолеумной колонны. Обе прямые практически идентичны друг другу и показывают наименьший выброс оксидов при объеме продувочных газов 100÷200 м³. В ходе исследования были выделены оптимальные параметры проведения процесса поглощения и абсорбции оксида азота (IV) концентрированной азотной кислотой. На процесс кардинально влияют давление входящего газа и объем подаваемых в нитроолеумную колонну продувочных газов. На основании расчета по созданной математической модели стало возможным определение оптимального режима ведения процесса поглощения и абсорбции оксида азота (IV) концентрированной азотной кислотой. Малые количества продувочного газа, подаваемого в нитрозный газ перед входом в колонну, не позволяют достичь высоких степеней окисления и поглощения. Высокие объёмы добавляемого газа приводят к тому, что увеличивается унос паров азотной кислоты, и абсолютное значение оксидов азота в «хвостовых» газах также возрастает. Поэтому оптимальным значением расхода подаваемого продувочного газа в колонну является 200–400 м³/ч.

Проводилось изучение влияния объема продувочных газов на степень окисления NO в NO₂ (рис. 4) и степень полимеризации NO₂ в N₂O₄ (рис. 5). Кривые на рис. 4 и 5, показывающие степень окисления NO и полимеризации NO₂ в N₂O₄ на первой и второй тарелках колонны, дают логарифмический характер зависимостей. Также выявлено влияние давления в системе на степень окисления оксида NO в NO₂. Графики зависимостей имеют сходный логарифмический характер. Это позволяет сделать вывод, что использование давления свыше 0,4 МПа не оказывает значительного влияния на процесс.

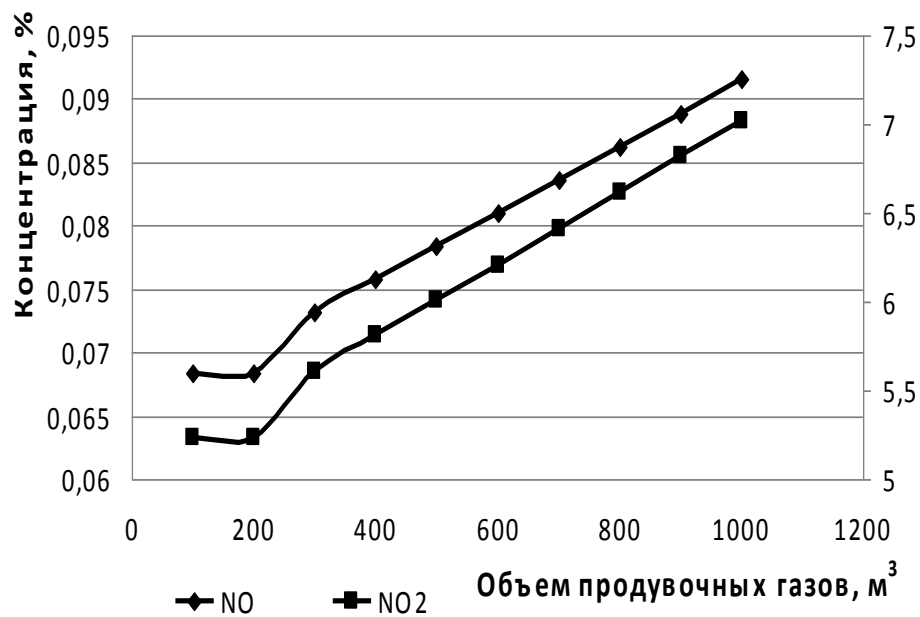


Рис. 3. Зависимость массы NO и NO₂ на выходе из промывной части колонны от объема продувочных газов

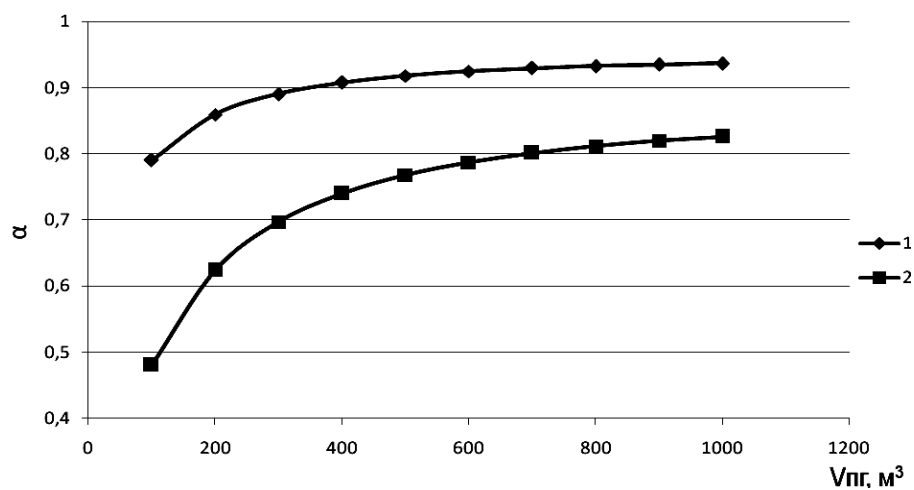


Рис. 4. Зависимость степени окисления NO в NO₂ от объема продувочных газов: 1 – на первой тарелке; 2 – на второй тарелке

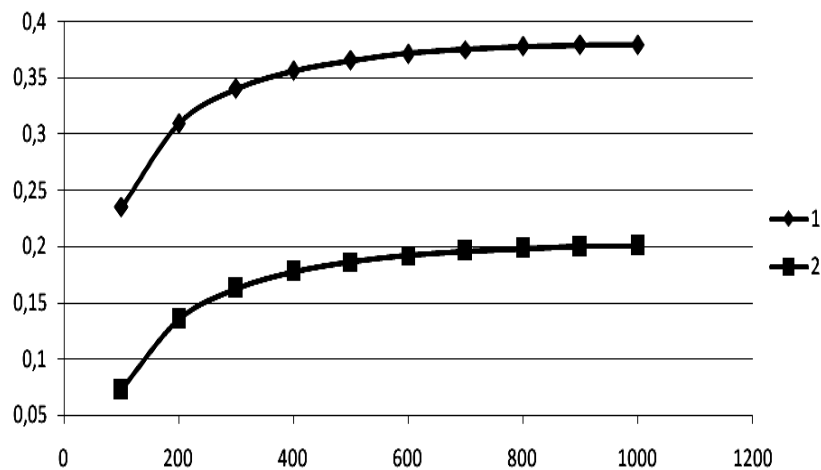


Рис. 5. Зависимость степени полимеризации от объема продувочных газов: 1 – на первой тарелке; 2 – на второй тарелке

Анализ результатов работы модели узла абсорбции и поглощения оксидов азота показал эффективность ее применения для изучения процесса абсорбции и проверки предложений по его оптимизации и реконструкции.

Литература

1. Андреев Ф.А., Каргин С.И. Технология связанного азота. М.: Химия, 1966. 500 с.
2. Атрощенко В.И., Каргин С.И. Технология азотной кислоты. М.: Химия, 1970. 496 с.
3. Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности / Под ред. В.М. Олевского. М.: Химия, 1985. 400 с.

357107, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1, т. 7-04-01, e-mail: stepnat_06@mail.ru

УДК 621.314.2.017

АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ НА МОДЕЛИ «ТРАНСФОРМАТОР 10(6)/0,4 кВ – НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА»

А.И. Троицкий, С.С. Костинский, И.Н. Ситникова,

В.В. Авраменко, Е.В. Новикова

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Проведена обработка экспериментальных исследований на модуле «трансформатор – несимметричная нагрузка». На ее основе построены зависимости потерь активной мощности от коэффициента загрузки трансформатора и погрешности ее расчетов без учета, а также с учетом несимметрии активно-индуктивной нагрузки.

После резкого снижения электропотребления в 90-х годах в настоящее время во многих регионах оно так и не достигло предкризисного уровня [1]. Анализ протоколов измерений для трансформаторов, установленных в городских, сельских и промышленных сетях [2], показал, что в распределительных трансформаторах мощностью до 1000 кВА основные потери – потери ХХ (холостого хода). Это объясняется тем, что распределительные трансформаторы мало загружены, и их нагрузка – несимметричная. Экономичность их работы принято оценивать либо по коэффициенту полезного действия (КПД), либо по относительным потерям, графики которых в зависимости от загрузки для отдельного трансформатора, по своей сути, являются инверсией графиков КПД.

Главный фактор увеличения потерь – смещение нейтрали по причинам: применение схемы звезда – звезда с нулём, у которой сопротивление

нулевой последовательности в несколько раз больше сопротивления прямой (обратной) последовательности; неравномерное подключение нагрузок между фазами; 70 % протяжённости распределительных сетей (РС) на напряжение 0,4 кВ. Основной причиной сверхнормативных потерь в РС является несимметрия нагрузок распределительных трансформаторов (РТ). Поэтому актуальным является вопрос об ее влиянии на потери активной мощности в трансформаторах.

В работах [3, 4] были выполнены исследования превышения потерь от токов обратной и нулевой последовательностей в сравнении с потерями от токов прямой последовательности, а также зависимостей полной, активной, реактивной мощностей, коэффициента реактивной мощности, пульсирующей мощности в общем виде и частных случаях для каждой из четырех схем трехфазной сети с симметричной системой источников ЭДС и несимметричной активно-индуктивной нагрузкой: соединенной в звезду с изолированной нейтралью; соединенной в треугольник; соединенной в звезду с глухим соединением нейтрали нулевым проводником; соединенной в звезду с глухим соединением нейтрали нулевым проводником, сопротивлением которого можно пренебречь.

С целью подтверждения работоспособности и достоверности полученных функциональных зависимостей для расчета потерь при несимметричной нагрузке трансформатора были проведены измерения на физической модели «трансформатор 10(6)/0,4 кВ – несимметричная нагрузка».

Экспериментальные измерения проводились авторами в лаборатории «Несимметричные и несинусоидальные режимы работы распределительных сетей», кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» под руководством д-ра техн. наук, профессора А.И. Троицкого

Стендовые испытания модуля «трансформатор – несимметричная нагрузка» осуществлялись с использованием трехфазного двухобмоточного трансформатора марки ТСЗ-2,5, номинальной мощностью 2,5 кВ·А, напряжением на обмотке ВН 220 В, на обмотке НН 127 В.

В процессе измерений были использованы измерительные приборы: комплект измерительный К-540 заводской № 1213; портативный анализатор качества электроэнергии CIRCUTOR серии AR.5 заводской № 408612036. Все использованные приборы имеют класс точности 0,5 и свидетельства о поверке.

Для моделирования симметричной и несимметричной активной и индуктивной нагрузок были рассчитаны, спроектированы и собраны на-

На основе обработки экспериментальных исследований модуля «трансформатор – несимметричная нагрузка» построены зависимости потерь активной мощности и погрешности расчетов потерь активной мощности от коэффициента загрузки. Ниже приведен анализ экспериментальных данных для схемы соединения нагрузки по схеме «звезда с глухим заземлением нейтрали», но аналогичные зависимости для других схем, указанных в работах [3, 4], в данной статье не приводятся.

При изменении коэффициента загрузки в интервале от 0,2 до 0,42 разница потерь при несимметричном и симметричном режимах с активно-индуктивной нагрузкой незначительно изменяется, что вполне соответствует физике процесса и отражено на рис. 2. Дело имеем с режимом ХХ (условно постоянными потерями). В интервале 0,42-1,0 разница потерь при несимметричном и симметричном режимах увеличивается. Среднее ее значение 1,679 %.

86

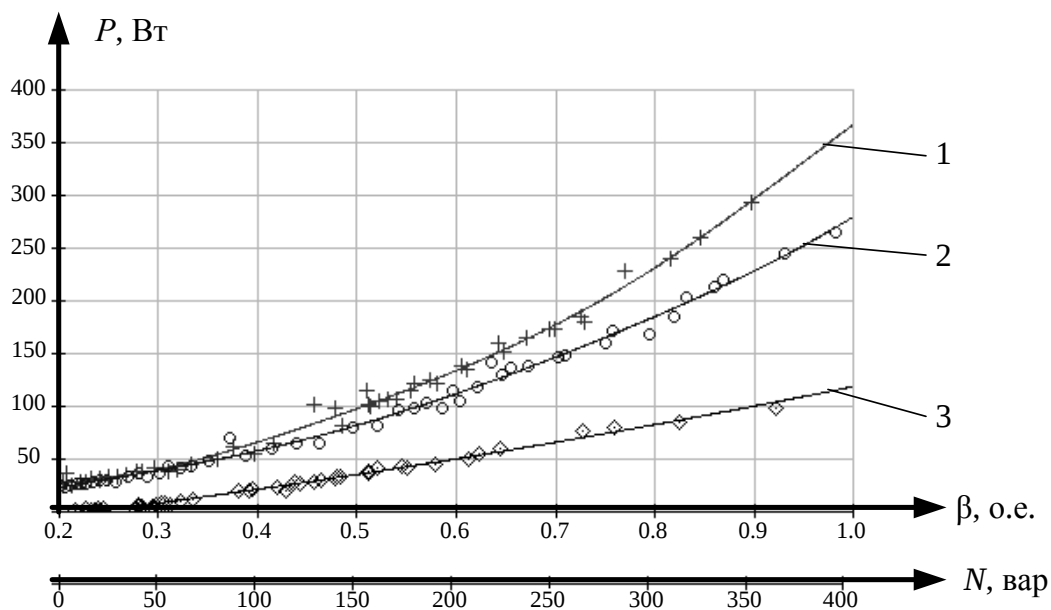


Рис. 2. Зависимость потерь активной мощности в трансформаторе от коэффициента загрузки: 1 – при несимметричной активно-индуктивной нагрузке; 2 – при симметричной активно-индуктивной нагрузке; 3 – зависимость потерь активной мощности в трансформаторе при несимметричной активно-индуктивной нагрузке от пульсирующей мощности трех фаз

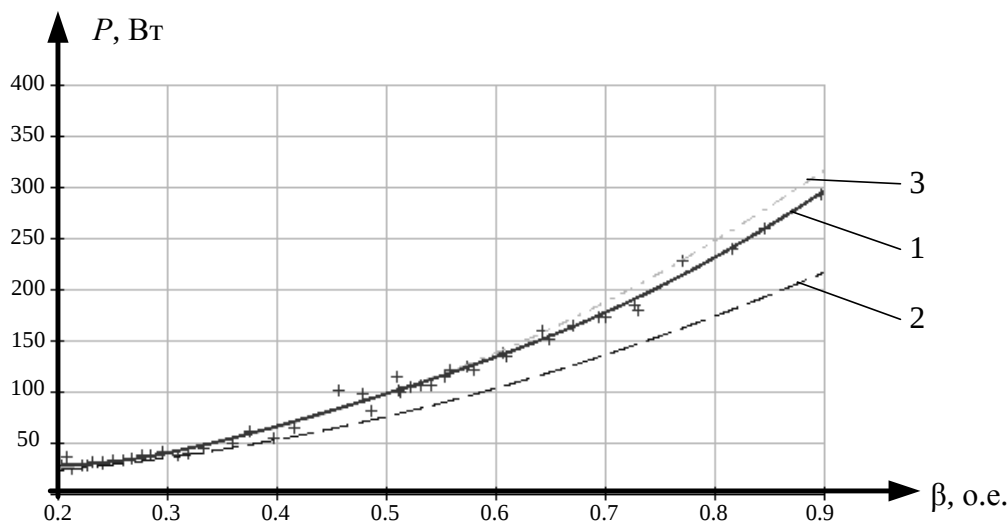


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности в трансформаторе при несимметричной активно-индуктивной нагрузке от коэффициента загрузки: 1 – экспериментальная; 2 – рассчитанная без учета несимметрии; 3 – с учетом несимметрии активно-индуктивной нагрузки

В интервале изменения коэффициента загрузки в интервале 0,2-0,26 погрешность отрицательная, а от 0,26 до 1,0 – положительная, причем максимальная погрешность – 8,41 % при коэффициенте загрузки 0,81 (рис. 4). Средняя погрешность при коэффициенте загрузки от 0,2 до 1,0 без учета несимметрии – 19,7 %, а с учетом предлагаемых функциональных зависимостей – 3,17 %.

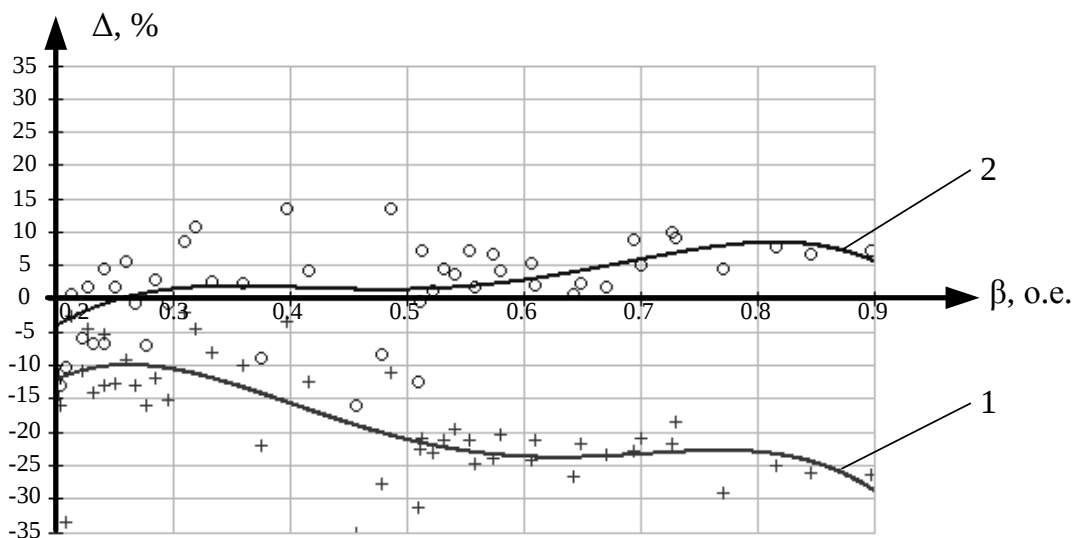


Рис. 4. Зависимость погрешности расчетов потерь активной мощности от коэффициента загрузки при несимметричной активно-индуктивной нагрузке:
1 – без учета несимметрии; 2 – с учетом несимметрии

Таким образом, потери активной мощности, рассчитываемые по классической формуле, следует корректировать в соответствии со схемами соединения нагрузки согласно разработанным функциональным зависимостям.

Выводы

1. Погрешность вычисления потерь активной мощности в трансформаторе при использовании предлагаемых в статьях [3, 4] функциональных зависимостей лежит в пределах от -10 до 10 %. (на основании более 1000 замеров).

2. Учёт фактических потерь ХХ и КЗ трансформаторов с учётом дополнительных потерь, вносимых несимметричными нагрузками, целесообразен как при выполнении расчётов технологических потерь, так и при обосновании экономического эффекта замены трансформаторов.

Литература

1. Заугольников В.Ф., Балабин А.А., Савинков А.А. Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов // Промышленная энергетика, 2006. № 4. С. 10.
2. Костинский С.С. Результаты статистической обработки потерь холостого хода и нагрузочных потерь в распределительных силовых трансформаторах, длительно находящихся в эксплуатации // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. Спецвып. Электроснабжение. С. 90-92.
3. Троицкий А.И., Костинский С.С. Определение потерь активной мощности при несимметричной активно-индуктивной трехфазной нагрузке, подключенной к системе симметричных источников ЭДС с изолированной нейтралью // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 2. С. 22-25.

4. Троицкий А.И., Костинский С.С., Химишев Т.З. Определение дополнительных потерь при несимметричной активно-индуктивной трехфазной нагрузке, подключенной к системе симметричных источников ЭДС и соединенной по схеме звезда с глухим заземлением нейтрали // Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 4. – С. 64-67.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 8 (8635) 25-56-50,
кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий и городов»,
e-mail: mirovingen1987@mail.ru

УДК 621.316.1.017

МОДЕЛИРОВАНИЕ «НЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗОК» С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ВНУТРЕННИМ СИММЕТРИРОВАНИЕМ

А.И. Троицкий, А.К. Хуажев

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Предлагается в качестве базы данных для расчетов несимметричных нагрузок использовать значения не токов и их углов сдвига, а эквивалентных сопротивлений (проводимостей) фаз.

В настоящее время значительно возросли несимметричные нагрузки. С целью повышения энергоэффективности актуальны исследования поперечной несимметрии от несимметричных нагрузок. Их подключение возможно в звезду, нейтраль которой изолирована, в треугольник.

В работе принято допущение о том, что источники электродвижущей силы (ЭДС) симметричны.

Здесь приводятся результаты исследований для случая соединения нагрузки в звезду с изолированной нейтралью.

Когда ЭДС основной фазы $\dot{U}_A = jU$, обходы контуров схем замещения – по часовой стрелке, эквивалентные комплексные сопротивления фаз нагрузки не равны ($\mathbf{z}_a = \mathbf{r}_a + j\mathbf{x}_a \neq \mathbf{z}_b = \mathbf{r}_b + j\mathbf{x}_b \neq \mathbf{z}_c = \mathbf{r}_c + j\mathbf{x}_c$), то для исследования режима используем расширенную матрицу (1) из коэффициентов при неизвестных и свободных членах полной системы уравнений [1].

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{z}_a & 0 & 0 & 1 & \dot{\mathbf{E}}_A \\ 0 & \mathbf{z}_b & 0 & 1 & \dot{\mathbf{E}}_B \\ 0 & 0 & \mathbf{z}_c & 1 & \dot{\mathbf{E}}_C \end{array} \right); \quad (1)$$

Основные искомые величины: линейные комплексные токи $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ и напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{nN}$. В отличие от классического подхода к исследованию несимметричных режимов, здесь предлагается в качестве базы данных использовать значения эквивалентных сопротивлений фаз, а не токов и их углов сдвига согласно алгоритму: определяют линейные токи, значения их симметричных составляющих (ССТ), коэффициентов несимметрии токов (КНТ) по обратной и нулевой последовательностям. Значение квадрата модуля КНТ по обратной последовательности приравнивают относительному превышению потерь активной мощности от сопротивлений фаз несимметричной нагрузки в сравнении с симметричным распределением сопротивлений между фазами.

Решения полной системы уравнений, которой соответствует расширенная матрица (1), согласно методу Крамера

Значения главного и остальных определителей:

$$\Delta = z_a z_b + z_a z_c + z_b z_c = \frac{Y_a + Y_b + Y_c}{Y_a Y_b Y_c}; \quad (2)$$

$$\Delta_1 = -jU(a-1)(z_b + z_c(1+a)) = -\frac{jU(a-1)}{Y_b Y_c} (Y_c - a^2 Y_b); \quad (3)$$

$$\Delta_2 = jU(a-1)(a z_a + z_c(1+a)) = \frac{jU(a-1)}{Y_a Y_c} (a Y_c - a^2 Y_a); \quad (4)$$

$$\Delta_3 = jU(a-1)(z_b - z_a \cdot a) = \frac{jU(a-1)}{Y_a Y_b} (Y_a - a Y_b); \quad (5)$$

$$\Delta_4 = jU(a z_a z_b + a^2 z_a z_c + z_b z_c) = \frac{jU}{Y_a Y_b Y_c} (a Y_c + a^2 Y_c + Y_a). \quad (6)$$

В уравнениях (2)...(6) и далее по тексту: $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$; $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240^\circ}$ – фазовые операторы поворота комплексных величин соответственно на 120° и 240° ; Y_a , Y_b , Y_c – эквивалентные проводимости фаз несимметричной нагрузки.

Линейные токи и напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{I}_A = \Delta_1 / \Delta; \dot{I}_B = \Delta_2 / \Delta; \dot{I}_C = \Delta_3 / \Delta; \dot{U}_{nN} = \Delta_4 / \Delta.$$

Токи прямой и обратной последовательностей фазы А:

$$\dot{I}_{1A} = 1/3(\Delta_1 + a \cdot \Delta_2 + a^2 \cdot \Delta_3) / \Delta; \dot{I}_{2A} = 1/3(\Delta_1 + a^2 \cdot \Delta_2 + a \cdot \Delta_3) / \Delta.$$

КНТ по обратной последовательности:

$$\dot{k}_2 = (\Delta_1 + a^2 \cdot \Delta_2 + a \cdot \Delta_3) / (\Delta_1 + a \cdot \Delta_2 + a^2 \cdot \Delta_3). \quad (7)$$

Из уравнения баланса токов относительно нейтрали сопротивлений фаз следует: $\dot{I}_C = -(\dot{I}_A + \dot{I}_B) = (\Delta_1 + \Delta_2)/\Delta$, а уравнение (7) можно представить в виде:

$$\dot{k}_2 = a^2(\Delta_1 - a \cdot \Delta_2)/(\Delta_2 - a \cdot \Delta_1).$$

Квадрат модуля КНТ по обратной последовательности:

$$k_2^2 = |(a^2\Delta_1 - \Delta_2)/(\Delta_2 - a \cdot \Delta_1)|^2.$$

Учтём уравнения (3), (4), тогда:

$$k_2^2 = \left| -(\mathbf{z}_a + a \cdot \mathbf{z}_b + a^2 \cdot \mathbf{z}_c) \right|^2 / \left| (\mathbf{z}_a + \mathbf{z}_b + \mathbf{z}_c) \right|^2, \quad (8)$$

где $\mathbf{z}_a + a \cdot \mathbf{z}_b + a^2 \cdot \mathbf{z}_c = \alpha$, $\mathbf{z}_a + \mathbf{z}_b + \mathbf{z}_c = \beta$, причём

$$\begin{aligned} \alpha^2 = & z_a^2 + z_b^2 + z_c^2 - r_a r_b - r_a r_c - r_c r_b - x_a x_b - x_a x_c - x_c x_b + \rightarrow \\ \rightarrow & + \sqrt{3} \cdot (r_a \cdot x_c + r_b \cdot x_a + r_c \cdot x_b) - \sqrt{3} \cdot (r_a \cdot x_b + r_b \cdot x_c + r_c \cdot x_a); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\beta^2 = (r_a + r_b + r_c)^2 + (x_a + x_b + x_c)^2. \quad (10)$$

Превышение потерь активной мощности в относительных единицах несимметричного режима в сравнении с симметричным режимом (сопротивления фаз одинаковы): $\Delta P^* = \alpha^2/\beta^2$.

Геометрическая интерпретация комплексных величин α и β .

Для комплексных значений полных сопротивлений фаз, используемых в качестве базы данных, характерно отсутствие «памяти принадлежности к фазе связанной трёхфазной цепи». В какую бы фазу не было бы включено сопротивление, его комплексное значение не изменяется в отличие от ЭДС, токов, напряжений. Практическое использование результатов исследований сводится к определению модулей комплексных величин α и β . Их интерпретация заключается в следующем:

β – сумма комплексных сопротивлений фаз. *Причём, в общем случае амплитудно-фазовой несимметрии* квадрат модуля суммы комплексных сопротивлений фаз равен сумме квадратов их модулей плюс удвоенное значение суммы **скалярных** произведений попарно взятых сопротивлений.

α – сумма комплексных значений, полученных воздействием на соответствующие сопротивления в правой части комплексной величины β операторами поворота (пример – в приложении). Квадрат её модуля равен сумме квадратов модулей сопротивлений фаз плюс удвоенное значение суммы скалярных произведений попарно взятых сопротивлений,

аргументы которых отличаются от аргументов величины β операторами поворота.

Приложение. Пример определения комплексных величин α и β их модулей, а также дополнительных относительных потерь мощности подключения однородной и неоднородной несимметричных нагрузок.

Исходные данные: сопротивления однородной (активной) и неоднородной несимметричных нагрузок – $r_a = 2 \text{ Ом}$, $r_b = 1,5 \text{ Ом}$, $r_c = 2,5 \text{ Ом}$; $z_a = 2 \text{ Ом}$, $z_b = 1,5e^{j15^\circ} \text{ Ом}$, $z_c = 2,5e^{j30^\circ} \text{ Ом}$.

Расчёты параметров для неоднородной и однородной нагрузки см. в табл. 1.

Наглядное представление о комплексных величинах α и β следует из рис. 1, 2.

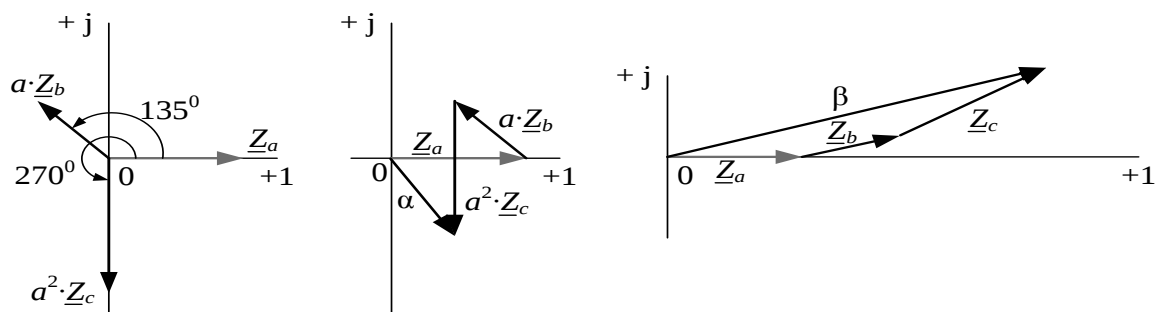


Рис. 1. Геометрическая интерпретация комплексных величин α , β неоднородной нагрузки

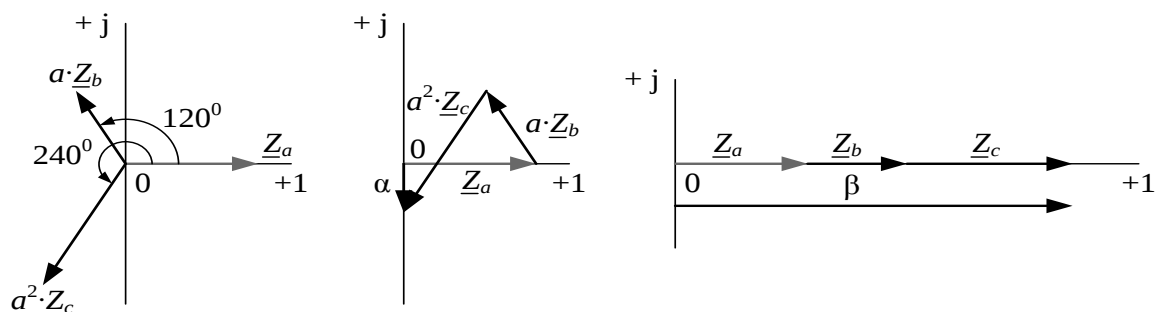


Рис. 2. Геометрическая интерпретация комплексных величин α , β однородной нагрузки

Таблица 1

Результаты расчётов параметров

Комплексные величины	Однородные нагрузки	Неоднородные нагрузки	Однородные нагрузки	Неоднородные нагрузки
	Модули комплексных величин		Относительные значения дополнительных потерь	
α	0,866	1,718	0,021	0,0863
β	6	5,848		

Для случаев фазовой несимметрии эквивалентов неоднородных нагрузок (активной, ёмкостной и индуктивной) по 10 Ом, подключённых шестью способами к источнику симметричных ЭДС напряжением 220 В [2], были выполнены расчёты несимметричных режимов по предлагаемой методике и классическим методом. Результаты практически совпадают. В табл. 2 в строках (1...6) приведены результаты расчётов этих нагрузок. Кроме того в табл. 2 также даны результаты расчётов:

- в строках (7...9) – для трёх случаев, когда в две фазы включаются индуктивные и в одну фазу активное сопротивление по 10 Ом;
- в строках (10...12) – одна индуктивная и две активные нагрузки;
- в строках (13...15) – одна активная и две ёмкостные;
- в строках (16...18) – две активные и одна ёмкостная;
- в строках (19...21) – две индуктивные и одна ёмкостная;
- в строках (22...24) – две ёмкостные и одна индуктивная.

Оказалось, что для первых шести вариантов три варианта с минимальными потерями одинакового значения (прямое следование фаз), а оставшиеся три варианта с максимальными потерями одинакового значения (обратное следование фаз), которые в 14 раз превышают минимальные потери.

Для вариантов (7...18), где нагрузка только одной фазы отличается от нагрузки остальных фаз, относительные потери оказались меньше, чем потери в оптимальных случаях подключения вариантов (1...6).

В вариантах (19...24). Для комбинаций индуктивных и ёмкостных нагрузок, когда только в одной фазе нагрузка отличается от двух других, потери оказались на порядок выше, чем в вариантах (7...18).

Таким образом, порядок включения и состав неоднородных нагрузок при фазовой несимметрии существенно влияют на величину дополнительных потерь.

В строках (24...27) табл. 2 для случая несимметричной однородной (активной) нагрузки, когда дело имеет с амплитудной несимметрией, порядок включения нагрузок не играет роли в целях снижения дополнительных потерь.

Таблица 2

Результаты расчётов

№ вар.	Za	Zb	Zc	β^2	α^2	ΔP^*
1	10	-10i	10i	100	746,3824	7,4638
2	10	10i	-10i	100	53,5824	0,5358
3	-10i	10	10i	100	53,5912	0,5359
4	-10i	10i	10	100	746,3912	7,4639

Продолжение таблицы 2

№ вар.	Za	Zb	Zc	β^2	α^2	ΔP^*
5	10i	-10i	10	100	53,5912	0,5359
6	10i	10	-10i	100	746,3912	7,4639
7	10i	10i	10	500	200,0000	0,4000
8	10i	10	10i	500	200,0000	0,4000
9	10	10i	10i	500	200,0000	0,4000
10	10	10	10i	500	200,0000	0,4000
11	10	10i	10	500	200,0000	0,4000
12	10i	10	10	500	200,0000	0,4000
13	-10i	-10i	10	500	200,0000	0,4000
14	-10i	10	-10i	500	200,0000	0,4000
15	10	-10i	-10i	500	200,0000	0,4000
16	10	-10i	10	500	200,0000	0,4000
17	-10i	10	10	500	200,0000	0,4000
18	10	10	-10i	500	200,0000	0,4000
19	10i	10i	-10i	100	400,0000	4,0000
20	10i	-10i	10i	100	400,0000	4,0000
21	-10i	10i	10i	100	400,0000	4,0000
22	-10i	-10i	10i	100	400,0000	4,0000
23	-10i	10i	-10i	100	400,0000	4,0000
24	10i	-10i	-10i	100	400,0000	4,0000
25	5	10	20	1225	174,9956	0,1429
26	20	5	10	1225	174,9989	0,1429
27	10	20	5	1225	174,9901	0,1428

Выводы

Исследования, выполненные в данной работе, позволили получить **обобщённые** и простые формулы (9, 10) для определения дополнительных потерь от несимметрии нагрузок, дающие ключ к оптимизации потерь внутренним симметрированием нагрузок и конденсаторными установками (КУ). Закон воздействия на режимы управляемых КУ в целях изменения углов сдвигов между комплексными сопротивлениями фаз должен быть таким, чтобы достигался минимум дополнительных потерь от несимметрии, если исключена возможность внутреннего симметрирования.

Снижение потерь от несимметричной нагрузки возможно как выбором варианта схемы подключения, так и использованием возможностей её внутреннего симметрирования, а также конденсаторного

симметризирующего устройства. Правильный выбор схемы соединения и режимов несимметричной нагрузки очень важен не только для потребителей электрической энергии, но и для всей отрасли энергетики.

Литература

1. Данко П.Е., Попов А.Г., Кожевникова Т.Я. Высшая математика в упражнениях и задачах. М.: ИД Оникс 21 век; Изд-во «Мир и Образование», 2005. 304 с.
2. Троицкий А.И. Расчёты несимметричных режимов и балансов мощностей в трёх-фазных сетях: метод. указания к выполнению заданий по курсу ТОЭ / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. 16 с.

УДК 621.336.7

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В.М. Филиппов, С.А. Ступаков, О.П. Фролова, А.А. Орлов

Омский государственный университет путей сообщения

Представлены результаты моделирования изнашивания контактных элементов токоприемников электроподвижного состава.

Для сокращения объема экспериментальных исследований изнашивания материалов контактных элементов (КЭ) токоприемников может быть использован комбинированный способ – совокупность необходимого минимума экспериментальных исследований реальных объектов и методов расчета, основанных на математическом моделировании процессов. Ввиду неоднородности составляющих процесса электромеханического изнашивания контактных элементов токоприемников необходимо составлять соответствующие модели для механического и электрического изнашивания.

Функциональная зависимость [1] между интенсивностью изнашивания I_M и факторами модели имеет вид:

$$I_M = \psi_2(P, v, t, r, Cu, H_1 / H_2, \lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2), \quad (1)$$

где P – нажатие в контакте; v – скорость скольжения; t – время испытаний; r – характерный линейный размер; Cu – содержание меди в контактном элементе; H_1/H_2 – симплекс (отношение твердости материала КЭ к твердости материала токопровода); λ_1, λ_2 – теплопроводности материалов КЭ и токопровода соответственно; c_1, c_2 – удельные теплоемкости КЭ и токопровода соответственно.

Для каждого фактора в уравнении (1) определяются показатели степени, а затем факторы с одинаковыми степенями объединены в комплексы.

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left(\frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m}, \quad (2)$$

где a_0 – функционал, отражающий влияние на процесс неучтенных факторов; α_m – функционал, логарифмически зависящий от нажатия в контакте; $\beta_m, \gamma_m, \varepsilon_m$ – коэффициенты, определяемые экспериментально; $Ptc_2 / (r^2 \lambda_1)$ – комплекс (отношение удельной мощности трения к способности токопровода накапливать, а КЭ – передавать тепло); vt / r – комплекс (отношение пути трения к характерному линейному размеру элемента).

Для повышения точности расчета изнашивания КЭ в уравнение (2) были внесены критерии, учитывающие изменение влажности и запыленности окружающей среды, а также влияние силы трения в скользящем контакте.

Перепишем уравнение (2):

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{r^2 \lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left(\frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \left(\frac{T_1 \lambda_1}{r f_\tau P v} \right)^{\delta_m} \left(\frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (3)$$

где Me – критерий Мейера; Pv – мощность трения, f_τ – коэффициент трения; φ_0 / φ – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований, κ_0 / κ – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности.

Уравнение (3) с учетом температуры элементов контактной пары запишем в следующем виде:

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{r(T_{I_h})^2 \rho_1 c_1 \chi} \right)^{\alpha_m} \left[Bi \cdot \left(\frac{vt}{r(T_{I_h})} \right) \right]^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \times \\ \times \left(\frac{T_1 \lambda_1}{r(T_{I_h}) f_\tau(T_{I_h}) P v} \right)^{\delta_m} \left(\frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (4)$$

где T_{I_h} – коэффициент влияния температурного градиента на интенсивность изнашивания; ρ_1, χ – плотность и температуропроводность материала соответственно; $H_i(T_{I_h})$ – твердость материала элемента контактной пары в зависимости от его температуры [3]; Bi – критерий Био.

Изнашивание контактных пар устройств токосъема от воздействия электрического тока можно представить с помощью функциональной зависимости между такими факторами как дугостойкость материала; количество электричества, прошедшее через дугу; длина пути трения; нажатие в контакте; комплекс, учитывающий изменение шероховатости поверхностей; комплекс, учитывающий износ при токовой нагрузке без искрения:

$$I_h = \psi_2(\gamma, Q, s, P, g, I_M, I_{E0}, I), \quad (5)$$

где γ – коэффициент дугостойкости материала, зависящий от рода тока, времени его протекания через контакт и полярности элемента контактной пары; Q – количество электричества, прошедшее через дугу; s – длина пути трения; P – нажатие в контакте; g – коэффициент, характеризующий изнашивание материала вследствие повышения шероховатости поверхностей [4]; I_{E0} – интенсивность изнашивания при токовой нагрузке без искрения.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований изнашивания КЭ от нажатия в контакте и токовой нагрузки с учетом работ И.В. Крагельского получены функционалы и коэффициенты, определяющие электрическую составляющую электромеханического изнашивания [2]:

$$I_E(P) = \left[\zeta_1 \xi(\gamma, Q) + \zeta_2 X_1^{k_1} \left(W_1(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \zeta_3 g(P, X_3, X_4, k_4) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) \right] \times \vartheta(\varphi, \kappa). \quad (6)$$

Окончательно с учетом влияния на износ термического действия токовой нагрузки и параметров внешней среды запишем:

$$I_E(P) = \left[\zeta_1 \cdot Bi \cdot \xi(\gamma, Q, T_{I_h}) + \zeta_2 \cdot (X_1 \cdot Me)^{k_1} (I_{E0}(P, k_1, k_2) j^{k_3} + \right. \\ \left. + \zeta_3 \cdot g(P, X_3, X_4, T_{I_h}, k_4) \sqrt{\frac{Q}{s}} \right] \vartheta(F_{0i}, \varphi, \kappa), \quad (7)$$

где $\xi(\gamma, Q, T_{I_h})$ – интенсивность электроэрозионного изнашивания, линейно зависящая от дугостойкости материала с учетом температурного градиента элемента трибопары; $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ – масштабные коэффициенты; X_1 – комплекс, X_3, X_4 – симплексы (см. уравнение (6)); k_1 – функционал, прямо пропорциональный по модулю величине контактного нажатия и логарифмически зависящий от рода тока и поляризации КЭ; k_2 – функционал, логарифмически зависящий от рода тока и поляризации КЭ; k_3 – коэффициент, учитывающий род тока (переменный или постоянный)

и полярность контактного элемента (анодно- или катодно-поляризованный); k_4 – симплекс, учитывающий содержание графита в материале; $\mathfrak{Z}(F_{oi}, \varphi, \kappa)$ – функционал, характеризующий состояние окружающей среды (температуру, влажность, запыленность); $\sigma_m \in [-1, 2]$ – коэффициент, учитывающий изменение параметров внешней среды в зоне контакта; F_{oi} – критерий Фурье.

Сравнение результатов расчета (рис. 1), полученных при использовании уравнений (4) и (7), с экспериментальными данными показывает, что их отклонение не превышает 6 %.

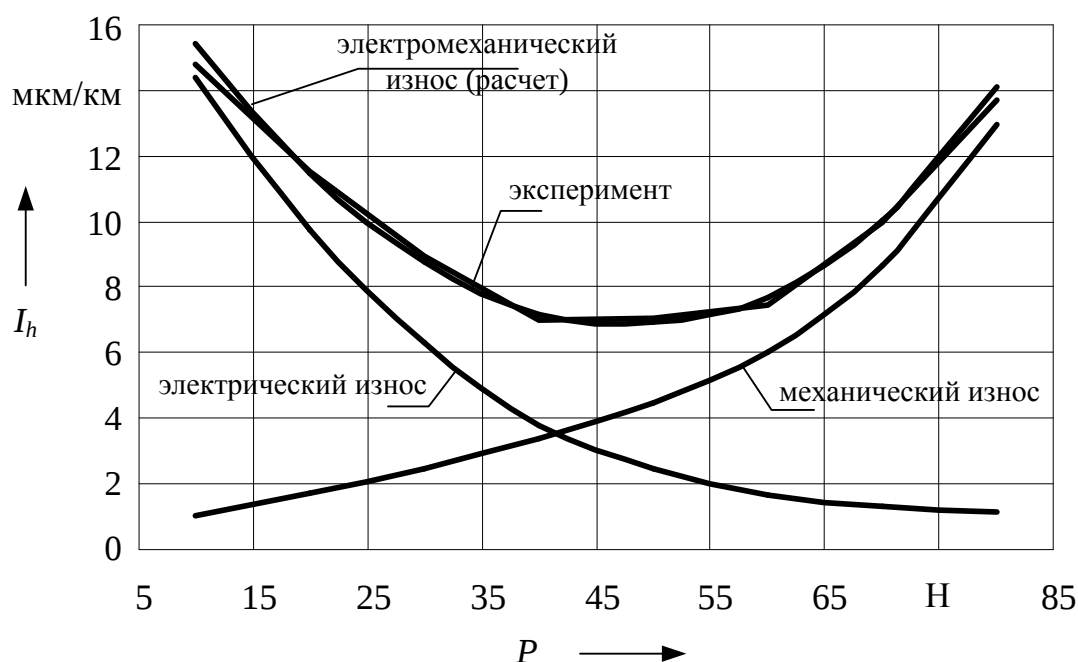


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости изнашивания КЭ из меднографитового композита (переменный ток)

Литература

1. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение, 1982. 191 с.
2. Ступаков С.А., Сидоров О.А., Филиппов В.М. Моделирование электрохимического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2012. Вып. 4. С. 23-30.
3. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследования изнашивания металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 351 с.

644074, г. Омск, пр. Комарова, 23, кв. 65. т.(3812) 767-405 (дом.),
e-mail: fvm-omgups@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛИВА ВОДЫ ИЗ ВОП-3 НА ВНЕШНЕЙ ПОДВЕСКЕ ВЕРТОЛЁТА Ка-32 ЧЕРЕЗ РАСПЫЛИТЕЛИ

И.В. Борисов, А.В. Ципенко

Технологический институт Южного федерального университета
в г. Таганроге

Приведена методика численного моделирования слива жидкости из водосливного устройства на внешней подвеске вертолета с учетом распыления на прямоугольной адаптивной сетке с приемлемыми параметрами ячеек. Результаты численного моделирования согласуются с результатами физического экспериментов с реальными объектами.

Актуальность разработки математических моделей потока воды из устройств для тушения пожаров, которые используются на летательных аппаратах (ЛА) не вызывает сомнения, так как позволяют определить оптимальные параметры управления ЛА и устройством слива воды и в конечном счете снизить ущерб от пожаров. В данной работе представлены результаты моделирования слива воды через распылители устройства ВОП-3, которое прикреплено на внешней подвеске вертолѐта Ка-32.

При распылении с вертолета необходимо учитывать, в отличие от самолета, положение контейнера на ВП. Авторами было проведено моделирование средствами FlowVision работы ВОП-3 на вертолете Ка-32 при скорости 38 км/ч с применением распыливающих устройств. Выбор объекта моделирования и режимов слива воды определялся возможностью сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, то есть возможностью проверки работоспособности разработанной методики. Подробно методика моделирования дана в работах [1, 2].

В ходе моделирования использовалась прямоугольная адаптивная расчетная сетка, приведенная на рис. 1-3 (точки визуализируют поток капель). Сравнение с результатами, полученными на более крупной сетке, показало, что используемой сетки достаточно для определения точек приземления частиц с точностью 20 см. Время расчета составило около 1000 часов на компьютере с одним процессором AMD 3 ГГц.

Результаты численного моделирования показывают, что часть распыливающего устройства (в задней полусфере ВОП-3) попадает в так называемую «тень», где сильны боковые пульсации скорости воздуха, поэтому капли из этой зоны будут рассеиваться максимально.

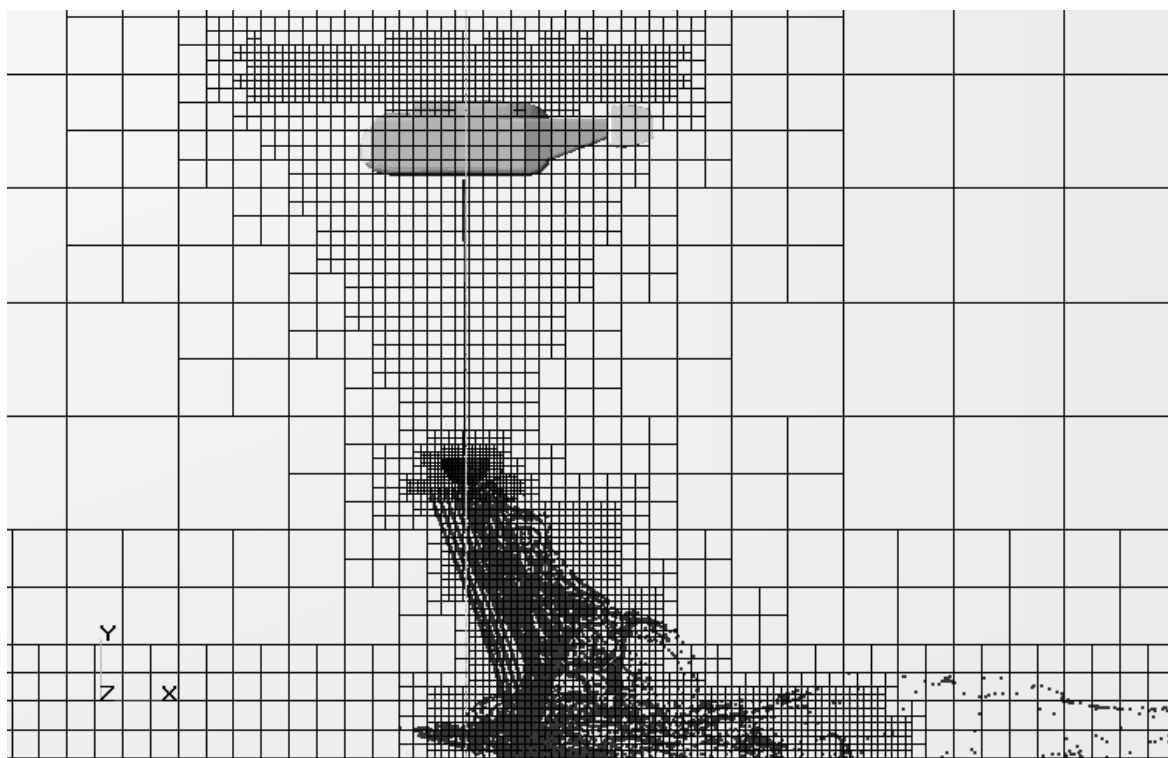


Рис. 1. Расчетная сетка (вид сбоку). Точки визуализируют поток капель

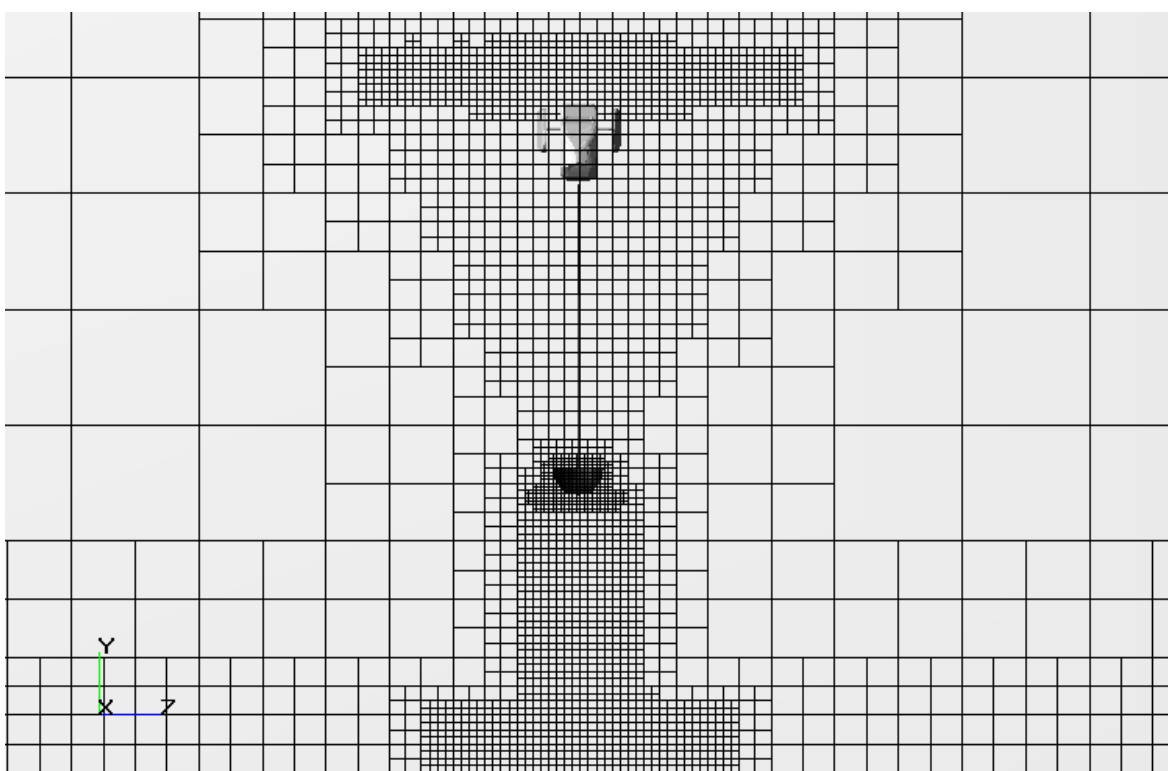


Рис. 2. Расчетная сетка (вид спереди)

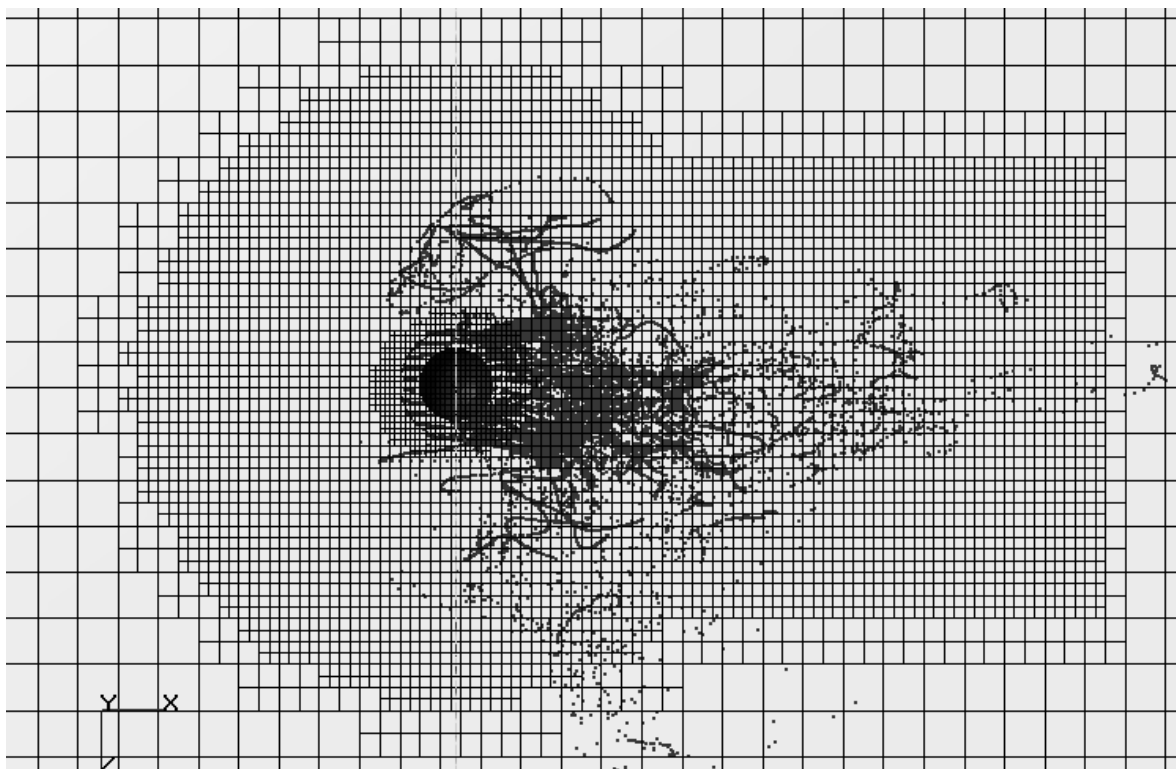


Рис. 3. Расчетная сетка (вид сверху)

Максимально деформируются траектории капель, вытекающих из задней полусферы ВОП-3. Капли, вытекающие из распылителей передней полусферы, отклоняются менее сильно и в одном направлении. Это вызвано тем, что капли из задней полусферы попадают в вихревой след и струю от НВ, которая разворачивается при взаимодействии с земной поверхностью. Этот разворот струи существенно влияет на траектории капель на небольшой (до 3 м) высоте, резко увеличивая боковое отклонение точек падения капель от плоскости симметрии ЛА. Именно этим взаимодействием определяется ширина орошаемой полосы. Иными словами, можно предположить, что с увеличением скорости полета ширина орошаемой полосы несколько уменьшится. Основная масса капель, вытекающих из распылителей передней полусферы, падает на землю в полосе шириной около 6м (левая часть синей фигуры), остальные капли разлетаются более широко.

Ширина смоченной полосы, куда попадает основная доля воды, составляет 12 ± 1 м, что полностью согласуется с результатами экспериментов «ПАНХ». Получены зависимости распределения концентрации воды, выпавшей на землю в некоторый момент времени (несколько сечений) при скорости полета Ка-32 37,5 км/ч. Итоговое количество воды на земле можно определить суммированием соответствующих распределений (с учетом смещения со скоростью полета всей картинки по отношению к

неподвижной земной поверхности). Отметим, в работе [3] было показано, что итоговое распределение близко к нормальному.

Сравнение результатов численного моделирования по методике, разработанной авторами, с экспериментальными данными «ПАНХ» показало практически полное их совпадение, что свидетельствует об эффективности предложенной методики моделирования.

Литература

1. Борисов И.В., Паршенцев С.А., Ципенко А.В. Моделирование слива жидкости из контейнера ВОП-3 на внешней подвеске вертолета с учетом потока от несущего винта // Известия ТТИ ЮФУ. Технические науки. 2009. № 2. С. 68-69.
2. Борисов И.В., Ципенко А.В.. Влияние потока от несущего винта вертолета на колебания массивного груза на внешней подвеске // Материалы XVI международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПИС-2009), г. Алушта, 25-31 мая 2009 г. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. С. 145-146.
3. Таликов Н., Шубняков Е., Слуцкий Г. Ил-76 и другие противопожарные бомбардировщики // Крылья Родины. 1996. № 4. С. 8-11.

347928, г. Таганрог, пер. Тургеневский, 44, ТТИ ЮФУ, каф. ЛА,
т. (8634)371697, e-mail: la@tsure.ru

УДК 532.529

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ОТ НЕСУЩЕГО ВИНТА И ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОКРУГ ВЕРТОЛЕТА И КОНТЕЙНЕРА НА ВНЕШНЕЙ ПОДВЕСКЕ

И.В. Борисов, А.В. Ципенко

Технологический институт Южного федерального университета
в г. Таганроге

Изложены особенности моделирования потока от несущего винта и поля скоростей вокруг вертолета и контейнера на внешней подвеске. Предложена расчетно-экспериментальная методика численного моделирования потока от несущего винта, в которой использованы экспериментальные зависимости, описывающие индуктивный поток от несущего винта как функцию скорости полета вертолета. Данный подход позволяет существенно сократить время расчетов при численном эксперименте.

Разработка эффективных моделей потока от несущего винта (НВ) и поля скоростей вокруг вертолета и контейнера на внешней подвеске (ВП) является важной, актуальной задачей, решение которой позволяет определить оптимальные параметры управления вертолетом и подвесным устройством без использования дорогостоящих физических экспериментов.

Такое моделирование является комплексной задачей, для решения которой используется известный подход [1], когда достаточно точный результат получают при суммировании (интегрировании) областей или элементов малого объема.

Традиционно используемые интегральные методики расчета потока от НВ позволяют определять среднюю скорость в зависимости от радиуса и расстояния от диска НВ. Однако, рассеивание частиц, дисперсность капель определяются не средними, а мгновенными скоростями в зоне ВП. Также от этих скоростей зависит и максимальная нагрузка на ВП.

Другим «крайним» способом является прямое численное моделирование обтекания лопасти газовым потоком при вращении ротора. По-видимому, на сегодня это наиболее точный метод расчета. Однако, такой способ требует огромной расчетной сетки и длительного времени расчета. Таким образом, существует проблема получения нестационарного поля скоростей под НВ, соответствующего экспериментальным данным.

В данной работе предлагается экономная расчетно-экспериментальная методика определения потока от НВ [2, 3], основанная на использовании экспериментальных данных об индуктивном потоке НВ при различных режимах полета и известных зависимостях вертикальной скорости от радиуса под плоскостью НВ. Тогда можно использовать зависимости, представленные в работах [4-8]. Так как на практике речь идет всего о нескольких типах вертолетов, то этот подход позволяет существенно снизить требования к используемым ЭВМ и сократить время расчетов, относительно недорог и максимально учитывает реальную форму летательного аппарата (ЛА) и положения лопастей НВ.

Представив нижние плоскости лопастей как источники воздушных струй, а верхние – как стоки (чтобы компенсировать прирост массы воздуха), можно подобрать распределение скорости по радиусу лопасти так, чтобы итоговая струя от НВ совпадала с наблюдаемой экспериментально при соответствующей полетной скорости. Фактически надо, используя выбранное распределение скорости как краевое условие, рассчитать поля скоростей вокруг вертолета и контейнера на ВП.

Были выполнены расчеты для вертолета Ка-32 с подвесными устройствами для тушения пожаров ВОП-3 и ВСУ (масса 3 тонны, расстояние от фюзеляжа до верхней кромки емкости 11 м). Система координат была связана с вертолетом, движущимся прямолинейно и равномерно. Распределение скорости вдоль лопасти приведено на рис. 1.

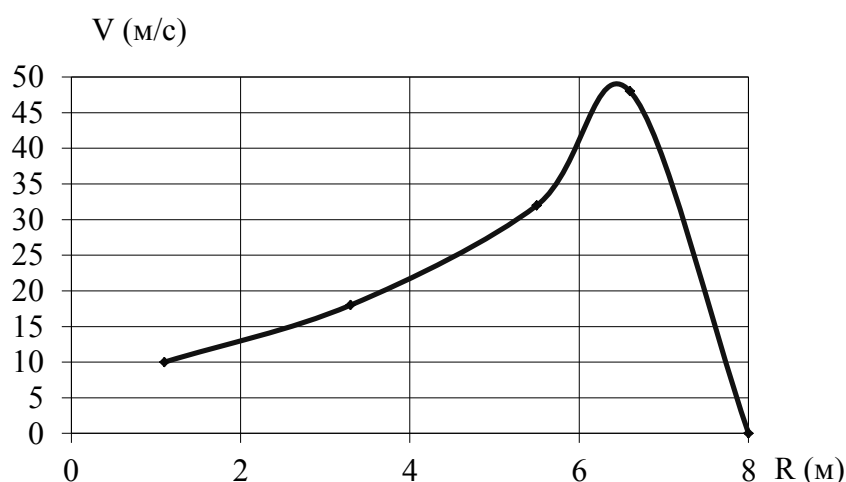


Рис. 1. Зависимость скорости газа, вытекающего вертикально вниз из нижней плоскости лопасти НВ, от расстояния до оси НВ (лопасть состоит из четырех участков с равномерной скоростью втекания-вытекания)

Сравнение положения тестовых частиц (они визуализируют концевые вихри, полученные расчетным путем) и зоны максимального модуля скорости на виде сбоку с экспериментально полученными в ЛИИ им. М.М. Громова положениями концевых вихрей показало, что выбранное в расчетах распределение скорости по радиусу НВ дает струю, соответствующую экспериментальной. Разброс расчетных точек относительно экспериментальных границ струи объясняется тем, что после эксперимента было проведено осреднение экспериментальных данных, а расчетные результаты даны в виде «мгновенных снимков». Также на рисунках видны все тестовые частицы, а не только те, что лежат в плоскости симметрии ЛА. Распределение модуля скорости и вертикальной скорости (графики на видах сбоку) в струе НВ в плоскости симметрии ЛА соответствует физической картине течения в таких потоках.

Расчеты показали, что такое распределение удастся подобрать, руководствуясь общей теорией НВ [9]. Отметим, что для всех рассмотренных вариантов скорости полета (138 км/ч, 106 км/ч, 50,6 км/ч, 37,6 км/ч, 5 км/ч) используется одно и то же распределение скорости по радиусу НВ, то есть это распределение можно использовать для всего диапазона скоростей горизонтального полета Ка-32.

Численное моделирование потока НВ на режиме висения вертолета показало, что наблюдается поджатие струи, что соответствует классической теории и эксперименту. Результаты численных экспериментов свидетельствуют, что ВОП-3 выходит из индуктивной струи НВ на скорости полета большей 40 км/ч, а заметный (более 10°) скос потока, вызванный индуктивной струей, сохраняется в зоне ВОП-3 до скорости полета

около 100 км/ч. Аналогичные результаты получены для Ка-32 с ВСУ. Следовательно, можно предположить, что на малых скоростях основное влияние на разброс частиц или капель оказывает струя НВ, а не турбулентность спокойной атмосферы.

При скорости полета 50,6 км/ч форма струи, определяемая по положению маркеров, визуализирующих концевые вихри, близка к экспериментальным данным для скорости полета 37,6 км/ч. Похожее изменение результатов получено и для скорости 108 км/ч при удвоении скоростей вдоль лопасти. Отсюда можно заключить, что распределение скорости вдоль лопасти НВ нельзя задавать произвольно. С другой стороны, управляя этим распределением скорости, можно получить согласие с экспериментальными данными и для вертолетов других типов.

Было проведено численное моделирование при режиме висения вертолета с учетом и без учета турбулентности. Сравнение показало, что влияние турбулентности на результаты расчета незначительно. Таким образом, для экономии времени расчета, можно проводить расчет от начального поля до получения близкой к реальной (имеющей физический смысл) картины течения по уравнениям Эйлера, а затем уточнять полученное течение с использованием модели турбулентности.

Численные эксперименты показали работоспособность предложенной расчетно-экспериментальной методики определения потока от НВ. Тот факт, что в расчетах зависимость скорости газа, вытекающего из нижней плоскости лопасти НВ, от расстояния до оси НВ одна и та же для всего диапазона скоростей горизонтального полета Ка-32, позволяет сократить число экспериментов по определению скорости под НВ для других типов вертолетов до 2 режимов (висение и полет с максимально разрешенной скоростью при предполагаемом грузе на ВП).

Литература

1. Болсуновский А.Л., Бузоверя Н.П., Чернышев И.Л. Гибридный генетический алгоритм оптимизации для задач аэродинамического проектирования // Аэродинамика летательных аппаратов: материалы XIII школы-семинара, п. Володарского 28 февр.-марта 2002 г. М.: Изд. отдел ЦАГИ, 2002. С. 21.
2. Борисов И.В., Паршенцев С.А., Ципенко А.В. Моделирование слива жидкости из контейнера ВОП-3 на внешней подвеске вертолета с учетом потока от несущего винта // Материалы VII междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2008), г. Алушта, 24-31 мая 2008 г. М.: Изд-во МАИ, 2008. С. 98-99.
3. Паршенцев С.А. Научные основы и практические методы проведения экстренных авиационных работ с применением внешней подвески вертолетов: дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. М., 2009.
4. Акимов А.И. и др. Летные исследования и анализ вихревой структуры винтов соосного вертолета // Труды I форума Российского вертолетного общества. М.: МАИ, 1994. С. 161-181.

5. Герасимов О.В., Крицкий Б.С. Исследование нестационарного обтекания семейства вертолетных профилей в широком диапазоне углов атаки и чисел Рейнольдса // Научный вестник МГТУ ГА. М.: МГТУ ГА. 2003. № 97. Сер. Аэромеханика и прочность. С. 50-53.
6. Миль М.Л. и др. Вертолеты. Расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 1966. Т.1. Аэродинамика.
7. Теория несущего винта / под. ред. А.К. Мартынова. М.: Машиностроение, 1973.
8. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD // DCW Industries, Inc. 1994. 460 p.
9. Борисов И.В., Паршенцев С.А., Ципенко А.В. Моделирование слива жидкости из контейнера ВОП-3 на внешней подвеске вертолета с учетом потока от несущего винта // Известия ТТИ ЮФУ. Технические науки. 2009. № 2. С. 68-69.

347928, г. Таганрог, пер. Тургеневский, 44, ТТИ ЮФУ, каф. ЛА,
т. (8634)371697, e-mail: la@tsure.ru

УДК 621.311.153.001.24

ОРТОГОНАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ К-ФУНКЦИЙ

А.В. Павлов

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассматривается алгоритм разложения графика электрической нагрузки на ортогональные составляющие на основе К-функций. На примере разложения показаны основные свойства К-функций и их связь с формой и дисперсией графика электрической нагрузки.

Согласно теории «К-функций», предложенной и разработанной профессором А.Э. Кажданом [1], любую произвольную функцию $P(x) \in L_2$ с помощью К-преобразований можно разложить в сходящийся ряд К-функций $K_i(x)$, являющихся линейными комбинациями равномерных сдвигов функций Радемахера соответствующих порядков [2].

$$P(x) = \sum_{i=0}^n K_i(x).$$

Согласно [1], множеством К-функций называется множество $M = \{K_0, K_1(x), \dots\}$ таких функций $K_i(x)$ из гильбертова пространства L_2 (интегрируемых с квадратом), заданных на сегменте $x \in [0, T]$, для каждой пары которых $K_i(x)$, $K_j(x)$ при любом сдвиге во времени $\tau \in [0, T]$

$$\int_0^T K_i(x) K_j(x - \tau) dx = 0.$$

Для определения К-функций любого графика электрической нагрузки в работе [1] приведён пошаговый алгоритм разложения.

Для иллюстрации указанного алгоритма рассмотрим разложение на К-функции исходного 24-ступенчатого графика электрической нагрузки, приведённого к 8-ступенчатому графику ($n=3$), показанному на рис. 1.

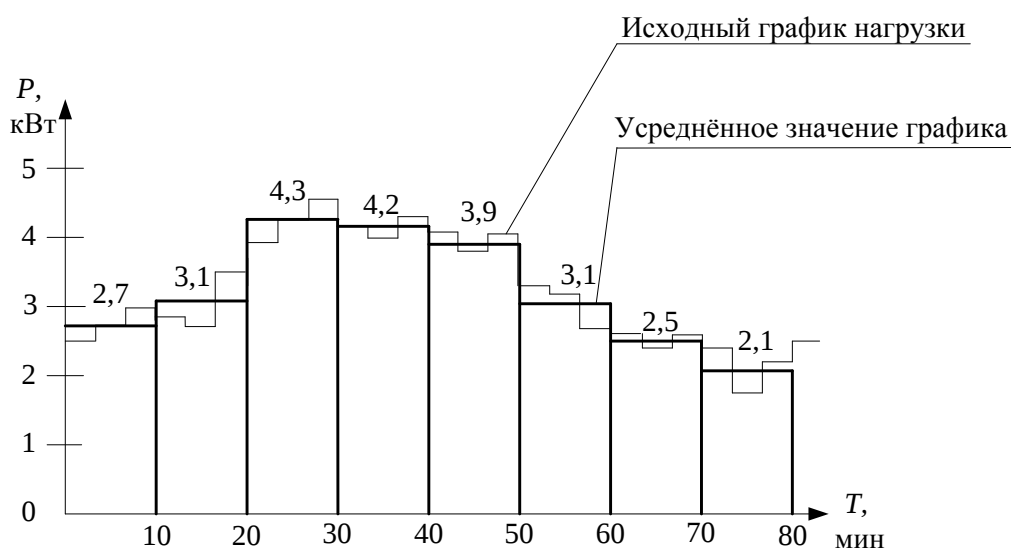


Рис. 1. График электрической нагрузки

Как видно из рис. 1, исходный график электрической нагрузки разбит на 2^n отрезков и усреднён на этих интервалах. При этом координаты границ отрезков определены из выражения $x = t \cdot T / 2^n$, при $n=3$, $t=0, 1, 2, \dots, 8$. (Шаг 1 алгоритма [1]). В результате усреднённый график примет значения $P=(2,7; 3,1; 4,3; 4,2; 3,9; 3,1; 2,5; 2,1)$.

Шаги 2 и 3 алгоритма разложения [1], можно свести к таблице (см. табл. 1), в каждой ячейке которой приведены расчётные формулы.

Таблица 1

Реализация Шага 2 и 3 алгоритма разложения на К-функции

Наименование	Значения			
Исходный график	P1	P2	P3	P4
	P5	P6	P7	P8
К-функции 1-го порядка	$(P1-P5)/2$	$(P2-P6)/2$	$(P3-P7)/2$	$(P4-P8)/2$
Разности 1-го порядка	$(P1+P2)/2=P1'$	$(P2+P6)/2=P2'$	-	-
	$(P3+P7)/2=P3'$	$(P4+P8)/2=P4'$	-	-
К-функции 2-го порядка	$(P1'-P3')/2$	$(P2'-P4')/2$	-	-
Разности 2-го порядка	$(P1'+P3')/2=P1''$	-	-	-
	$(P2'+P4')/2=P2''$	-	-	-
К-функции 4-го порядка	$(P1''-P2'')/2$	-	-	-
К-функции 0-го порядка	$(P1''+P2'')/2$	-	-	-
		-	-	-

В табл. 2 приведены результаты разложения усреднённого графика электрической нагрузки P .

Таблица 2

Разложение усреднённого графика P на К-функции

Наименование	Значения			
Исходный график	2,7	3,1	4,3	4,2
	3,9	3,1	2,5	2,1
К-функции 1-го порядка (K1)	-0,6	0	0,9	1,05
Разности 1-го порядка	3,3	3,1	-	-
	3,4	3,15	-	-
К-функции 2-го порядка (K2)	-0,05	-0,025	-	-
Разности 2-го порядка	3,35	-	-	-
	3,125	-	-	-
К-функции 4-го порядка (K4)	0,117	-	-	-
К-функции 0-го порядка (K0)	3,238	-	-	-
		-	-	-

Графическое изображение К-функций разложения исходного графика P приведены на рис. 2-5, а их значения в табл. 3.

Таблица 3

К-функции графика $P=(2,7, 3,1, 4,3, 4,2, 3,9, 3,1, 2,5, 2,1)$

К-функции	Значения							
	0	10	20	30	40	50	60	70
K1	-0,6	0	0,9	1,05	0,6	0	-0,9	-1,05
K2	-0,050	-0,025	0,050	0,025	-0,050	-0,025	0,050	0,025
K4	0,113	-0,113	0,113	-0,113	0,113	-0,113	0,113	-0,113
K0	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238	3,238
ΣK	2,7	3,1	4,3	4,2	3,9	3,1	2,5	2,1

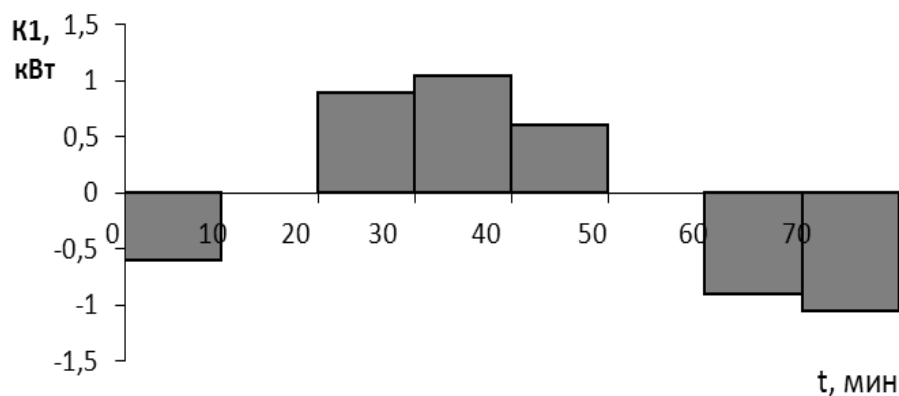


Рис. 2. График К-функций 1-го порядка исходного графика $P(t)$

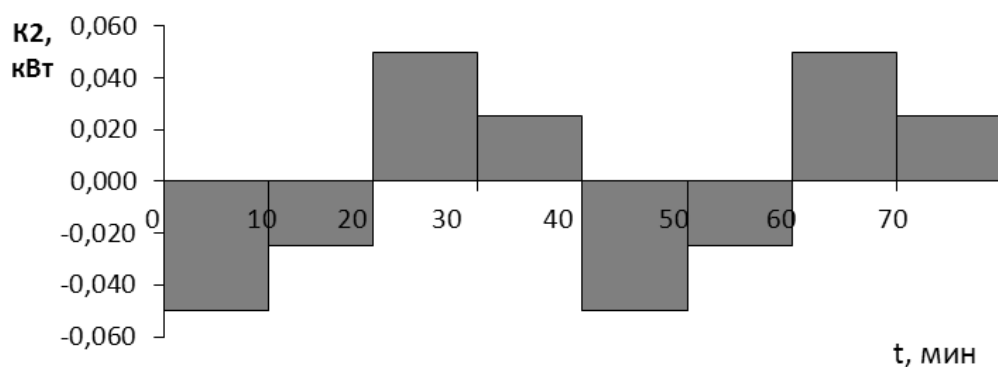


Рис. 3. График К-функций 2-го порядка исходного графика $P(t)$

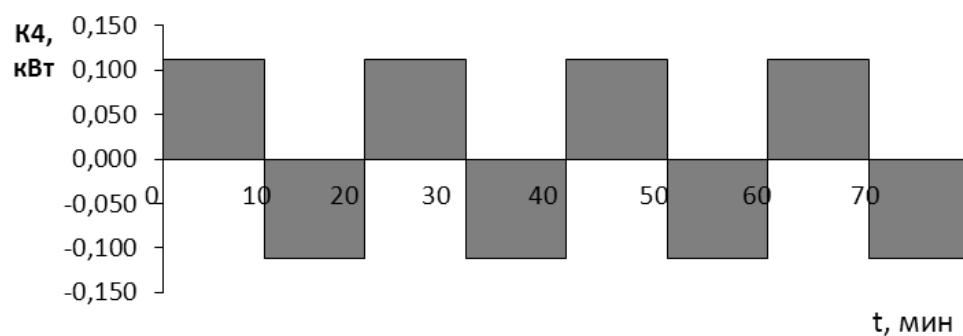


Рис. 4. График К-функций 4-го порядка исходного графика $P(t)$

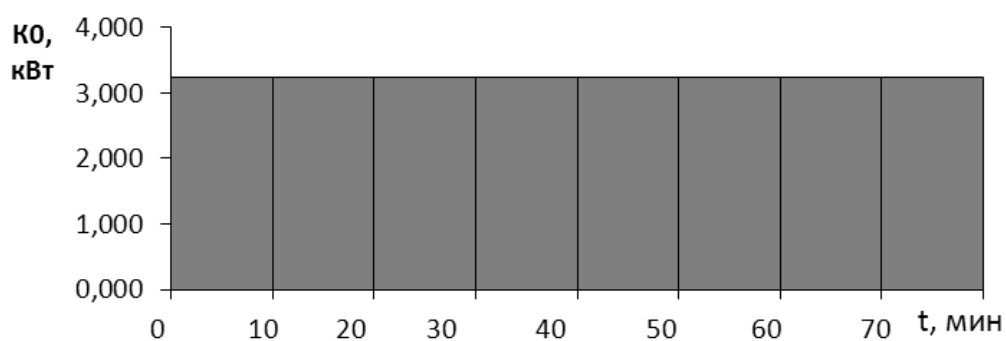


Рис. 5. График К-функций 0-го порядка исходного графика $P(t)$

Перечислим основные свойства К-функций, которые непосредственно видны из примера разложения:

1. Сумма всех n К-функций даёт исходный график (см. теорему о К-функциях в [1]);
2. К-функция нулевого порядка есть среднее значение исходного графика;
3. Эффективное значение суммарного графика равно корню квадратному из суммы квадратов эффективных значений К-функций разложения [3].

Эффективное значение исходного 8-ступенчатого графика:

$$P_{\vartheta} = \sqrt{\frac{2,7^2 + 3,1^2 + 4,3^2 + 4,2^2 + 3,9^2 + 3,1^2 + 2,5^2 + 2,1^2}{8}} = 3,326 \text{ кВт};$$

Эффективные значения К-функций:

$$K1_{\vartheta} = \sqrt{\frac{(-0,6)^2 + 0^2 + 0,9^2 + 1,05^2 + 0,6^2 + 0^2 + (-0,9)^2 + (-1,05)^2}{8}} =$$

$$= 0,754 \text{ кВт}$$

$$K2_{\vartheta} = 0,04 \text{ кВт}; K4_{\vartheta} = 0,113 \text{ кВт}; K0_{\vartheta} = 3,238 \text{ кВт};$$

$$P_{\vartheta} = \sqrt{K1_{\vartheta}^2 + K2_{\vartheta}^2 + K4_{\vartheta}^2 + K0_{\vartheta}^2} = \sqrt{0,754^2 + 0,04^2 + 0,113^2 + 3,238^2} =$$

$$= 3,326 \text{ кВт}.$$

Сумма квадратов эффективных значений К-функций разложения равна дисперсии суммарного графика:

$$P_{\vartheta}^2 = 11,064, \text{ кВт}^2, P_c^2 = 10,481 \text{ кВт}^2,$$

$$DP = P_{\vartheta}^2 - P_c^2 = 11,064 - 10,481 = 0,582 \text{ кВт}^2;$$

$$K1_{\vartheta}^2 + K2_{\vartheta}^2 + K4_{\vartheta}^2 = 0,568 + 0,002 + 0,012 = 0,582 \text{ кВт}^2.$$

Выводы:

Разложение на К-функции соответствует получению проекций исходного графика на некоторые ортогональные оси, отвечающие К-функциям определённого порядка. К-функции ортогональны при всех сдвигах и имеют меньший либо равный период по отношению к исходному графику.

Представление графиков в виде спектра К-функций открывает относительно новые пути для анализа индивидуальных и групповых графиков электрической нагрузки, получения расчётных значений дисперсии, среднеквадратического отклонения, среднего значения.

Литература

1. Каждан А.Э. Метод моделирования графиков процессов // Автоматизация проектирования сложных систем: межвуз. сб. Новочеркасск: НПИ, 1982. С. 11-20.
2. Асташкин С.В. Функции Радемахера в симметричных пространствах // Функциональный анализ. М., 2009. С. 3-161.
3. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. Л.: Энергия, 1971. 264 с.

К ВОПРОСУ О ФОРМАЛИЗАЦИИ МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

И.А. Спиридонова

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ),
г. Новочеркасск

Рассмотрены вопросы формализации авторского алгоритма построения макро-модели динамики механической системы при комплексном использовании элементов методов обобщенных энергетических фазовых переменных и уравнений Лагранжа второго рода.

Компьютерное моделирование динамики механической системы является актуальным в целом ряде практических приложений. Решение этой задачи требует комплексной разработки математической модели и соответствующего программного обеспечения ее численной реализации.

Как указывалось автором в рамках исследования темы моделирования динамики сложной механической системы [1-6], решение этой задачи допускает применение теоретических методов, допускающих формализацию – уравнений Лагранжа второго рода [2-7] или формального метода обобщенных энергетических фазовых переменных (ОЭФП) [1, 8]. Первоначальным этапом при этом выступает выделение подсистем (макроэлементов), каждая из которых имеет одну степень свободы. Математическое описание взаимодействия подсистем, таким образом, формирует макромоделю системы.

В качестве наглядного объекта макромоделирования для дальнейшего применения результатов в учебном процессе [1] может быть рассмотрена задача динамики поступательного движения механической системы, аналогичной приведенной на рис. 1, допускающая интуитивно понятную трактовку полученных результатов.

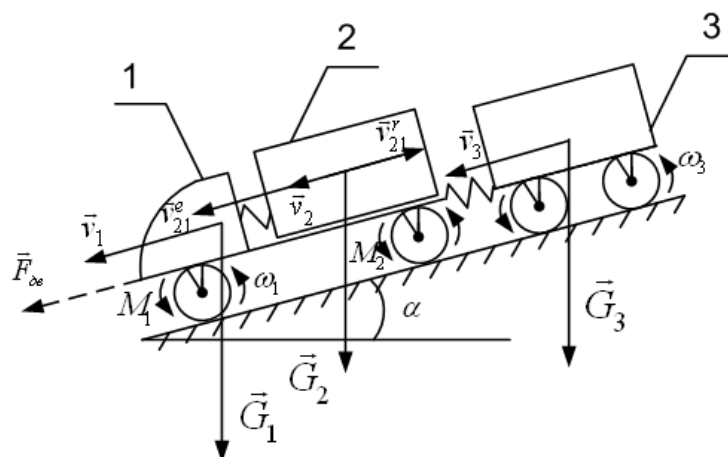


Рис. 1. Система с отображением дискретизации, активных сил и скоростей

В теоретической механике для описания динамики сколь угодно сложных механических систем со многими степенями свободы и различными типами движения элементов применяется классический метод составления уравнений Лагранжа второго рода [7], который допускает формализацию для применения современного объектно-ориентированного подхода к моделированию [3, 4].

Получение математической модели методами теоретической механики для системы со многими степенями свободы представляет собой весьма непростую задачу, требующую глубокого знания предметной области. Это связано с ростом сложности выражений для кинематических величин, определяющих положение, скорости и ускорения тел, входящих в систему, при увеличении длины кинематических цепей. Наглядной иллюстрацией этого положения является анализ разработанной автором в работе [3] обобщенной схемы информационных потоков для формализации построения математической модели методом уравнений Лагранжа второго рода и ее численного решения, которая представлена на рис. 2.

В качестве компромиссного решения данной проблемы может быть использована формализация этапа макромоделирования при помощи метода ОЭФП, исходно предназначенного для получения модели дискретной динамической системы в стандартной форме задачи Коши, удобной для компьютерной реализации.

Метод ОЭФП при корректном введении параметров элементов системы позволяет построить математическую модель [2, 8], полностью адекватную модели, полученной при помощи математического аппарата теоретической механики [3, 7]. При моделировании более сложных систем, включающих в себя тела, совершающие различные типы механического движения, метод ОЭФП требует составления весьма сложной комплексной системы схем и введения законов зависимости переменных из предметной области. Следует отметить, что полное выполнение алгоритма метода переменных состояния как частного случая метода ОЭФП, построенного автором для механической поступательной системы в работе [1], в соответствии с методологией [8], является избыточным, т.к. требует построения полной математической модели и дальнейшего разрешения ее алгебраической части для приведения к виду задачи Коши.

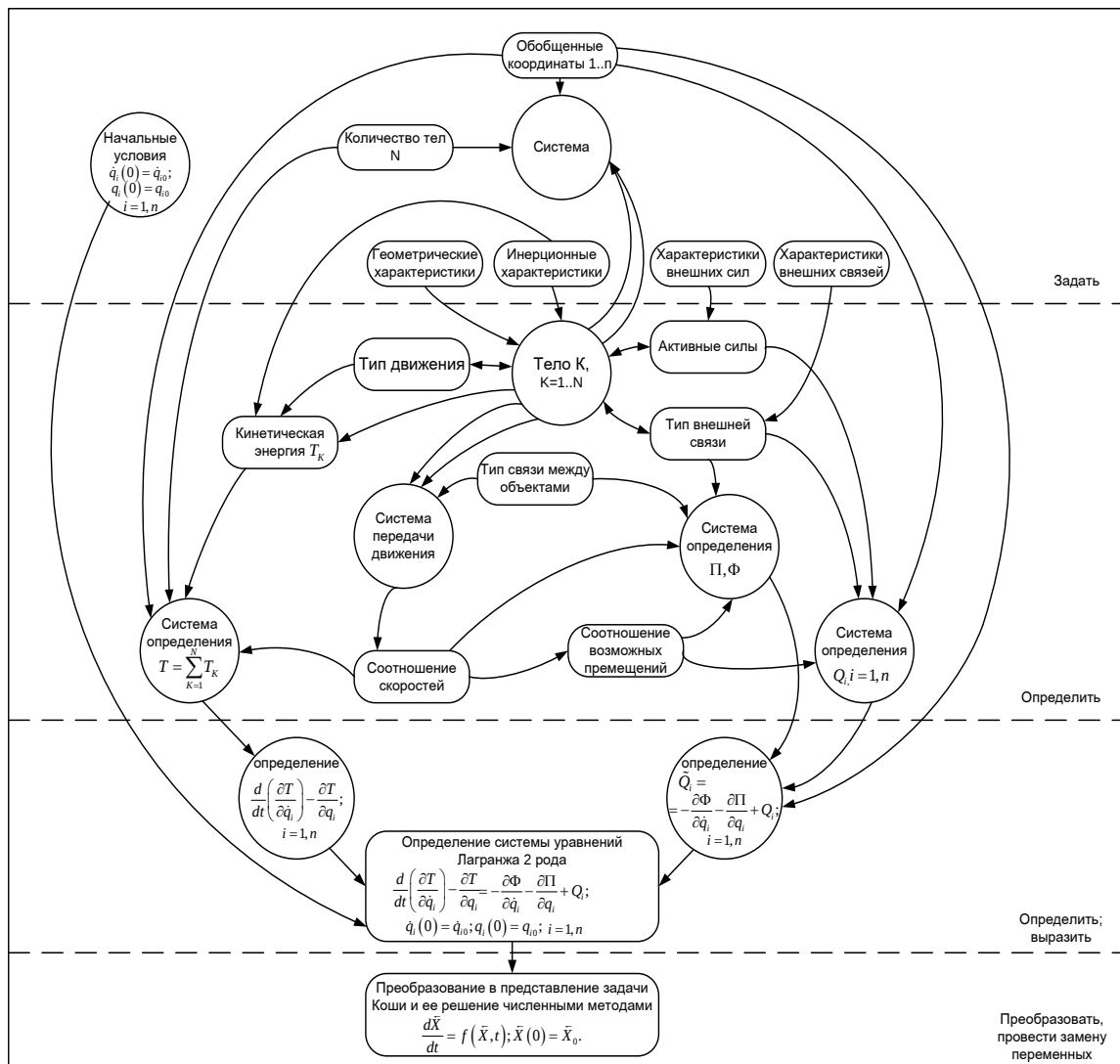


Рис. 2. Обобщенная схема построения уравнений Лагранжа второго рода

Как подробно рассмотрено в работах [5, 6], весьма рационально комплексное применение методов. Для этого следует сначала выделить подсистемы (макроэлементы) с одной степенью свободы; затем провести этап упрощенного моделирования методом уравнений Лагранжа второго рода для каждой подсистемы. При этом должны быть выполнены только те действия, которые позволят определить приведенную массу каждого макроэлемента и «движущую силу» системы, построение которых подробно рассмотрено в работах [5, 6]. Дальнейшее моделирование поступательного движения системы, состоящей из макроэлементов, достаточно провести методом ОЭФП по предлагаемой автором упрощенной методологии [6] с учетом ряда особенностей, существенно упрощающих построение математической модели динамики системы. В окончательную математическую модель механической системы [1, 2, 4-6], представленную в форме классической задачи Коши, входят только фазовые переменные скорости U_{m_i} и перемещения S_{m_i} для всех макро-

элементов, силы упругого взаимодействия $I_{L_{ji}} = F_{O_{ji}}^r$, а также силы, моделирующие внешнее воздействие (F).

На данном этапе представления материалов научно-методической работы автора могут быть предложены схематические представления информационных потоков для выполнения этапов построения макромоделли по упрощенной методологии применения метода ОЭФП.

На рис. 3 показаны информационные потоки выполнения этапа 1 авторского алгоритма: определения инерционных характеристик (приведенной массы) каждого макроэлемента и внешнего воздействие на систему по формулам, полученным в работах [5, 6]:

$$m_k = m_{i\delta}^{(k)} = \left(m_1^{(k)} + 2n \cdot m_2^{(k)} \cdot \left(1 + \left(\frac{i_2^{(k)}}{R_k} \right)^2 \right) \right)$$
, где $m_1^{(k)}$ – масса основного элемента; $m_2^{(k)}$ – масса каждого колеса; R_k – радиус колеса; $i_2^{(k)}$ – радиус инерции колеса.

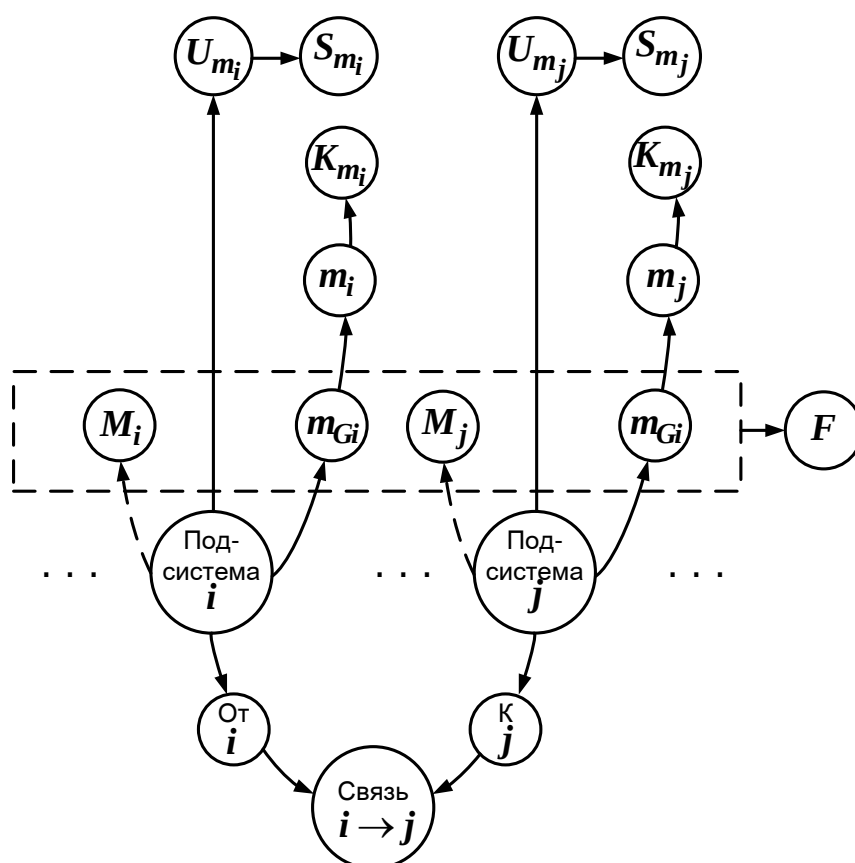


Рис. 3. Схема информационных потоков определения инерционных характеристик макроэлементов и внешнего воздействия на систему

Сила воздействия на систему, вызывающего ее поступательное движение по наклонной поверхности состоит из двух частей: $F = F_1 = F_{\ddot{a}\ddot{a}} + m_C \cdot g \cdot \sin \alpha$. Эта сила, как доказано при построении уравнений Лагранжа второго рода в работах [2, 5, 6], непосредственно приложена к движущему макроэлементу, однако при движении по наклонной поверхности зависит от массы всей системы m_C , где $m_C = m_{1G} + m_{2G} + m_{3G}$ – суммарная масса всех элементов системы, а не их приведенных аналогов. При движении по наклонной плоскости вверх $F = F_1 = F_{\ddot{a}\ddot{a}} - m_C \cdot g \cdot \sin \alpha$. При движении по горизонтальной поверхности, естественно, воздействие $F = F_1 = F_{\ddot{a}\ddot{a}}$. Движущая сила $F_{\ddot{a}\ddot{a}} = \frac{(M_1 + M_2)}{R_1}$ порождена сцеплением ведущих колес с опорной поверхностью и зависит от моментов, приложенных к осям ведущих колес.

На рис. 4 показаны информационные потоки построения составляющих уравнений математической модели в форме задачи Коши без выполнения промежуточных этапов базового метода ОЭФП.

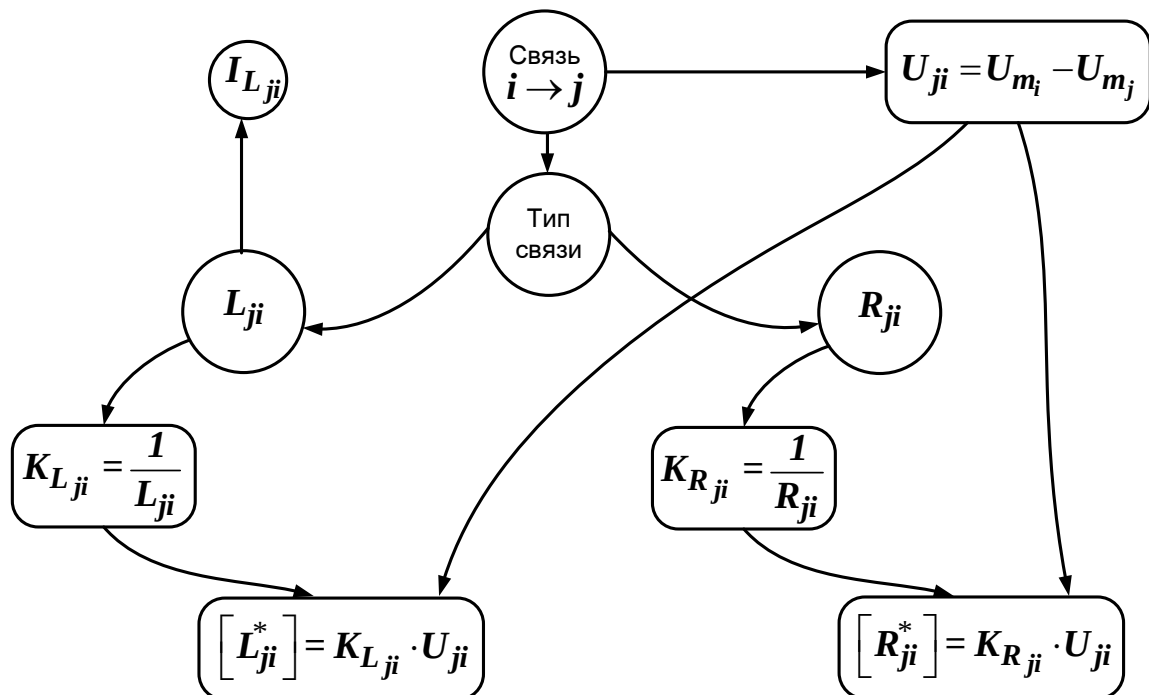


Рис. 4. Схема информационных потоков построения составляющих уравнений математической модели в форме задачи Коши

Для формализации построения уравнений задачи Коши может быть введена матрица коэффициентов составляющих, где в табличной форме содержатся признаки и знаки вхождения в уравнение моделируемых

эффектов трения R_{j0} , R_{ji} , упругого взаимодействия L_{ji} и внешнего воздействия F :

№ m_{np}	...	$[R_{j0}^*]$	...	$[R_{ji}^*]$	...	$I_{L_{ji}}$	...	F
1		0		0		0		+1
$\vdots$								
i		-1		-1		-1		0
$\vdots$								
j		0		+1		+1		0
$\vdots$								
N		0		0		0		0

В качестве примера можно привести формальное представление математической модели, полученной в работе [6] для механической системы, рассмотренной на рис. 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{L_{21}}}{dt} = [L_{21}^*]; \\ \frac{dI_{L_{31}}}{dt} = [L_{31}^*]. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{m_1}}{dt} = K_{m_1} \cdot ((-1) \cdot [R_{21}^*] + (-1) \cdot I_{L_{21}} + (-1) \cdot I_{L_{31}} + (+1) \cdot F); \\ \frac{dU_{m_2}}{dt} = K_{m_2} \cdot ((+1) \cdot [R_{21}^*] + (+1) \cdot I_{L_{21}}); \\ \frac{dU_{m_3}}{dt} = K_{m_3} \cdot ((+1) \cdot I_{L_{31}}). \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_{m_1}}{dt} = U_{m_1}; \\ \frac{dS_{m_2}}{dt} = U_{m_2}; \\ \frac{dS_{m_3}}{dt} = U_{m_3}; \end{array} \right.$$

Полученная система уравнений, естественно, должна быть дополнена однозначным определением начальных условий движения.

Литература

1. Спиридонова И.А. Моделирование динамики механической системы методом ОЭФП: учеб.-метод. пособие к лаб. и дом. заданию по курсу «Компьютерное моделирование» / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. 88 с.
2. Спиридонова И.А. Математическое моделирование поступательного движения механической системы // Моделирование. Теория, методы и средства: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, март 2011 г. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011. С. 10-19.
3. Спиридонова И.А. Формализация математического моделирования динамики механической системы методом уравнений Лагранжа второго рода // Результаты исследований – 2011: материалы 60-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотр., асп. и студ. ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011. С. 94-99.

4. Спиридонова И.А., Поляков Р.С. Компьютерное моделирование динамики сложной механической системы // Студенческая научная весна - 2011: материалы регион. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых вузов Ростовской области / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2011. С. 301-303.
5. Спиридонова И.А. К вопросу о двухэтапном построении модели динамики сложной механической системы // Моделирование. Теория, методы и средства: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, февраль 2012 г. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012. С. 70-80.
6. Спиридонова И.А. Особенности применения формального метода обобщенных энергетических фазовых переменных для макро моделирования сложной механической системы // Результаты исследований – 2012: материалы 61-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотр., асп. и студ. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. С. 25-36.
7. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. СПб.: Изд-во Лань, 2010. Т. 2. 640 с.
8. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 336 с.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, т. 2-55-2-95,
e-mail: **SIA1706@yandex.ru**

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Абашев В.М., Ляшенко А.И. Выбор оптимальной схемы конструкции ракетного двигателя твердого топлива с помощью экспертной системы «РЫСЬ»	4
Аббасова Т.С. Математическое и имитационное моделирование солнечных возобновляемых источников энергии	8
Анищенко А.А. Моделирование покрывающего дерева, минимизирующего стоимость трафика в сети	10
Аристов И.О., Локтев М.М., Грошев А.Е. Электронное сердце ДВС	14
Беликов И.Ю. Аппаратная реализация параметров фонемной модели на основе языка <i>VHDL</i>	16
Бородай А.В. Об эффектах поглощения энергии связи и формирования геометрического профиля поверхностей как факторе самоорганизации систем ...	17
Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф. Математическое моделирование распространения импульса давления по нефтепроводу для обнаружения утечек	23
Делицын Л.Л. Обобщенная модель CGS с силой смертности, зависящей от возраста	25
Кошель Д.А., Винник Е.А., Грошев А.Е. Интеллект в тормозной системе автомобиля	32
Крыгин А.Н. Математическая модель тягово-энергетической установки электровоза переменного тока в режиме тяги	34
Куций Д.Н. Интеллектуальная информационная система формирования методического обеспечения учебных дисциплин на основе ресурсов сети Интернет	39
Лубенцова Е.В., Масютина Г.В. Компьютерные технологии при многокритериальной оценке и выборе технических и алгоритмических решений АСУТП в нечеткой среде	43
Ляшенко А.И., Абашев В.М. Метод расчета объемной статической прочности сложных оболочечных конструкций	46
Маркарян Н.Р. Исследование зависимости периодической составляющей вектора напряженности геомагнитного поля от географических координат точки наблюдения	50
Москалёва О.Г., Белякова Л.А., Фёдоров А.А., Немых В.А. Исследование линейной системы управления	52

Нгуен К.У., Соломенцев К.Ю., Новоселова О.А., Рассохина А.Б., Овсянников А.Ю., Харченко Р.Е. Анализ метода ускоренного измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов	58
Панфилов А.Н., Погорелов А.С. Модель принятия решений на основе нечеткой информации	59
Логанчук М.Л., Саввина К.Д. Измеритель акустического импеданса жидких сред высокого разрешения	62
Савёлов Н.С., Кочнев А.В. Развитие метода анализа электронных схем и результаты вычислительных экспериментов	66
Савёлов Н.С., Хлынцев С.Г. Новый метод параметрического синтеза электронных схем	69
Ситников Ю.К. Информационные технологии в электронике: сопровождение лабораторных занятий моделированием в программной среде Micro CAP	73
Скориков А.В., Шишка В.Г., Бережной Ю.М., Пономарев В.Ю., Литвинов Т.В. Математическое описание процесса химического превращения, протекающего при нанесении Ni-P покрытий	76
Степовая Н.А., Пешкова Л.В. Особенности моделирования процесса абсорбции в производстве азотной кислоты	78
Троицкий А.И., Костинский С.С., Ситникова И.Н., Авраменко В.В., Новикова Е.В. Анализ измерений, проведенных на модели «трансформатор 10(6)/0,4 кВ – несимметричная нагрузка»	84
Троицкий А.И., Хуажев А.К. Моделирование «несимметричных нагрузок» с целью снижения потерь мощности внутренним симметрированием	89
Филиппов В.М., Ступаков С.А., Фролова О.П., Орлов А.А. Математическая модель изнашивания контактных элементов токоприемников электроподвижного состава	95
Борисов И.В., Ципенко А.В. Моделирование слива воды из ВОП-3 на внешней подвеске вертолёта Ка-32 через распылители	99
Борисов И.В., Ципенко А.В. Особенности моделирования потока от несущего винта и поля скоростей вокруг вертолета и контейнера на внешней подвеске	102
Павлов А.В. Ортогональное разложение графика электрической нагрузки на основе К-функций	106
Спиридонова И.А. К вопросу о формализации макро моделирования сложной механической системы	111

Научное издание

**Моделирование.
Теория, методы и средства**

Материалы XIII Международной научно-практической конференции

Подписано в печать 20.03.2013.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 6,98. Тираж 300 экз. Заказ 46-289.

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт)

Адрес университета:

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Отпечатано в ИД «Политехник»

346400, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166. Тел. 227-097