



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

*Сборник статей по материалам
XLI международной научно-практической конференции*

№ 12 (37)
Декабрь 2014 г.

Издается с октября 2011 года

Новосибирск
2014

УДК 62
ББК 30
Т 38

Ответственный редактор: Гулин А.И.

Председатель редакционной коллегии:

Ахметов Сайранбек Махсutowич — д-р техн. наук, проф., ректор Казахстанского университета инновационных и телекоммуникационных систем (КазУИТС), академик РАЕН, действительный член (академик) Национальной инженерной академии Республики Казахстан, заместитель председателя Западно-Казахстанского филиала НИА РК, директор Представительства Казахской академии экологии и безопасности жизнедеятельности» в г. Уральск.

Редакционная коллегия:

Ахмеднабиев Расул Магомедович — канд. техн. наук, доц. Полтавского национального технического университета им. Ю. Кондратюка;

Барштейн Виктор Юрьевич — канд. тех. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией Государственного учреждения «Институт пищевой биотехнологии и геномики Национальной академии наук Украины» (ИПБГ НАН Украины).

Елисеев Дмитрий Викторович — канд. техн. наук, доцент, бизнес-консультант Академии менеджмента и рынка, ведущий консультант по стратегии и бизнес-процессам, «Консалтинговая фирма «Партнеры и Боровков»;

Копылов Алексей Филиппович — канд. техн. наук, доц. кафедры Радиотехники Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета;

Романова Алла Александровна — канд. техн. наук, доц. кафедры прикладной физики Санкт-Петербургского государственного экономического университета.

Т 38 Технические науки — от теории к практике / Сб. ст. по материалам ХLI междунар. науч.-практ. конф. № 12 (37). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. 130 с.

Учредитель: НП «СибАК»

Сборник статей «Технические науки — от теории к практике» включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

При перепечатке материалов издания ссылка на сборник статей обязательна.

Оглавление

Секция 1. Информатика, вычислительная техника и управление 6

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ 6

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Власов Валерий Иванович

Воротникова Татьяна Сергеевна

Авакян Тамара Ашотовна

Есюнина Наталья Николаевна

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 12

СЕЛЕКТОРА СИНГУЛЯРНОГО ЭСТИМАТОРА
МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОСНОВНОГО ТОНА РЕЧИ

Вольф Данияр Александрович

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА 24

НА УЛЬТРАСОНОГРАММАХ

Данг Нгок Хоанг Тхань

Фам Конг Тханг

Фан Зуй Тунг

СИНТЕЗ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ 29

ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Змеу Константин Виталиевич

Ноткин Борис Сергеевич

Онча Юлия Густавовна

ПОСТРОЕНИЕ ЦЕНТРОВ МОНИТОРИНГА 42

ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И ТЕХНОЛОГИЙ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Сергушев Алексей Геннадьевич

Секция 2. Машиностроение и машиноведение 49

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ НЕПОДВИЖНЫХ 49

ДЕБАЛАНСОВ УПРАВЛЯЕМОЙ ВИБРАЦИОННОЙ
МАШИНЫ

Черевко Александр Николаевич

Секция 3. Энергетика и энергетические техника и технологии	59
ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА Николаев Михаил Юрьевич Есимов Асет Мухаммедович Леонов Виталий Владимирович	59
ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В КАБЕЛЕ И ТРАНСФОРМАТОРЕ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ФОРМЫ КРИВОЙ ТОКА Осипов Дмитрий Сергеевич Мохова Дарья Владимировна Киселёв Богдан Юрьевич Сатпаев Дмитрий Сергеевич	66
Секция 4. Аэрокосмическая техника и технологии	78
МЕТОД КОНФИГУРАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ В ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АППАРАТНЫХ УРОВНЕЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА Савкин Леонид Васильевич	78
Секция 5. Строительство и архитектура	89
ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРИРАЩЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСЧЁТА МЕМБРАННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ Амоян Миша Фрикович Алиев Ариз Алихан оглы Ким Алексей Юрьевич	89
ОБЗОР МЕТОДОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД Максимов Сергей Павлович Алексеев Иван Андреевич	95
ДИЛАТОМЕТРИЯ ФАНЕРЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ТЕПЛОВОМУ СТАРЕНИЮ И УФ-ОБЛУЧЕНИЮ Мамонтов Семен Александрович Киселева Олеся Анатольевна	101

Секция 6. Технология материалов и изделий легкой промышленности	107
ГЕНЕРАЦИЯ КОМПЛЕКТОВ ОДЕЖДЫ ИЗ ОПТИМАЛЬНОГО АССОРТИМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ Евдущенко Елена Владимировна	107
Секция 7. Безопасность жизнедеятельности человека, промышленная безопасность, охрана труда и экология	115
АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ МНОГОЛЕТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ АФРИКИ Коваленко Виктор Васильевич Гайдукова Екатерина Владимировна Диавара Хамиду Бонгу Эрнесто	115
Секция 8. Нанотехнологии и наноматериалы	124
КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАПЛИ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ Алабужев Алексей Анатольевич Кашина Марина Анатольевна	124

СЕКЦИЯ 1.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Власов Валерий Иванович

*канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматизированных систем управления»
Московского государственного университета
приборостроения и информатики филиал,
РФ, г. Ставрополь
E-mail: vlasov_v.i@rambler.ru*

Воротникова Татьяна Сергеевна

*канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматизированных систем управления»
Московского государственного университета
приборостроения и информатики филиал,
РФ, г. Ставрополь*

Авакян Тамара Ашотовна

*доцент кафедры «Автоматизированных систем управления»
Московского государственного университета
приборостроения и информатики филиал,
РФ, г. Ставрополь*

Есюнина Наталья Николаевна

*учитель физики высшей категории,
руководитель ГМО учителей физики г. Пятигорска,
Почетный работник общего образования
РФ, г. Пятигорск*

DIRECTIONS INCREASED NOISE IMMUNITY OF DATA TRANSMISSION CHANNELS NETWORKS

Valery Vlasov

Ph.D., associate Professor of the Department "Automated Control Systems", Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics branch, Russia, Stavropol

Vorotnikova Tatiana

Ph.D., associate Professor of the Department "Automated Control Systems", Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics branch, Russia, Stavropol

Avakian Tamara

associate Professor of "Automated Control Systems", Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics branch, Russia, Stavropol

Esyunina Natalia

physics teacher of the highest category, head of GMO physics teachers in Pyatigorsk, Honorary Worker of General Education, Russia, Pyatigorsk

АННОТАЦИЯ

Выбор путей повышения помехоустойчивости КПД, при воздействии на КПД структурных, аддитивных и мультипликативных помех.

Для сигналов с ДЧМ возможно использование коэффициента взаимной корреляции сигналов и помех для определения взаимортогональных несущих частот сигналов и помех; для сигналов с QAM в целях снижения аддитивных широкополосных помех использовать амплитудные детекторы, а частотные детекторы использовать для борьбы с мультипликативными и узкополосными помехами.

Данные исследования могут быть использованы в технике.

Использование исследований позволят повысить помехозащищенность КПД.

ABSTRACT

The choice of ways to improve the efficiency of noise immunity, when subjected to structural efficiency, additive and multiplicative noise.

For signals with DCHM possible to use cross-correlation coefficient signals and interference to determine A mutually carriers signals and noise; for QAM signals in circuits to reduce the additive broadband noise to use the amplitude detector and frequency detector used to fight with multiplicative and narrowband interference.

These studies can be used in the art.

Using the research will improve the efficiency of immunity.

Ключевые слова: канал передачи данных; модуляция; помеха; частота.

Keywords: data channel; modulation; interference; frequency.

В мире, где возникает угроза ошибок принятия решений информационно-вычислительными комплексами при автоматизации производства или управления сложными техническими системами по причине возникновения ошибок при обработке цифровой информации, возможность и необходимость автоматизировать контроль работы информационных управляющих систем, автоматически исправлять ошибки управляющих сигналов становится главной задачей человечества.

Недостатком существующих автоматизированных систем управления является низкая достоверность восстановления цифровых сигналов каналов передачи данных (КПД) с использованием с дискретной частотной модуляцией (ДЧМ) и многоуровневой многофазовой квадратурной амплитудной модуляцией (QAM) при воздействии на канал передачи данных структурных ретранслированных, аддитивных и мультипликативных помех.

Цель — выбор и обоснование путей повышения помехоустойчивости КПД для снижении ошибок, возникающих в КПД при воздействии на канал передачи данных структурных ретранслированных, аддитивных и мультипликативных помех.

Задача состоит в выборе путей повышения качества каналов передачи данных с дискретной частотной модуляцией (ДЧМ) и с многофазовой многоуровневой квадратурной амплитудной модуляцией (QAM).

Рассмотрим канал с ДЧМ. Так как перекрытие на частотно-временной плоскости полезного сигнала с мешающими сигналами является аналогом периодической взаимнокорреляционной функцией этих сигналов, то в качестве показателя взаимодействия сложного сигнала и структурной помехи выбираем коэффициент их взаимной корреляции [1; 3; 4]

$$g_r = \left| \int_0^T S_r(t) S_n^*(t) dt \right| / (4P_r P_n T^2) \quad (1)$$

$$R=1, \dots, m, \quad (1)$$

где: $S_r(t)$, $S_n(t)$ — комплексная форма представления соответственно r -го варианта сигнала и помехи;

$S^*(t)$ — функция комплексно сопряженная с $S_n(t)$;

P_r , P_n — мощность соответственно сигнала и помехи;

r — число вариантов сигнала;

T — длительность варианта сигнала. Данный показатель учитывает влияние помехи не только на пораженный элемент сигнала, но и на весь сигнал в целом. Сигнал с ДЧМ, синтезируемый в результате скачкообразного изменения несущей частоты по закону некоторой периодической с периодом T последовательности при неизменных амплитуде U_m и шаге квантования по времени и частоте, представляем в следующем виде:

$$S_r(t) = U_m \sum_{k=1}^N \text{rect}[t - (k-1)\tau_0] \exp[j(\omega_{rkt} + \psi_{rk})] \quad (2) \quad t \in [0, T] \quad r = 1, \bar{m}; \quad \psi$$

где N — количество элементов сложного сигнала

$$\text{rect}[t - (k-1)\tau_0] = \begin{cases} 1, & t \in [(k-1)\tau_0, k\tau_0] \\ 0, & t \notin [(k-1)\tau_0, k\tau_0] \end{cases}$$

где: τ_0 — длительность элемента сигнала, определяющего шаг квантования по времени

$\omega_{rk} = \omega_{nc} + (\delta_{rk} - \delta_0)\Delta\omega_0$; $\Delta\omega_0 = \gamma 2\pi / \tau_0$ — минимальный частотный сдвиг несущей ω_{nc} частоты сигнала, определяющий шаг квантования по частоте;

$\{\delta_{k=1, \bar{N}}\}$ — манипулирующая последовательность r -го варианта сигнала;

δ_0 — некоторое постоянное число;

$\gamma=1,2$, — коэффициент, обеспечивающий выполнение условия ортогональности каждого k -го элемента сигнала;

Ψ_{rk} — начальные фазы k -х составляющих r -го сигнала.

Структурная помеха, представляющая собой мешающий сигнал, построена по тому же принципу, что и полезный сигнал:

$$S_n(t) = U_m \sum \text{rect}[t - (k-1)\tau_n] \exp[j(\omega_{nkt} + \Psi_{nk})], \quad (3)$$

$\tau_n = \tau_0 - \Delta\tau$; $\Delta\tau$ -приращение длительности элемента помехи, обусловленное расстройкой тактовых частот сигнала и помехи.

$$\omega_{nk} = \omega_{np} + (\delta_{nk} + \delta_0)\Delta\omega_n \Delta\omega_p = \gamma 2\pi / \tau_n \quad (4)$$

где: ω_{nn} — несущая частота структурной помехи.

$\Delta\omega_n$ — приращение частоты элемента помехи на каждом элементе манипулирующей последовательности варианта сигнала за время τ_n

Ψ_{nk} — начальные фазы k -х составляющих n -ой помехи.

Полагаем, что кодовые структуры помехи и сигнала совпадают, что имеет место при воздействии ретрансляционных или имитационных типов помех, т. е. $\Psi_{nk} = \Psi_{rk}; \delta_{nk} = \delta_{rk}$.

Подставляя (2) и (3) в выражение (1) и учитывая условие (4) после несложных преобразований и при совпадении тактовых частот формирователей сигнала и помехи ($y=0$) получаем выражение для комплексного показателя степени взаимодействия сигнала и помехи:

$$g_r = |\sin c(\pi x) \sum_{k=1}^N \exp[j\pi x(2k-1)]|^2 / N^2 \quad (5)$$

Из полученного выражения видно, что показатель, является более чувствительным к изменениям параметра y (в области целых приращений $\Delta\tau$), чем при варьировании параметра x , где y — плоскость тактовых частот, а x — плоскость несущих частот сигнала и помехи.

Изменение значения g_r нужно рассматривать в плоскости x . Из выражения (5) можно заметить, что коэффициент взаимной корреляции сигнала и помехи в плоскости x принимает значения нуля при определенных расстройках несущих частот сигнала и помехи, то есть сигнал и помеха становятся взаимно ортогональными или другими словами сигнал оптимален для данной помехи. Если же произойдет расстройка тактовых частот, то есть плоскость x сместится по оси y , то из выражения (5) видно, что коэффициент взаимной корреляции сигнала и помехи никогда не может быть равным нулю. То есть при не совпадении тактовых частот сигнала и помехи условия их ортогональности при сканировании несущей частоты сигнала f соблюдаться не будут.

Если значение g_r равно 0, то имея значение кодов несущих частот, при которых сигнал и помеха взаимно ортогональны можно выбрать сигнал, оптимальный к воздействию структурной ретранслированной помехи.

В современных модемах осуществляется модуляция цифрового кода, поступающего из информационного выхода компьютера в модулятор в аналоговый сигнал многофазовой многоуровневой квадратурной

амплитудной модуляцией (QAM) [2]. При воздействии мультипликативной помехи на линию связи канала передачи данных будет наблюдаться общее снижение амплитуд всех элементов аналогового сигнала. В этом случае демодулятор будет распознавать сигнал, но выдавать на выходе ложный цифровой код, обусловленный синусоидальными и косинусоидальными составляющими с правильными фазами, но с ложными амплитудами. Причем, чем больше сигнальное созвездие, тем ближе находятся амплитуды аналогового сигнала, определяющие различный цифровой код, тем система связи более чувствительна к погрешностям амплитуд и, как следствие, достоверность цифрового сигнала на входе компьютера будет низка.

При воздействии аддитивной помехи, происходит суммирование энергии помехи с энергией сигнала. При амплитудной многоуровневой многофазовой квадратурной модуляции, демодулятор строго реагирует на величину амплитуд и фаз синусоидальных и косинусоидальных составляющих. При аддитивной помехе велика вероятность ошибки в определении фазы элемента аналогового сигнала, особенно если помеха узкополосная, направленная и ее частота близка к несущей частоте аналогового модулированного сигнала.

Для снижения аддитивных и мультипликативных помех в рассматриваемых КПД можно использовать при реализации в технических системах частотные и амплитудные детекторы, причем амплитудные детекторы использовать в цепях обнаружения и снижения аддитивных широкополосных помех, а частотные детекторы для борьбы с мультипликативными и узкополосными направленными ретранслированными помехами.

Список литературы:

1. Власов В.И. Шипилова Д.Ю. Математическое моделирование комплексного показателя для автоматизации контроля качества линий связи каналов передачи данных вычислительных сетей. Инфотелеком-муникационные технологии. — Том 5, — № 3, — 2007. — с. 78—81.
2. Лагутенко О.И. Современные модемы. М.: Эко-Трендз: 2002. ISBN: 5-88405-037-2 -346 с.
3. Федоренко В.В., Власов В.И. Информативные свойства корреляционных функций сложных сигналов (статья) Известия вузов. Радиоэлектроника. — № 3, — 1994, — стр. 68—72.
4. Федоренко В.В., Власов В.И. Вероятность ошибки при распознавании образов по признак-функциям (статья). Известия вузов. Радиоэлектроника. — № 7, — 1995, — стр. 34—37.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕЛЕКТОРА СИНГУЛЯРНОГО ЭСТИМАТОРА МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОСНОВНОГО ТОНА РЕЧИ

Вольф Данияр Александрович

*аспирант, Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники,
РФ, г. Томск*

E-mail: runsolar@mail.ru

A BUILDING MATHEMATICAL MODELS OF SELECTOR OF SINGULAR ESTIMATORS PITCH TRACKER

Daniyar Volf

*graduate student,
Tomsk State University of Control System and Radioelectronics,
Russia, Tomsk*

АННОТАЦИЯ

Исследуется новый метод оценивания мгновенной частоты основного тона речи. Получена математическая модель процесса, протекающего в селекторе сингулярного эstimатора мгновенной частоты основного тона речи (singular estimation pitch tracking — SEPT).

ABSTRACT

We study a new method for estimating the instantaneous frequency of the fundamental tone of natural speech. Obtained by mathematical model of the processes, which flows in singular estimator pitch tracking (SEPT).

Ключевые слова: речь; фонема; модель; сингулярный спектральный анализ речи; сингулярное оценивание частоты основного тона.

Keywords: speech; phoneme; model; singular spectrum analysis of speech; singular estimation pitch tracking.

Введение. Современные информационные технологии находят все более широкое применение в вычислительных и телекоммуникационных системах. Актуальной становится задача разработки и внед-

рения новых методов средств анализа информации для обеспечения потребителя максимальными данными об исследуемых объектах.

Предметом данного моделирования является процесс оценивания одного из основных параметров устной речи — частоты колебаний голосовых связок при произнесении вокализованной речи, называемой основным тоном — F_0 (величина обратная периоду $T_0 = 1/F_0$).

В настоящее время популярными алгоритмами оценивания частоты основного тона речевого сигнала являются RAPR, YIN и SWIPE'. Популярность перечисленных алгоритмов обусловлена хорошей функциональностью, низким процентом грубых ошибок и наличием свободно распространяемых версий их реализаций [1, с. 49].

Главным недостатком подобных алгоритмов является зависимость от точности нахождения пиков. Наличие пиков и их амплитуда зависят от длины и вида окна анализа, а также от класса звука, что довольно часто приводит к ошибкам. Более того, точность зависит от значения частоты основного тона и от частоты дискретизации [9, с. 16].

Еще одно ограничение обусловлено периодической (стационарной) моделью сигнала, лежащей в их основе, которая подразумевает точное повторение периода основного тона и не допускает его изменения на протяжении анализируемого фрейма. Например, при появлении модуляций — изменений частоты основного тона, точность оценок также существенно снижается.

В процессах исследования речевых сигналов, обычно используется математические аппараты спектрального анализа Фурье или вейвлет-анализ (wavelet-analysis). Однако в настоящей работе применен аппарат сингулярного спектрального анализа (ССА «Гусеница»), разработанного и обоснованного в конце XX века сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета [7, с. 5], [8, с. 1]. Также в современной зарубежной литературе описан достаточно широкий класс методов, алгоритмически и идейно близких к методу «Гусеница», в основном метод известен как Singular Spectrum Analysis (SSA).

Метод основан на анализе главных компонент и позволяет исследовать стационарные и не стационарные временные ряды. Связь между классическими методами анализа стационарных временных рядов и методом главных компонент рассматривается в работах Бриллинджера [2, с. 1].

Например, в работе Bagshaw [10, с. 1] утверждается, что, методы, работающие во временной области, обладают наименьшей по сравнению с другими методами (частотными), ошибкой принятия решения о присутствии голоса в речи (voicing decision error rate) — не более

17 %. Кроме того, в работе [11, с. 399] показано, что такие методы являются наиболее робастными в отношении принятия решения о вокализованности или невокализованности сегмента речи в условиях шума (voiced-unvoiced decision), искажений и побочных помех в сигнале.

Задача. Дан временной ряд S длины N . Выделить периодическую составляющую $T0_N$ (base tone track), где $f_{\min} \leq F0 \leq f_{\max}$ при условии, что частота обертоновых составляющих речи кратна частоте основного тона. Вычислить среднюю амплитуду $T0_N$.

Технические требования к модели. Исходя из поставленной задачи сформулируем технические требования к модели (рис. 2):

1. Входные данные: S_N — фонемный ряд гласных звуков речи длины N отсчетов с выборкой Fd кГц;

2. Выходные данные: $F0$ — частота основного тона речи, содержащаяся во временном кадре t мс; Amp — средняя амплитуда гармоники, соответствующая частоте основного тона речи; $T0_N$ — временной ряд, соответствующий квазигармонической составляющей (субфонеме) с частотой основного тона речи.

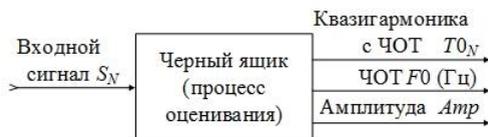


Рисунок 1. Требования к модели процесса оценивания мгновенной ЧОТ речи

Построение концептуальной модели. Для последующего построения концептуальной модели процесса сингулярного оценивания мгновенной частоты основного тона речи следует сначала понять физический процесс речеобразования и рассмотреть модель речевого сигнала для вокализованного сегмента речи. Однако несмотря на то, что речеобразующий механизм представляет собой относительно труднодоступную систему, даже на современном этапе представляется весьма сложным получить точные данные всех параметров речевого тракта и подробное описание его динамики известно, что человеческая речь по своей структуре состоит из некоторого количества системообразующих факторов, связанных между собой либо структурно, либо по механизму взаимодействия, которые демонстрируются на примере акустических свойств речи. Так как звуки речи генерируются артикуляционным аппаратом человека, то пони-

мание акустики речеобразования позволяет правильно интерпретировать физические данные.

Одним из источников образования звуков является голосовой источник, который возникает при колебании голосовых связок. Он участвует в образовании нескольких групп звуков, и по степени участия голосового источника звуки делятся на гласные и согласные. Для вокализованного сегмента речи экспериментально было установлено, что на «фонетический смысл» гласных звуков существенно влияют амплитуды на частотах основного тона и обертоновых составляющих речевого сигнала.

Рассмотрим модель вокализованного сегмента речевого сигнала применительно к задачам анализа и синтеза речи: Входной сигнал $x(t)$ поступает от голосовых связок (природный квазигармонический генератор — генеративная система), проходит через N -е количество параллельно соединенных резонаторов (характеризующих форму речевого тракта), в следствие чего, на выходе формируется определенный произносимый вокализованный речевой сегмент $y(t)$. Таким образом, математическую модель вокализованного речевого сегмента можно описать в виде суммы некоторого набора амплитудных, фазовых и частотных параметров, формируемых в результате прохождения полигармонического колебания через резонансную систему [9, с. 14]:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_n(t) \sin((n+1) \int_0^t \omega_0(\tau) d\tau + \varphi_n), \quad (1)$$

где: $n=0, 1, 2, \dots$ — номер гармоники основного тона;

A_n — амплитуды гармоник;

ω_0 — частота основного тона, рад/сек;

φ_n — начальная фаза гармоник;

$S(t)$ — конечный продукт генеративной и резонансной системы.

Очевидно, что, имея только выходной конечный продукт $S(t)$, появляется необходимость (интерес) решения обратной задачи (1) для выделения генеративной и резонансной составляющей. Научным интересом решения такой задачи может послужить построение импульсных характеристик резонансной системы для распознавания или дальнейшего синтеза речи диктора и т. д.

Таким образом для определения частоты основного тона речи формулируются две задачи:

1. Разложение исходного речевого сигнала в спектр квазигармонических компонент (задача 1);
2. Выбор квазигармонической составляющей соответствующей частоте основного тона речи (задача 2).

Сформулируем некоторое эвристическое описание модели сингулярного оценивания частоты основного тона:

Пусть S_N — одномерный массив данных равностоящих значений (набор из квантов по уровню), полученных в результате дискретизации непрерывного множества $S(t)$, поступает на вход системы осуществляющей расщепление в элементарный спектр временных рядов, генерируемых каждым резонатором речевого тракта. На выходе такой системы соответственно многомерный массив данных равностоящих значений $T_{L,N}$ — временной пучок (субфонемный спектр). Такую задачу разложения формально запишем как функцию сингулярного спектрального анализа [3, с. 114], [4, с. 69]:

$$T_{L,N} = \text{SSA}(S_N), S_N = \sum_{i=1}^L T_{i,N}, L < N. \quad (2)$$

Проводя аналогию с типовыми, уже ставившими классическими, оценщиками частоты основного тона речи, процесс (2) эквивалентен процессу генерации кандидатов искомого периода основного тона, однако в отличии от кросскорреляционных подходов в данном случае происходит генерация заранее известных функций (генератор сингулярных кандидатов частоты основного тона речи или генератора сингулярного спектра).

Далее временной пучок $T_{L,N}$ совместно с исходным сигналом S_N поступают на вход системы осуществляющей выбор функции соответствующей действительному кандидату частоты основного тона речи. На выходе данной системы набор параметров, описывающих частоту основного тона речи в виде Amp — амплитуды сигнала, $F0$ — частотной характеристики и TO_N — трека (track) самой функции с ЧОТ. Выбор квазигармонической составляющей соответствующей частоте основного тона речи формализуем некоторой функцией выбора:

$$(TO_N, F0, Amp) = \text{SELECTOR}(T_{L,N}, S_N). \quad (3)$$

Аналогично процессу протекающего в модуле постобработки типовых оценщиков, в селекторе (3) происходит срабатывание

решающего правила выбора наилучшего кандидата с последующим уточнением значения частоты основного тона речи.

Объединяя (2), (3) подходим к некоторому обобщенному концептуальному описанию модели сингулярного оценивания в следующей системе (рис. 2):

$$\begin{cases} T_{L,N} = \text{SSA}(S_N); \\ (T_{0,N}, F_0, \text{Amp}) = \text{SELECTOR}(T_{L,N}, S_N). \end{cases} \quad (4)$$

Если в системе (4) решение равенства (2) однозначно определяется решением задачи сингулярного спектрального разложения одномерного временного ряда в многомерный [5, с. 81], [6, с. 129], то равенство (3) требует некоторого детального рассмотрения.

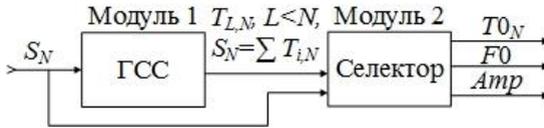


Рисунок 2. Обобщенная схема концептуальной модели SEPT:
 S_N — входной сигнал; $T_{L,N}$ — временной спектр; ГСС — генератор сингулярного спектра; S_N — входной сигнал; $T_{0,N}$ — трек с ЧОТ; F_0 — ЧОТ; Amp — амплитуда

Проведем следующие эвристические рассуждения, описывающие модель селектора (3): Поступая на вход селектора временной пучок $T_{L,N}$ сохраняется в некотором блоке управления матрицы временного спектра (УМВС).

Из условия первоначальной задачи известно, что частота обертоновых составляющих речи кратна частоте основного тона, а также известны границы ее существования, таким образом ставиться задача уменьшения плотности временного пучка L до величины K , обеспечивая сужение границ поиска $f_0 \in [f_{\min}, f_{\max}]$. Одним из вариантов решения данной задачи может выступать процесс измерения частотной характеристики элементов временного пучка $T_{L,N}$ с помощью быстрого преобразования Фурье в блоке измерения частоты временного спектра (ИЧВС):

$$f_i = \max(\text{FFT}(T_{i,N})), \quad f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max}, \quad i = \overline{1, K}, \quad (5)$$

где f_i — частотный ряд.

На выходе блока измерения частоты временного спектра (5) соответственно частотный ряд длины K , который поступает на вход блока выбора частоты основного тона (ВЧОТ). Теперь ставится задача выбора частоты основного тона речи из полученного спектра. Пусть в качестве критерия выбора ЧОТ взята наименьшая кратная величина частоты

$$f_0 \in \{ \min(f_i), 2\min(f_i), \dots, K\min(f_i) \}, \quad (6)$$

тогда ряд $T0$ может быть вычислен как процедура математической свертки:

$$T0_n = \sum_{k=0}^{N-1} H_k(f_0) \times S_{n-k}, \quad (7)$$

где: $H_k(f_0)$ — динамическая конечно импульсная характеристика фильтра с частотой среза $f_0 + \Delta f$;

S — исходный временной ряд.

По условию ряд $T0_N$ — квазигармоническая функция, соответствующая ЧОТ на заданном промежутке времени (определяется N и частотой дискретизации) с учётом модуляции, тогда можно говорить о вычислении средних величин $F0$ и Amp :

$$F0 = \frac{f_0^1 + f_0^2 + \dots + f_0^m}{m}; \quad (8)$$

$$Amp = \frac{1}{m} \sum \max(T0_n), \quad (9)$$

где: m — число переходов через нуль;

f_0^m — мгновенная частота тона;

Обобщая (5,7—9) и условие (6) получаем концептуальное описание модели селектора (3) в следующей системе (рис. 3):

$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 = \max(\text{FFT}(T_{i,N})), \\ f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max}, \\ f_0 \in \{\min(f_i), 2\min(f_i), \dots, K\min(f_i)\}, i = \overline{1, K}; \\ F0 = \frac{f_0^1 + f_0^2 + \dots + f_0^m}{m}; \\ T0_n = \sum_{k=0}^{N-1} H_k(f_0) \times S_{n-k}; \\ \text{Amp} = \frac{1}{m} \sum \max(T0_n). \end{array} \right. \quad (10)$$

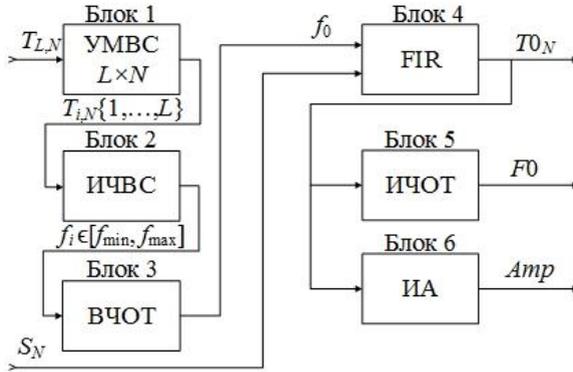


Рисунок 3. Схема модуля селектора SEPT: УМВС — блок управления матрицей временного спектра; ИЧВС — блок измерения частоты временного спектра; ВЧОТ — блок выбора ЧОТ; FIR — блок фильтрации; ИЧОТ — блок измерения ЧОТ; ИА — блок измерения амплитуды

Построение математической модели селектора. Согласно концептуальной модели проведем математическое моделирование процесса, протекающего в селекторе (3). Данную задачу сведем к решению известного класса математических задач в численном виде. Для этого осуществим математическую постановку задачи 2, а также проведем численное решение.

Математическая постановка задачи 2:

Из спектра временных рядов T_i^n [$i=0,1,\dots,N-1$; $n=0,1,\dots,L-1$] выбрать ряд удовлетворяющий следующим условиям:

Численное решение задачи 2:

Раскроем (5) следующим образом

$$f_n = \max(\text{FFT}(T_{L,N})) = \frac{p}{N \Delta t}, p = \{k, \left\| \left[\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} T_j^{<n>} e^{\frac{-2\pi}{N}kj} \right]_k \right\| \subseteq \text{MAX}, k = \overline{0, N-1}\}$$

$$n = \overline{0, L-1}, \quad (11)$$

где: Δt — частота дискретизации;

p — индекс с максимальной амплитудой в результате преобразования Фурье в n -й квазигармонике (компоненте).

Исходя из условия в (5) осуществим отбор кандидатов ЧОТ в заданном диапазоне (сужение границ поиска):

$$f_j = f_n \in [f_{\min} \leq f_n \leq f_{\max}],$$

$$n = \overline{0, L-1}, j = 0, 1, \dots, K < L. \quad (12)$$

В соответствии с условием (6) из диапазона (12) выберем кандидата f_0 по следующему правилу:

$$f_0 = f_j \in \{\min(f_j), 2\min(f_j), \dots, K\min(f_j)\}. \quad (13)$$

Введем вспомогательный ряд H_i , численно описывающий конечно-импульсную характеристику фильтра нижних частот (ФНЧ):

$$H_i = \{2\pi f_c W_i, i = 0; \frac{\sin(2\pi f_c i)}{2\pi f_c i} W_i, i > 0\},$$

$$f_c = f_0 + \Delta f,$$

$$W_i = 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{N-1}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi i}{N-1}\right),$$

$$i = \overline{0, N-1}, \quad (14)$$

где: f_c — частота среза;

W_i — ряд численно описывающий окно Блэкмена.

Тогда искомый ряд T_{0N} (7) определяется сверткой

$$T0_n = \sum_{i=0}^{N-1} H_i \times S_{n-i}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (15)$$

Усреднение (8) — это сумма m обратных величин равных периодам уместающихся в ряде $T0_N$

$$\begin{aligned} f_0^1 + f_0^2 + \dots + f_0^m &= \frac{1}{(k_2 - k_1)\Delta t} + \frac{1}{(k_3 - k_2)\Delta t} + \dots \\ &+ \frac{1}{(k_{m+1} - k_m)\Delta t} = \sum_{m=1} \frac{1}{(k_{m+1} - k_m)\Delta t}, \end{aligned}$$

где k_m — номер индекса в точке максимума

$$k = \{n, T0_n \subset \max, n = \overline{0, N-1}\}.$$

Перепишем (8) в сумму

$$F0 = \frac{1}{m} \sum_{m=1} \frac{1}{(k_{m+1} - k_m)\Delta t}. \quad (16)$$

Решение для (8) найдем как усреднение максимумов (15) по заданным мгновенным частотам (амплитудам на заданных частотах) из (16)

$$Amp = \frac{1}{m} \sum \max(T0_n), \quad n = 1, 2, \dots, m. \quad (17)$$

Объединим (11-17) в систему:

$$\left\{ \begin{array}{l}
f_n = \\
\frac{P}{N\Delta t}, P = \{k, \left\| \left[\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} T_j^{<n>} e^{-\frac{2\pi i}{N} k j} \right]_k \right\| \subseteq MAX, k = \overline{0, N-1}\}, \\
n = \overline{0, L-1}; \\
f_j = f_n \in [f_{\min} \leq f_n \leq f_{\max}], n = \overline{0, L-1}, \\
j = 0, 1, \dots, K < L; \\
f_0 = f_j \in \{\min(f_j), 2\min(f_j), \dots, K\min(f_j)\}, \\
i = \overline{1, K}; \\
f_c = f_0 + \Delta f \\
W_i = 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi i}{N-1}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi i}{N-1}\right), \\
i = \overline{0, N-1}; \\
H_i = \{2\pi f_c W_i, i = 0; \frac{\sin(2\pi f_c i)}{2\pi f_c i} W_i, i > 0\}, \\
i = \overline{0, N-1}; \\
T0_n = \sum_{i=0}^{N-1} H_i \times S_{n-i}, n = 0, \dots, N-1; \\
F0 = \frac{1}{m} \sum_{m=1} \frac{1}{(k_{m+1} - k_m)\Delta t}, \\
k = \{n, T0_n \subseteq MAX, n = \overline{0, N-1}\}; \\
Amp = \frac{1}{m} \sum \max(T0_n), n = 1, 2, \dots, m.
\end{array} \right. \quad (18)$$

Система (18) описывает математическую модель процесса, протекающего в модуле селектора (3).

Вывод. Получена математическая модель процесса, протекающего в селекторе (3) сингулярного эстиматора мгновенной частоты основного тона речи. Рассматривая современные технологии оценивания ЧОТ, применение генератора сингулярного спектра задает новый класс методов оценивания. Оценка адекватности и достоверности полученной модели требует дополнительной работы.

Список литературы:

1. Азаров И.С., Вашкевич М.И., Петровский А.А. Алгоритм оценки мгновенной частоты основного тона речевого сигнала / Цифровая обработка сигналов, — № 4, — 2012. — С. 49—57.
2. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. М: Мир, 1980. — 536 с.
3. Вольф Д.А. Выделение частоты основного тона речи методом сингулярного спектрального анализа / Системы управления и информационные технологии, — № 2.1(56), — 2014. — С. 114—120.
4. Вольф Д.А. Автоматизация детектирования квазигармонических компонент, содержащих частоту основного тона речи в методе сингулярного спектрального анализа SSAPD / Системы управления и информационные технологии, — № 3(57), — 2014. — С. 69—75.
5. Вольф Д.А. Программная реализация подсистемы быстрого сингулярного спектрального анализа речи // Системы управления и информационные технологии, — № 4(54), — 2013. — С. 81—86.
6. Вольф Д.А. Спектральная теорема для решения частичной проблемы собственных чисел степенным методом в задачах сингулярного спектрального анализа речи / Системы управления и информационные технологии, — № 3.1(57), — 2014. — С. 129—135.
7. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» — SSA: анализ временных рядов / Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2004. — С. 5—6.
8. Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского / СПб: Пресском, 1997. — 308 с.
9. Конец А.А. Модель и алгоритмы анализа и сегментация речевого сигнала / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Федеральное агентство по образованию РФ. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники: Томск, 2007. — 128 с.
10. Bagshaw P.C. Automatic prosodic analysis for computer aided pronunciation teaching / Univ. of Edinburgh, Edinburgh. PhDThesis 1994 / — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.55.3401> (дата обращения: 30.11.2014).
11. Rabiner L.R., Cheng M.J., Rosenberg A.E. A comparative study of several pitch detection algorithms / IEEE Trans. Acoust. Speech, — № 24, — 1976. — P. 399—423.

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА НА УЛЬТРАСОНОГРАММАХ

Данг Нгок Хоанг Тхань

*аспирант Тульского государственного университета,
РФ, г. Тула*

E-mail: myhoangthanh@yahoo.com

Фам Конг Тханг

*аспирант Тульского государственного университета,
РФ, г. Тула*

E-mail: pacothang@gmail.com

Фан Зуй Тунг

*магистрант Тульского государственного университета,
РФ, г. Тула*

E-mail: tungphanduy@vinhuni.edu.vn

A METHOD TO REDUCT NOISE ON ULTRASONOGRAM

Dang Ngoc Hoang Thanh

*postgraduate student of Tula State University,
Russia, Tula*

Pham Cong Thang

*postgraduate student of Tula State University,
Russia, Tula*

Phan Duy Tung

*graduate student of Tula State University,
Russia, Tula*

АННОТАЦИЯ

В работе предложен метод для подавления шума на ультразвуковых изображениях [2;3]. Ультразвуковая техника [2,;3] используется для диагностики болезни изображениями в медицине. Такой метод построен на основе модели ROF [4].

ABSTRACT

In this paper we propose a method to reduce noise on ultrasonogram. Ultrasonography is a technique that is used to diagnose disease by imaging. This method based on ROF model.

Ключевые слова: подавление шума; ультразвунограмма; модель ROF; уравнение Эйлера-Лагранжа.

Keywords: noise reduction; ultrasonogram; ROF model; equation Euler-Lagrange.

В медицине, диагностика болезни с помощью ультразвунографии достигла высоких результатов. Ультразунография является диагностической процедурой, в которой ультразвуковые волны используются с целью получения изображения исследуемых органов. Такие изображения обычно содержат спекл-шум [1]. В том числе, мы можем моделировать такой шум с использованием распределения Рэля [2]. В данной статье описывается использование вариационного подхода, предложенного Рудиным [3].

В пространстве \mathbb{R}^2 задана ограниченная область Ω и набор $(x, y) \in \Omega$. Пусть $u: \Omega \rightarrow \mathbb{R}, v: \Omega \rightarrow \mathbb{R}, \eta: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ являются гладкими функциями двух переменных. Задача устранения шума может представить в виде:

$$v(x, y) = u(x, y) + \eta(x, y),$$

где: $u(x, y)$ — функция идеального изображения,
 $v(x, y)$ — функция зашумлённого изображения,
 $\eta(x, y)$ — функция шума.

Идеей устранения шума на изображении, предлагаемым Рудиным является нахождение функции u , выполняющей следующее условие [4]:

$$\arg \min_u \int_{\Omega} \|\nabla u\| dx dy, \quad (1)$$

где $\nabla u = (u_x, u_y)$, $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, $u_y = \frac{\partial u}{\partial y}$.

Рассмотрим спекл-шум. Для этого шума, мы можем считать, что яркость в каждой точке выполняет распределение Рэля. Т.е. для каждого события $v|u$:

$$p(v|u) = \frac{u-v}{\sigma^2} e^{-\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где σ — параметр масштаба*

Мы считаем, что интенсивность зашумлённого изображения постоянна. Т. е.:

$$-\int_{\Omega} \ln(p(v|u)) \, dx dy = const. \quad (3)$$

Согласно (2), имеем

$$-\ln(p(v|u)) = -\ln(u-v) + \ln(\sigma^2) + \frac{(u-v)^2}{2\sigma^2}.$$

Поэтому, из (3) получим:

$$\int_{\Omega} \left(-\ln\left(\frac{u-v}{\sigma^2}\right) + \frac{(u-v)^2}{2\sigma^2} \right) dx dy = const. \quad (4)$$

Задача (1) с условием (4) может быть представлена в виде следующей задачи:

$$\arg \min_u \int_{\Omega} \|\nabla u\| dx dy + \alpha \int_{\Omega} \left(\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2} - \ln(u-v) \right) dx dy, \quad (5)$$

где α — ненулевой параметр.

Мы можем считать, что норма в (5) является нормой в пространстве L_2 . Это значит, что $\|\nabla u\| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$. Поэтому (5) переписывается в виде:

$$\arg \min_u \int_{\Omega} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \, dx dy + \alpha \int_{\Omega} \left(\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2} - \ln(u-v) \right) dx dy, \quad (6)$$

Алгоритм решения

Для решения задачи (6) мы используем уравнение Эйлера-Лагранжа [1]. Положим:

$$L(u, u_x, u_y) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} + \alpha \left(\frac{(u-v)^2}{2\sigma^2} - \ln(u-v) \right).$$

Тогда уравнение Эйлера-Лагранжа задачи (6) имеет вид:

$$\frac{\partial(L_{u_x})}{\partial x} + \frac{\partial(L_{u_y})}{\partial y} - L_u = 0,$$

где $L_u = \frac{\partial L}{\partial u}$, $L_{u_x} = \frac{\partial L}{\partial u_x}$, $L_{u_y} = \frac{\partial L}{\partial u_y}$. Поэтому мы получим следующее уравнение:

$$\frac{u_{xx}u_y^2 - 2u_xu_yu_{xy} + u_x^2u_{yy}}{(u_x^2 + u_y^2)^{3/2}} + \alpha \left(\frac{u-v}{\sigma^2} - \frac{1}{u-v} \right) = 0, \quad (7)$$

Для решения уравнения (7), мы используем метод градиентного спуска с шагом времени k . Выражение для нахождения u в шаге k имеет вид:

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + \Delta t \left(\left(\frac{u_{xx}u_y^2 - 2u_xu_yu_{xy} + u_x^2u_{yy}}{(u_x^2 + u_y^2)^{3/2}} \right)^{(k)} + \alpha \left(\frac{u^{(k)} - v}{\sigma^2} - \frac{1}{u^{(k)} - v} \right) \right). \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} (u_x^{(k)})_{ij} &= \frac{u_{i+1,j}^{(k)} - u_{i-1,j}^{(k)}}{2\Delta x}, \quad (u_y^{(k)})_{ij} = \frac{u_{i,j+1}^{(k)} - u_{i,j-1}^{(k)}}{2\Delta y}, \\ (u_{xx}^{(k)})_{ij} &= \frac{u_{i+1,j}^{(k)} - 2u_{ij}^{(k)} + u_{i-1,j}^{(k)}}{(\Delta x)^2}, \quad (u_{yy}^{(k)})_{ij} = \frac{u_{i,j+1}^{(k)} - 2u_{ij}^{(k)} + u_{i,j-1}^{(k)}}{(\Delta y)^2}, \\ (u_{xy}^{(k)})_{ij} &= \frac{u_{i+1,j+1}^{(k)} - u_{i+1,j-1}^{(k)} - u_{i-1,j+1}^{(k)} + u_{i-1,j-1}^{(k)}}{4\Delta x\Delta y}; \\ i &= 1, \dots, N_1, j = 1, \dots, N_2; k = 0, 1, \dots; \Delta x = \Delta y = 1; \Delta t = 0.2, \\ u_{0j}^{(k)} &= u_{1j}^{(k)}, u_{N_1+1,j}^{(k)} = u_{N_1,j}^{(k)}, u_{i0}^{(k)} = u_{i1}^{(k)}, u_{i,N_2+1}^{(k)} = u_{i,N_2}^{(k)}, \end{aligned}$$

N_1 — число точек изображения по горизонтали, а N_2 — по вертикали.

При начальных условиях:

$$u_{ij}^0 = v_{ij}; \quad i = 1, \dots, N_1; \quad j = 1, \dots, N_2. \quad (9)$$

Экспериментальные результаты

В эксперименте мы используем изображение cameraman.tif и добавляем спекл-шум с параметром $\sigma = 0.05$. Для оценки качества изображения после восстановления, мы используем критерий PSNR (peak signal-to-noise ratio, пиковое отношение сигнала к шуму):

$$PSNR = 10. \lg \left(\frac{NL^2}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (u_{ij} - v_{ij})^2} \right),$$

где: $N = N_1 \times N_2$ — размер изображения,

L — интенсивность яркости, например, для восьмимбитового серого изображения $L = 2^8 - 1 = 255$.

Чем больше PSNR, тем лучше качество изображения. Значение PSNR восстановленного изображения больше, чем значение PSNR зашумленного изображения. Это значит, что наш метод повышает качество изображения.



Рисунок 1. Устранение шума на изображении: а) Исходное изображение; б) Зашумлённое изображение PSNR=19; в) Подавление шума PSNR=25, $\alpha = 0.05$, $\sigma = 1.9$

Заключение

В данной работе предлагается метод устранения шума в ультразвукограммах. Предлагаемый метод построен с помощью модели ROF.

Результат устранения шума (значение PSNR) зависит от выбора параметров α, σ . Если значения таких параметров выбраны оптимально, то результат подавления шума будет лучшим.

Список литературы:

1. Гайдашев А.Э. Спекл-шум и повышение качества ультразвуковых изображений. [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://biosite.ru/articles/5/16> (Дата обращения 18.12.2014).
2. Распределение Рэля. [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределение_Рэля (Дата обращения 18.12.2014).
3. Rudin L.I., Osher S., Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms//Physica D. — 1992. — Vol. 60. — P. 259—268.

СИНТЕЗ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Змеу Константин Виталиевич

*канд. техн. наук, заведующий кафедрой Технологий промышленного
производства Дальневосточного федерального университета,
РФ, г. Владивосток
E-mail: k.zmeu@ieee.org*

Ноткин Борис Сергеевич

*канд. техн. наук,
доцент кафедры Технологий промышленного производства
Дальневосточного федерального университета, научный сотрудник
Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
РФ, г. Владивосток
E-mail: boris_notkin@mail.ru*

Онча Юлия Густавовна

*аспирант кафедры Технологий промышленного производства
Дальневосточного федерального университета,
РФ, г. Владивосток
E-mail: genze@inbox.ru*

SYNTHESIS OF A PREDICTIVE MODEL ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

Konstantin Zmeu

candidate of Science, Head of Department of Industrial Production Technologies of Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok

Boris Notkin

candidate of Science, Associate Professor of Department of Industrial Production Technologies of Far Eastern Federal University, Researcher of Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Russia, Vladivostok

Yuliya Oncha

Postgraduate student, the Department of Industrial Production Technologies, Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok

АННОТАЦИЯ

В работе предложен способ линеаризации объекта на этапе идентификации для получения прогнозирующей модели. Представлены результаты сравнительных экспериментов, подтверждающие эффективность предложенного решения.

ABSTRACT

In this paper we propose a method of linearization of the plant on the stage of identification to obtain a predictive model. Displaying results comparative experiments, confirming the effectiveness of the proposed solutions.

Ключевые слова: идентификация; прогнозирующее управление; прогнозирующая модель.

Keywords: identification; model predictive control; predictive model.

При синтезе систем управления широкое распространение получил метод прогнозирующего управления [3; 7]. Прогнозирующее управление предложено в 70-х годах прошлого века. Впоследствии MPC было успешно применено в промышленности в сфере управления технологическими процессами [9; 11]. Основное преимущество прогнозирующего управления — это возможность управлять многомерными и многосвязными объектами со сложной структурой,

включающей нелинейности, оптимизировать процессы в режиме реального времени в рамках ограничений на управляющие и управляемые переменные, учитывать параметрические неопределенности объекта и возмущающих воздействий [6; 10].

Основной принцип прогнозирующего управления состоит в использовании математической модели объекта управления, на основе которой на каждом интервале дискретности i отыскивается такая последовательность управляющих воздействий $u_i, u_{i+1}, u_{i+2} \dots u_{i+\lambda-1}$ на горизонте прогноза λ , которая будучи приложена к объекту, обеспечит максимальное совпадение последовательности прогнозируемых значений выхода $\tilde{y}_{i+1}, \tilde{y}_{i+2}, \tilde{y}_{i+3} \dots \tilde{y}_{i+\lambda}$ с последовательностью его заданных значений $r_{i+1}, r_{i+2}, r_{i+3} \dots r_{i+\lambda}$. При этом из всей последовательности управляющих воздействий применяется только первое u_i , затем горизонт прогноза сдвигается и вычисления повторяются.

Последовательность управляющих воздействий вычисляется путем минимизации целевой функции на каждом интервале управления i . Одна из общих форм целевой функции имеет вид [4; 8]:

$$J(u) = \sum_{j=1}^{\lambda} q_j (\tilde{y}(i+j|i) - r(i+j|i))^2 + \sum_{j=1}^{\lambda} p_j (u(i+j-1|i) - u(i+j-2|i))^2 + \sum_{j=1}^{\lambda} w_j u(i+j-1|i)^2 \rightarrow \min$$

где: λ — горизонт прогноза;

$\tilde{y}(j|i)$ — прогноз выхода объекта на момент времени j , сделанный в момент времени i ;

r — заданный выход объекта;

u — амплитуда управления;

q, p и w — весовые коэффициенты.

Прогноз выхода объекта осуществляется на базе прогнозирующей модели:

$$\tilde{y}(j|i) = f_j(\mathbf{x}_i, u(i|i), u(i+1|i), \dots, u(j-1|i)),$$

где \mathbf{x}_i — текущее состояние объекта управления, которое для прогнозирующей модели принимается в качестве ее начального состояния.

Классическая схема прогнозирующей модели представлена на рис. 1.

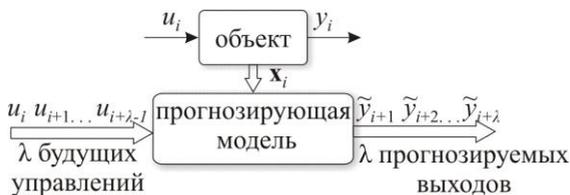


Рисунок 1. структурная схема прогнозирующей модели

В случаях, когда состояние объекта измерить невозможно, либо измерения сильно зашумлены, используются различные методы для оценки текущего состояния объекта x_i . Один из распространенных методов оценки состояния — это использование фильтра Калмана, для синтеза которого необходимо знание математической модели объекта и статистических характеристик погрешности измерения.

В случаях, когда математическая модель объекта неизвестна или известна не полностью, возникает необходимость решения дополнительной задачи — идентификация объекта. В случае линейности объекта существуют общие подходы идентификации, однако для нелинейных объектов пока что разработаны подходы, подходящие для частных объектов [2].

В данной статье предложен способ, позволяющий синтезировать прогнозирующую модель без априорных знаний математической модели объекта, а только по выборке вход/выход объекта.

Материал статьи организован следующим образом. В разделе 1 рассматривается теоретическая (классическая) реализация синтеза прогнозирующей модели по известному математическому описанию объекта. На основе теоретического решения в разделе 2 описана предлагаемая практическая методика синтеза прогнозирующей модели по экспериментальным данным вход/выход объекта. В разделе 3 представлены результаты сравнительных экспериментов.

1. Классическая методика синтеза прогнозирующей модели

Для осуществления прогноза выхода динамического объекта необходимо знание полного вектора его текущего состояния. На практике, как правило, вектор состояния объекта измеряется частично, при этом его элементы, не подлежащие прямому измерению, могут быть получены косвенно, путем оценки.

Для оценки текущего состояния объекта рассмотрим рекурсивный фильтр. Этот фильтр позволяет оценить текущее состояние объекта x_i по его известному математическому описанию, управлениям $u_i, u_{i-1} \dots u_{i-k}$ и выходам $y_i, y_{i-1} \dots, y_{i-k}$ на некотором ретроспективном горизонте k , предшествующему моменту времени i . Структурная схема прогнозирующей модели для этого случая представлена на рис. 2.

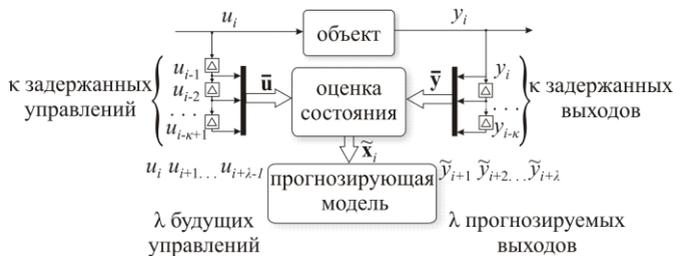


Рисунок 2. Структурная схема прогнозирующей модели

Далее представлено математическое описание, синтеза нерекурсивного фильтра.

Пусть математическая модель объекта известна и представлена в дискретной форме пространства состояний:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_i + \mathbf{B}u_i, \quad (1)$$

$$y_i = \mathbf{C}\mathbf{x}_i, \quad (2)$$

где: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ — положительно определенные матрицы; в данном случае речь пойдет о SISO объекте.

Для оценки текущего состояния объекта воспользуемся доступной для измерения информацией о входах и выходах объекта на некотором предыдущем отрезке времени (ретроспективном горизонте), продолжительностью k интервалов дискретности, как показано на рис. 3.

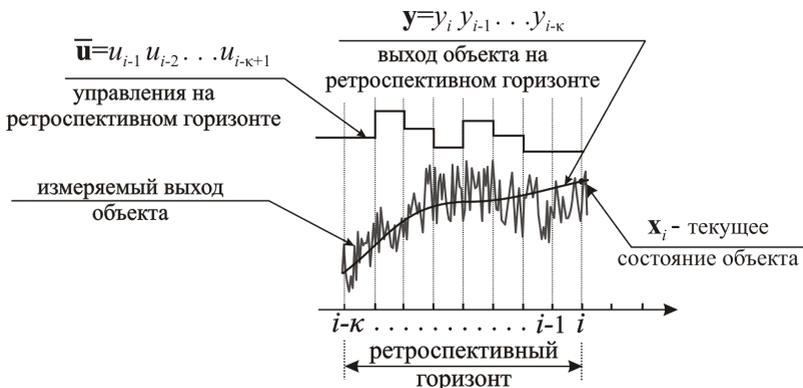


Рисунок 3. Оценка состояния

Величина ретроспективного горизонта k , для линейного объекта должна быть не меньше, чем порядок этого объекта. На практике, обычно, квыбирают существенно больше, что позволяет повысить обобщающие качества решения, функционирующего в условиях зашумленных входных данных.

С учетом того, что управления $u_{i-1}, \dots, u_{i-k-1}$ известны, оценка состояния сводится к отысканию такого текущего состояния $\tilde{\mathbf{x}}_i$, при котором квадрат отклонения измеряемого выхода объекта $y_i, y_{i-1}, \dots, y_{i-k}$ от восстановленного $\tilde{y}_i, \dots, \tilde{y}_{i-k}$ будет минимальный.

Минимизируемая целевая функция примет вид:

$$J(\tilde{\mathbf{x}}_i) = \sum_{j=0}^k (y_{i-j} - \tilde{y}_{i-j})^2, \quad (3)$$

где: $y_i = y_i^* + \varepsilon_i$ — фактически измеряемый выход объекта y_i^* с учетом погрешности измерения ε_i ;

\tilde{y}_i — соответствующая оценка выхода объекта, выполненная с учетом известных управлений на горизонте прогноза k и зависящая от оценки текущего состояния $\tilde{\mathbf{x}}_i$ объекта на этом отрезке времени.

Для того чтобы выразить оценку выхода динамической системы y_i на ретроспективном горизонте k , как функцию от известных на этом интервале управлений $u_i, u_{i-1} \dots u_{i-k}$ и искомую оценку состояния $\tilde{\mathbf{x}}_i$ в текущий момент времени воспользуемся техникой интегрирования в обратном времени. Из (1) состояние объекта в текущий момент времени выражается:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{B}u_i), \quad (4)$$

Рекуррентно выразим каждое состояние объекта на ретро-спективном горизонте через текущее состояние объекта \mathbf{x}_i :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i-1} &= \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_i - \mathbf{B}u_{i-1}), \\ \mathbf{x}_{i-2} &= (\mathbf{A}^{-1})^2 \mathbf{x}_i - (\mathbf{A}^{-1})^2 \mathbf{B}u_{i-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}u_{i-2}, \\ &\dots \\ \mathbf{x}_{i-k} &= (\mathbf{A}^{-1})^k \mathbf{x}_i - (\mathbf{A}^{-1})^k \mathbf{B}u_{i-1} - (\mathbf{A}^{-1})^{k-1} \mathbf{B}u_{i-2} \dots \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}u_{i-k}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда в соответствии с (2) и с учетом (5) выразим выход объекта на ретроспективном горизонте через текущее состояние объекта:

$$y_i = \mathbf{C}\mathbf{x}_i, \quad (6)$$

$$\text{где: } \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \dots \\ \mathbf{CA}^\lambda \end{pmatrix}; \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{CB} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{CA}^{\lambda-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{\lambda-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{CB} \end{pmatrix};$$

$\mathbf{y} = [y_{i+1} \dots y_{i+\lambda}]^T$ - прогноз выхода объекта на горизонте λ ;

$\mathbf{u} = [u_i, u_{i+1} \dots u_{i+\lambda-1}]^T$ - управления на горизонте прогноза.

2. Синтез прогнозирующей модели по экспериментальным данным

С учетом выражения для оценки текущего состояния объекта (8), его прогнозируемый выход (10) на горизонте прогноза:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{V}\tilde{\mathbf{x}}_i + \mathbf{W}\mathbf{u} = \mathbf{V}\mathbf{F}^+ \bar{\mathbf{y}} - \mathbf{V}\mathbf{F}^+ \mathbf{G}\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{W}\mathbf{u}, \quad (11)$$

Введем обозначения: $\mathbf{K} = \mathbf{V}\mathbf{F}^+$; $\mathbf{L} = -\mathbf{V}\mathbf{F}^+$; $\mathbf{M} = \mathbf{W}$. Тогда прогнозируемый выход примет компактный вид:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{K}\bar{\mathbf{y}} + \mathbf{L}\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{M}\mathbf{u}. \quad (12)$$

Для лучшего понимания и наглядности представим (12) в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{i+1} &= k_{11}y_i + k_{12}y_{i-1} + \dots + k_{1\kappa}y_{i-\kappa+1} + l_{11}u_{i-1} + l_{12}u_{i-2} + \dots + l_{1\kappa}u_{i-\kappa} + m_{11}u_i; \\ \tilde{y}_{i+2} &= k_{21}y_i + k_{22}y_{i-1} + \dots + k_{2\kappa}y_{i-\kappa+1} + l_{21}u_{i-1} + l_{22}u_{i-2} + \dots + l_{2\kappa}u_{i-\kappa} + m_{21}u_{i+1} + \\ &\quad + m_{22}u_i; \\ \dots & \\ \dots & \\ \tilde{y}_{i+\lambda} &= k_{\lambda 1}y_i + k_{\lambda 2}y_{i-1} + \dots + k_{\lambda \kappa}y_{i-\kappa+1} + l_{\lambda 1}u_{i-1} + l_{\lambda 2}u_{i-2} + \dots \\ &\quad \dots + l_{\lambda \kappa}u_{i-\kappa} + m_{\lambda 1}u_i + m_{\lambda 2}u_{i+1} + \dots + m_{\lambda \lambda}u_{i+\lambda-1} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{где: } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1\kappa} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2\kappa} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{\lambda 1} & k_{\lambda 2} & \dots & k_{\lambda \kappa} \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1\kappa} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2\kappa} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{\lambda 1} & l_{\lambda 2} & \dots & l_{\lambda \kappa} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{\lambda 1} & m_{\lambda 2} & m_{\lambda 3} & m_{\lambda 4} & \dots & m_{\lambda \lambda} \end{bmatrix}.$$

Каждое уравнение системы (13) — это прогноз на соответствующий горизонт от 1 до λ . Причем, в системе (13) для синтеза

прогнозирующей модели нет явного использования состояния объекта, т. е., нет необходимости решать отдельную задачу - оценку состояния. Структурная схема прогнозирующей модели в этом случае примет вид, представленный на рис. 4.

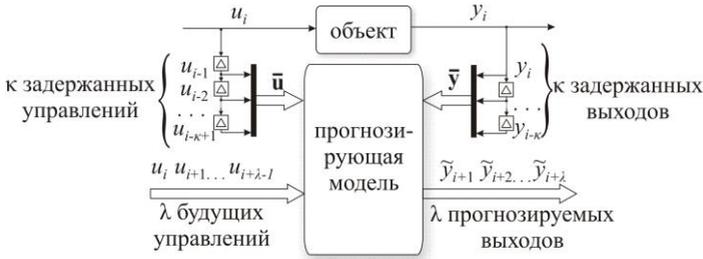


Рисунок 4. Структурная схема прогнозирующей модели

Управления и выходы объекта на горизонтах k и λ можно получить, не имея математического описания этого объекта. Задача поиска прогнозирующей модели сводится к отысканию таких $\mathbf{K}, \mathbf{L}, \mathbf{M}$ при которых будет достигнут минимум целевой функции:

$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{k}^{(\lambda^*)}, \mathbf{l}^{(\lambda^*)}, \mathbf{m}^{(\lambda^*)}) = & \sum_{i=k+1}^{n-\lambda^*} \left(\sum_{j=1}^{\kappa} y_{i-k+j} + \sum_{j=1}^{\kappa} u_{i-k+j-1} l_j^{(\lambda^*)} + \right. \\
 & \left. + \sum_{j=1}^{\lambda^*} u_{i+j-1} m_j^{(\lambda^*)} - y_{i+\lambda^*} \right)^2 \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{14}$$

где: n — объем выборки экспериментальных данных вход/выход объекта;

$$\mathbf{k}^{(\lambda^*)} = (k_1^{(\lambda^*)}, k_2^{(\lambda^*)}, \dots, k_{\kappa}^{(\lambda^*)}), \quad \mathbf{l}^{(\lambda^*)} = (l_1^{(\lambda^*)}, l_2^{(\lambda^*)}, \dots, l_{\kappa}^{(\lambda^*)})$$

и $\mathbf{m}^{(\lambda^*)} = (m_1^{(\lambda^*)}, m_2^{(\lambda^*)}, \dots, m_{\lambda^*}^{(\lambda^*)})$ — строки матриц $\mathbf{K}, \mathbf{L}, \mathbf{M}$ соответственно;

$$\lambda^* = (1, 2, \dots, \lambda) \text{ — номер строки матриц } \mathbf{K}, \mathbf{L}, \mathbf{M};$$

Строки матриц $\mathbf{K}, \mathbf{L}, \mathbf{M}$ формируются последовательно по экспериментальным данным вход/выход объекта. Минимизация (14) выполняется аналитически с помощью метода наименьших квадратов.

Предлагаемое решение позволяет получить прогнозирующую модель без априорных знаний математической модели объекта,

без решения дополнительных задач - идентификация объекта управления и оценка его состояния в классическом понимании.

3. Сравнительные эксперименты

В данном разделе рассмотрены модельные и натурные эксперименты синтеза прогнозирующей модели по заданному математическому описанию объекта и по экспериментальным данным.

Эксперименты выполнены дистанционно на примере установки CE-150 “HelicopterModel” [12]. Установка представляет собой двух-координатный, многосвязный, нелинейный и статически неустойчивый объект. Все эксперименты выполнены на примере одной координаты (движение по углу азимута). Математическая модель этого объекта имеется на сайте разработчика экспериментальной установки и представлена на рис. 5.

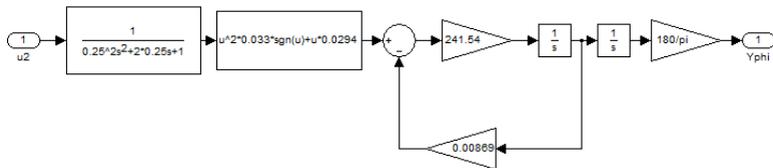


Рисунок 5. Математическая модель установки по координате угла азимута

Для использования классического решения, представленная нелинейная математическая модель линеаризована методом аппроксимации в рабочей точке. В качестве рабочей точки выбрано начало координат пространства состояний объекта.

На рис. 6 представлен результат модельного эксперимента. Для классического синтеза прогнозирующей модели использована линеаризованная модель объекта. Для предлагаемого решения с нелинейной модели была снята выборка, на основе которой получена прогнозирующая модель.

Прогнозирующие модели получены для различных горизонтов, указанных на рис. 6.

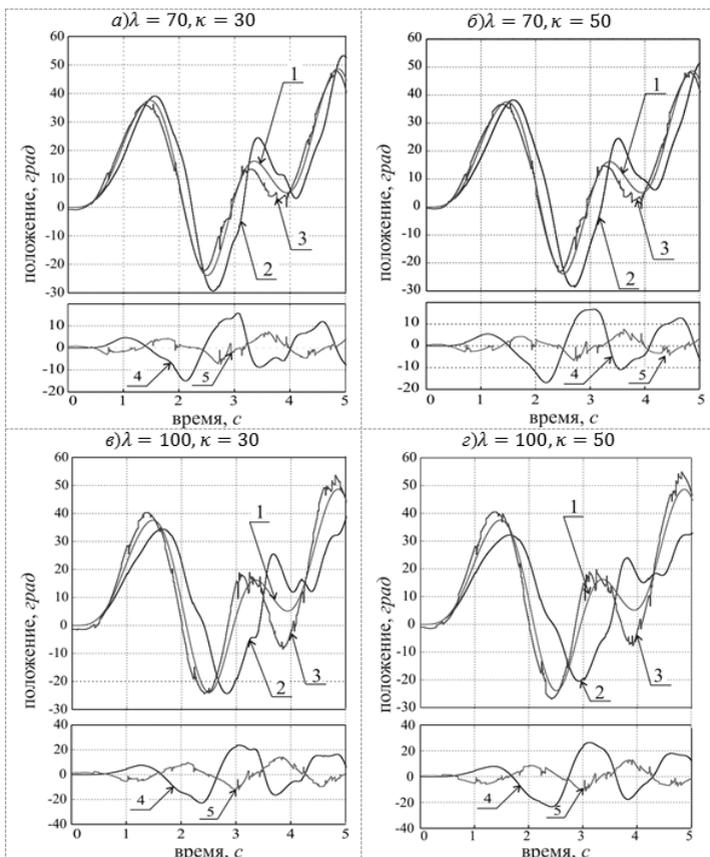


Рисунок 6. Модельный эксперимент

Измеряемый «будущий» выход (1); прогнозируемый выход классическим (2) и предлагаемым (3) методом; ошибка прогнозирования классическим (4) и предлагаемым (5) методом

В табл. 1 представлены измерения среднего отклонения для каждого эксперимента (рис. 6) в градусах.

Таблица 1.

Среднее значение отклонений

Эксперимент	Среднее отклонение прогнозируемого выхода, град	
	Классическая прогнозирующая модель	Предлагаемое решение
а) $\lambda = 70, \kappa = 30$	5,8	2,1
б) $\lambda = 70, \kappa = 50$	6,9	2,0
в) $\lambda = 100, \kappa = 30$	9,8	4,4
г) $\lambda = 100, \kappa = 50$	10,6	4,2

Как видно из табл. 1 качество восстановления прогнозируемого выхода по экспериментальным данным выше, чем при использовании классической методики.

На рис. 7 представлен результат натурального эксперимента.

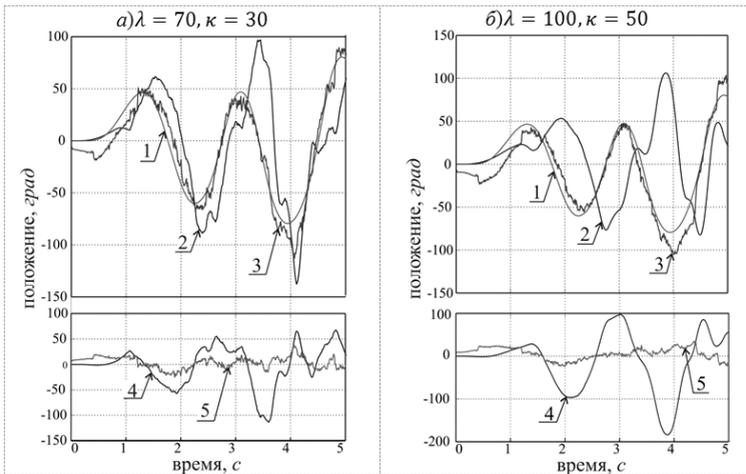


Рисунок 7. Натурный эксперимент

Измеряемый «будущий» выход (1); прогнозируемый выход классическим (2) и предлагаемым (3) методом; ошибка прогнозирования классическим (4) и предлагаемым (5) методом

В табл. 2 представлены измерения среднего отклонения для каждого эксперимента (рис. 7).

Таблица 2.

Среднее значение отклонений

Эксперимент	Среднее отклонение прогнозируемого выхода, град	
	Классическая прогнозирующая модель	Предлагаемое решение
а) $\lambda = 70, \kappa = 30$	29,5	9,7
б) $\lambda = 100, \kappa = 50$	49,2	12,5

Из табл. 1 и 2 видно, что качество восстановления прогнозируемого выхода по экспериментальным данным существенно выше, чем при использовании классической методики.

Заключение

На основе прогнозирующей модели в прогнозирующем регуляторе осуществляется прогноз для выбора оптимальной последовательности управлений на горизонте. Классически прогнозирующая модель синтезируется по математической модели объекта управления и известному состоянию этого объекта в каждый момент времени. Это приводит к тому, что перед тем как синтезировать прогнозирующую модель необходимо решать дополнительные задачи — идентификация объекта и оценка текущего состояния, если измерить его не удастся.

В статье рассмотрен классический способ синтеза прогнозирующей модели, реализованный на основе нерекурсивного фильтра. На основе классического решения в работе предложен способ построения прогнозирующей модели по экспериментальным данным вход/выход объекта. В работе показаны сравнительные эксперименты прогнозирующих моделей, полученных классическим и предлагаемым способом. Установлено, что качество восстановления прогнозируемого выхода объекта значительно выше, при использовании предлагаемой методики.

Список литературы:

1. Веремей Е.И., Еремеев В.В., Сотникова М.В. Пособие "Model Predictive Control Toolbox" [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict>.
2. Дилигинская А.Н. Идентификация объектов управления: учебн. пособие Самара Самарский государственный технический университет 2009.
3. Camacho E F., Bordons C. Model predictive control //London: Springer-Verlag. 2004. — 405 p.

4. Chi-Ying Lin, His-YoYeh. Repetitive Model Predictive Control Based on a Recurrent Neural Network // International Symposium on Computer 2012, Consumer and Control.
5. Da Wang, Mevludin Glavic, Louis Wehenkel. Trajectory-Based Supplementary Damping Control for Power System Electromechanical Oscillations // Transactions on power system.
6. Ekaputri C., Syaichu-Rohman A., Model predictive control (MPC) design and implementation using algorithm-3 on board STARTAN 6 FPGA SP605 evaluation kit //International conference on instrumentation control and automation 2013, Indonesia.
7. Maciejowski J.M. Predictive control with constraints // Prentice Hall, 2002. — 331 p.
8. Michael A. Stephens, Chris Manzie. Predictive control for reference tracking on an industrial machine tool servo drive// Transactions on industrial informatics — 2013, — vol. 9, — № 2.
9. Rachael J.A., Rault A. Model Predictive control: application to an industrial Process //Automatica 1978.
10. Research Article Towards Online Model Predictive Control on a Programmable Logic Controller: Practical Considerations. Mathematical Problems in Engineering Volume 2012.
11. Rouhani R., Mehra R.K. Model Algorithmic Control, Basic Theoretical Properties //Automatica 1982.
12. Università degli Studi di Siena Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.dii.unisi.it/~control/act/home.php>.

ПОСТРОЕНИЕ ЦЕНТРОВ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Сергушев Алексей Геннадьевич

*канд. техн. наук, отдел Инфокоммуникационных технологий
Филиала ФГУП ЦНИИС-ЛО ЦНИИС, нач. отдела,
РФ, г. Санкт-Петербург
E-mail: ags@pochta.ru*

CREATION OF THE CENTERS OF MONITORING OF POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS ON THE BASIS OF INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGISTS AND TECHNOLOGIES OF TOUCH NETWORKS

Alexey Sergushev

*candidate of Science, department of Infocommunication technologies
of Federal State Unitary Enterprise TSNIIS
Branch-LO TSNIIS, head of department
Russia, St. Petersburg*

АННОТАЦИЯ

В докладе исследуются принципы построения центров мониторинга потенциально опасных объектов на основе инфокоммуникационных технологий и технологий сенсорных сетей. На основании проведенного исследования выбирается технология для построения центров мониторинга потенциально опасных объектов.

ABSTRACT

In the report the principles of creation of the centers of monitoring of potentially dangerous objects on the basis of infocommunication technologies and technologies of touch networks are investigated. On the basis of the conducted research the technology for creation of the centers of monitoring of potentially dangerous objects gets out.

Ключевые слова: мониторинг потенциально опасных объектов; инфокоммуникационные технологии; беспроводные сенсорные сети.

Keywords: monitoring of potentially dangerous objects; infocommunication technologies; wireless touch networks.

Главной целью создания систем мониторинга потенциально опасных объектов (ПОО) является своевременное информирование о нештатных и аварийных ситуациях, возникающих на объекте, и оперативное реагирование на них [1—3]. Максимальная эффективность работы системы мониторинга (ПОО) может быть достигнута только при создании единого мониторингового центра, объединяющего данные из различных систем (систем мониторинга деформаций строительных конструкций зданий и сооружений, систем контроля загазованности, систем пожарной безопасности и др.). При этом, по сложившей традиции, сбор информации центром мониторинга ПОО и выдача команд управления осуществляется через существующую инфраструктуру сети связи. Само по себе это не плохо, если

бы такой подход был бы лишен ряда недостатков. Необходимо отметить, что основными требованиями, предъявляемыми к Центрам мониторинга ПОО, являются высокая отказоустойчивость, минимизированные потери поступающих данных и максимальная защита от несанкционированного съема информации. Выполнить их в полной мере, при использовании существующей инфраструктуру сети связи не представляется возможным [1].

По результатам системных исследований можно сделать вывод о том, что технологической основой центра мониторинга ПОО являются два компонента: сетевая инфраструктура и унифицированные программно-технологические комплексы (рис. 1). С одной стороны, сетевая инфраструктура отвечает за гарантированную доставку информации и команд управления. С другой стороны, унифицированный программно-технологический комплекс (УПТК) позволяет гарантированно обработать, поступившую с объектов информацию.

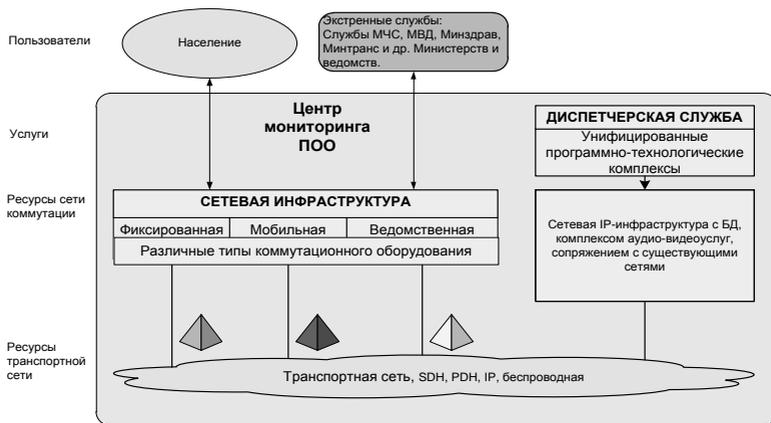


Рисунок 1. Двухкомпонентная взаимоувязанная архитектура Центра мониторинга ПОО

Исходя из приведенных выше положений, был предложен альтернативный вариант построения Центра мониторинга ПОО (рис. 2).

Основные преимущества альтернативного варианта построения Центра мониторинга ПОО:

1. обеспечивается оперативное и качественное решение задач Центра мониторинга ПОО за счет технологических возможностей новых IT-технологий;

2. работа Центра мониторинга ПОО практически не зависит от политики, темпов, сроков модернизации сети связи общего пользования (ССОП) и ведомственных сетей, в то время как другой вариант, наложенный на существующую сеть, сильно зависит от состояния этой сети;

3. позволяет в перспективе совершенствовать Центра мониторинга ПОО в соответствии с общемировым развитием телекоммуникаций;

4. универсален для любых типов сетей электросвязи, действующих на территории РФ.

Основные функциональные задачи, на первый взгляд, формируются как совокупность требований эксплуатируемых служб. В зависимости от характера возникающей ситуации УПТК Центра мониторинга ПОО обеспечивает оптимальное решение для ликвидации возможных последствий.

Исходя из этого, к оборудованию УПТК Центра мониторинга ПОО предъявляются следующие функциональные требования:

1. возможность оперативного изменения алгоритмов обслуживания поступающих в Центр мониторинга ПОО вызовов;

2. возможность организации эффективного информационного обмена в нестандартных ситуациях, как между отдельными операторами Центра мониторинга ПОО, так и с операторами других мониторинговых центров;

3. возможность введения различных форм управления процессами по решению проблем;

4. возможность оперативного привлечения консультантов и переводчиков с иностранных языков для решения некоторых задач и т. д.

Оптимальная реализация УПТК Центра мониторинга ПОО возможна только на базе программно-аппаратных средств, использующих технологии IP.

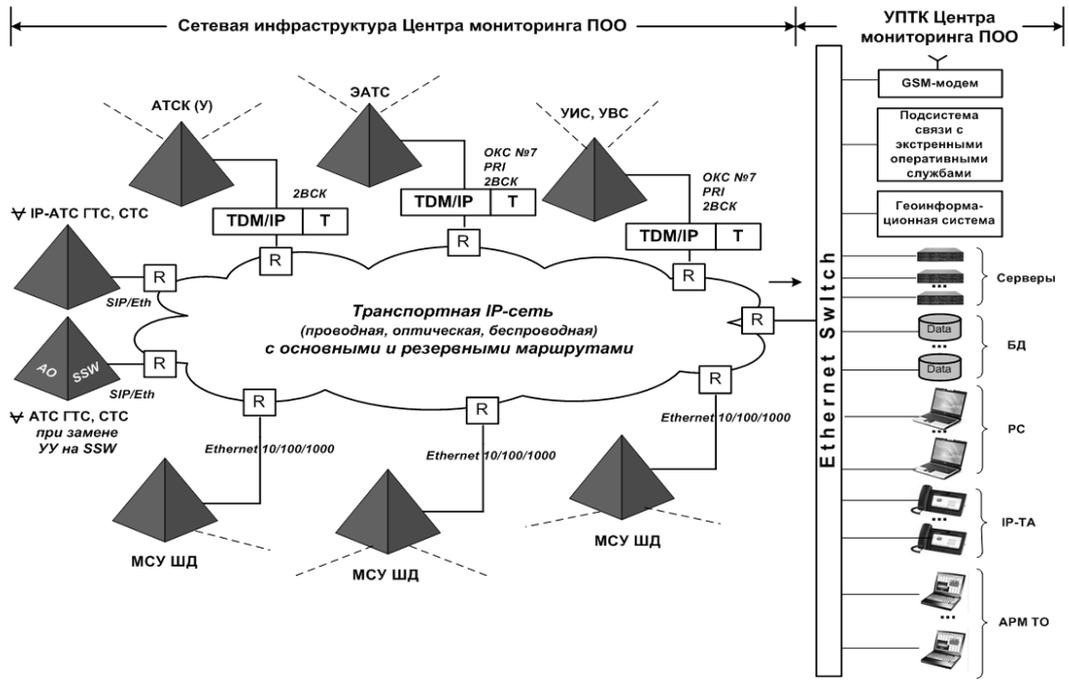


Рисунок 2. Альтернативный вариант построения Центра мониторинга ПОО

Принципам функционирования УПТК Центра мониторинга ПОО присущи особенности двух видов. Особенности первого вида обусловлены пакетными технологиями передачи данных и коммутации. Специфические задачи, возложенные на УПТК Центра мониторинга ПОО, связаны с особенностями второго вида — информационными технологиями, на базе которых функционирует УПТК Центра мониторинга ПОО. При этом возможности информационных технологий определяются пакетными технологиями передачи данных и коммутации на основе технологии IP.

При разработке УПТК Центра мониторинга ПОО необходимо учесть:

1. наличие межрегиональных путей маршрутизации в форс-мажорных случаях выхода из строя оборудования связи какого-либо района;
2. совместимость с широкополосными беспроводными средствами связи по технологиям WiMAX, TETRA и др. для организации в чрезвычайных ситуациях новых направлений связи или расширения ресурсов существующих направлений связи;
3. горячее 100 %-ное резервирование группового и серверного оборудования УПТК ЕДДС с автоматическим переключением основного оборудования на резервное;
4. поддержку информационной безопасности с помощью высокопроизводительных IP-шифраторов;
5. обеспечение требуемого запаса времени на электропитание комплекса оборудования Центра мониторинга ПОО от основных и резервных источников электропитания.

Предложенный подход, кроме всего прочего, открывает широкие возможности по интеграции Центров мониторинга ПОО различных уровней и подчинения в единую инфраструктуру. Возможность интеграции в систему по региону Центров мониторинга ПОО с другими дежурно-диспетчерскими службами экстренных оперативных служб организаций и МЧС на основе УПТК определяется в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 ноября 2011 года № 958.

Оперативное взаимодействия уровней иерархии РЦ МЧС РФ с целью решения стандартных задач оперативного мониторинга и управления обеспечивается возможностью использованием облачных технологий. При использовании которых, основное серверное оборудование, обеспечивающее организацию всевозможных БД с динамическим управлением удаленными объектами и одновременно

с обеспечением информационной безопасности и защиты персональных данных, целесообразно устанавливать в дата-центре.

В целом, предложенный вариант построения Центров мониторинга ПОО является инновационным и обеспечивает опережающее развитие. Информационно-телекоммуникационные системы и сети развиваются настолько быстро, что новые концепции, технологии и услуги связи устаревают, не успев появиться. Исходя из этого, комплекс средств связи для Центра мониторинга ПОО должен быть адаптивным под новые технологии связи. Данное требование в полной мере может быть выполнено при условии построения Центров мониторинга ПОО на базе УПТК. При этом всегда обеспечивается гарантированное качество передачи данных из любой сети связи за счет использования механизмов туннелирования трафика IP-сети.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 22.1.12-2005 «Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений». Общие требования. М., 2005.
2. Об организации единой дежурной диспетчерской службы: приказ МЧС России от 15 декабря 2008 г. № 779 // Архив МЧС России.
3. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2005 № 1314-р «Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов».

СЕКЦИЯ 2.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ НЕПОДВИЖНЫХ ДЕБАЛАНСОВ УПРАВЛЯЕМОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

Черевко Александр Николаевич

*канд. техн. наук, зав. кафедрой теоретической механики, доцент
Полтавского национального технического университета,*

Украина, г. Полтава

E-mail: alexandr-cherevko@mail.ru

KINETIC ENERGY OF THE FIXED UNBALANCES THE CONTROLLED VIBRATING MACHINES

Alexandr Cherevko

*candidate of Science, Head of Theoretical Mechanics department,
assistant professor of Poltava National Technical University,*

Ukraine, Poltava

АННОТАЦИЯ

Определяется кинетическая энергия неподвижных дебалансов технологической машины с двумя управляемыми дебалансными вибровозбудителями. Учитывается их сложное движение и используются вибрационные оси. Кинетическая энергия необходима для построения математической модели на основе уравнений Лагранжа второго рода.

ABSTRACT

Determined by the kinetic energy of the fixed unbalance technological machine with two controlled unbalanced vibro-exciter. Take into account their complex motion and used vibrating axis. Kinetic energy is needed to build a mathematical model based on the Lagrange equations of the second kind.

Ключевые слова: дебаланс; вибровозбудитель; математическая модель; кинетическая энергия.

Keywords: eccentric weight; vibration exciter; mathematical model; the kinetic energy.

Для составления математической модели сложной механической системы воспользуемся последовательностью действий, которая определяется уравнениями Лагранжа второго рода [2].

В исследованиях будет использоваться подвижная система, названная проф. Сердюком Л.И. вибрационной [1].

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i$$

где: T — кинетическая энергия системы;
 ∂q_i — обобщенная координата системы;
 $\partial \dot{q}_i$ — обобщенная скорость системы;
 Q_i — обобщенная сила системы.

Используем такие обобщенные координаты:

x, y, z — декартовы координаты, которые определяют перемещение центра масс подвижного корпуса машины вдоль соответствующих координатных осей;

α — угол, который определяет поворот подвижного корпуса в горизонтальной плоскости вокруг оси z_1 ;

β — угол, который определяет поворот подвижного корпуса в вертикальной профильной плоскости вокруг оси y_1 ;

ψ — угол, который определяет поворот подвижного корпуса в вертикальной фронтальной плоскости вокруг оси x_1 ;

φ — угол, который определяет поворот дебалансного вала относительно собственной оси;

$\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1$ — декартовы координаты, которые определяют перемещение центра масс обрабатываемой среды, вдоль соответствующих координатных осей;

$x_{oc} = \bar{x}_1 - x$; $y_{oc} = \bar{y}_1 - y$; $z_{oc} = \bar{z}_1 - z$ — декартовы координаты, которые определяют перемещение центра масс обрабатываемой среды.

Ранее уже была определена кинетическая энергия обрабатываемой среды, корпуса машины и дебалансных валов.

Найдем кинетическую энергию неподвижных дебалансов.

Кинетическая энергия неподвижного дебаланса 2.

Неподвижный дебаланс 2 совершает сложное движение. Вращаясь вокруг оси дебалансного вала 1 с угловой скоростью $\omega = \dot{\varphi}$ вместе с корпусом совершает свободное движение:

$$T_{D_2} = \frac{1}{2} m_{D_2} v_{c_2}^2 + \frac{1}{2} I_{c_2x} \omega^2.$$

где v_{c_2} — абсолютная скорость центра масс дебаланса;

$$\vec{v}_{c_2} = \vec{v}_{c_2}^\omega + \vec{v}_{c_2}^{nocm} + \vec{v}_{c_2}^r.$$

$$\vec{v}_{c_2}^\omega = \vec{\omega} \times \vec{\rho} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x_{c_2} & y_{c_2} & z_{c_2} \end{vmatrix} = \vec{i}(\omega_y z_{c_2} - \omega_z y_{c_2}) + \vec{j}(\omega_z x_{c_2} - \omega_x z_{c_2}) + \vec{k}(\omega_x y_{c_2} - \omega_y x_{c_2});$$

где x_{c_2} , y_{c_2} , z_{c_2} — координаты центра масс дебаланса;

$$x_{c_2} = 0, \quad y_{c_2} = -e \sin(\varphi + \varphi_0) - \frac{b}{2}, \quad z_{c_2} = e \cos(\varphi + \varphi_0).$$

$$\vec{v}_{c_2}^r = \vec{\omega} \times \vec{e}, \quad v_{c_2}^{rx} = 0, \quad v_{c_2}^{ry} = v_{c_2}^r \cos(\varphi + \varphi_0) = -\dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0),$$

$$v_{c_2}^{rz} = -v_{c_2}^r \sin(\varphi + \varphi_0) = -\dot{\varphi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0).$$

$$v_{c_2}^{\omega x} = \omega_y z_{c_2} - \omega_z y_{c_2} = \dot{\beta} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha} \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right);$$

$$v_{c_2}^{\omega y} = \omega_z x_{c_2} - \omega_x z_{c_2} = \dot{\alpha} \cdot 0 - \dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) = -\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0);$$

$$v_{c_2}^{\omega z} = \omega_x y_{c_2} - \omega_y x_{c_2} = \dot{\psi} \cdot \left(-e \sin(\varphi + \varphi_0) - \frac{b}{2} \right) - \dot{\beta} \cdot 0 = -\dot{\psi} \cdot \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right);$$

$$\vec{v}_{c_2}^{nocm} = \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} + \dot{z} \cdot \vec{k}; \quad v_{c_2x}^{nocm} = \dot{x}; \quad v_{c_2y}^{nocm} = \dot{y}; \quad v_{c_2z}^{nocm} = \dot{z}.$$

$$v_{c_2}^x = v_{c_2}^{\omega x} + v_{c_2x}^{nocm} + v_{c_2}^{rx} = \dot{\beta} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha} \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{x};$$

$$v_{c_2}^y = v_{c_2}^{\omega y} + v_{c_2y}^{nocm} + v_{c_2}^{ry} = -\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - \dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{y};$$

$$v_{c_2}^z = v_{c_2}^{\omega z} + v_{c_2z}^{nocm} + v_{c_2}^{rz} = -\dot{\psi} \cdot \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{z};$$

$$v_{c_2}^2 = \left(\dot{\beta} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha} \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{x} \right)^2 + \left(-\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - \dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + (-\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - \dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{y})^2 + \left(-\dot{\varphi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) - \dot{\psi} \cdot \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{z} \right)^2 = A_2 + B_2 + C_2.$$

Преобразуем полученное выражение

$$\begin{aligned} A_2 &= \left(\dot{\beta} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha} \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{x} \right)^2 = \dot{\beta}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) + \\ &+ 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha}^2 \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot \frac{b}{2} e \cos(\varphi + \varphi_0) + \\ &+ 2\dot{\alpha}\dot{x} \cdot \frac{b}{2} e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\beta}\dot{x} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}\dot{x} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha}^2 \frac{b^2}{4} + 2\dot{\alpha}\dot{x} \frac{b}{2} + \dot{x}^2; \\ B_2 &= \left(-\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - \dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{y} \right)^2 = \dot{\psi}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \cdot e^2 \times \\ &\times \cos^2(\varphi + \varphi_0) + \dot{\varphi}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{y}\dot{\psi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{y}\dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{y}^2; \\ C_2 &= \left(-\dot{\varphi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) - \dot{\psi} \cdot \left(e \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{b}{2} \right) + \dot{z} \right)^2 = \dot{\psi}^2 \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) + \\ &+ 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) + \dot{\varphi}^2 \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{z}\dot{\psi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{z}\dot{\varphi} \times \\ &\times e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}^2 \frac{b}{2} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \frac{b}{2} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{z}^2 - 2\dot{z}\dot{\psi} \frac{b}{2} + \dot{\psi}^2 \frac{b^2}{4}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{c_2}^2 = & \dot{\beta}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha}^2 \cdot e^2 \times \sin^2(\varphi + \varphi_0) + \\
& + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot \frac{b}{2} e \cos(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}^2 \cdot \frac{b}{2} e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\beta}\dot{x} \times e \cos(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}\dot{x} \times \\
& \times e \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{\alpha}^2 \frac{b^2}{4} + 2\dot{\alpha}\dot{x} \frac{b}{2} + \dot{x}^2 + \dot{\psi}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) + \\
& + \dot{\varphi}^2 \cdot e^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{\psi}\dot{y} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{y}\dot{\varphi} \cdot e \cos(\varphi + \varphi_0) + \dot{y}^2 + \dot{\psi}^2 \times \\
& \times e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) + \dot{\varphi}^2 \cdot e^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0) - 2\dot{z}\dot{\psi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) - \\
& - 2\dot{z}\dot{\varphi} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}^2 \frac{b}{2} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} \frac{b}{2} \cdot e \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{z}^2 - 2\dot{z}\dot{\psi} \frac{b}{2} + \\
& + \dot{\psi}^2 \frac{b^2}{4} = (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} e^2 + \\
& + \dot{\varphi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}\dot{\beta} b e + 2\dot{\beta}\dot{x} e - 2\dot{y}\dot{\psi} e - 2\dot{y}\dot{\varphi} e) \cos(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 b e + 2\dot{\alpha}\dot{x} e - \\
& - 2\dot{z}\dot{\psi} e - 2\dot{z}\dot{\varphi} e + \dot{\psi}^2 b e + \dot{\psi}\dot{\varphi} b e) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + b(\dot{\alpha}\dot{x} - \dot{z}\dot{\psi}) + \frac{b^2}{4} \times \\
& \times (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0). \\
T_{D_2} = & \frac{1}{2} m_{D_2} \left((\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi} e^2 + \right. \\
& \left. + \dot{\varphi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}\dot{\beta} b e + 2\dot{\beta}\dot{x} e - 2\dot{y}\dot{\psi} e - 2\dot{y}\dot{\varphi} e) \cos(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 b e + 2\dot{\alpha}\dot{x} e - \right. \\
& \left. - 2\dot{z}\dot{\psi} e - 2\dot{z}\dot{\varphi} e + \dot{\psi}^2 b e + \dot{\psi}\dot{\varphi} b e) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + b(\dot{\alpha}\dot{x} - \dot{z}\dot{\psi}) + \frac{b^2}{4} \times \right. \\
& \left. \times (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) \right) + \frac{1}{2} I_{c_2 x} \dot{\varphi}^2.
\end{aligned}$$

Кинетическая энергия неподвижного дебаланса 5.

Неподвижный дебаланс 5 совершает сложное движение. Вращаясь вокруг оси дебалансного вала 2 с угловой скоростью $\omega = \dot{\varphi}$, вместе с корпусом совершает свободное движение:

$$T_{D_5} = \frac{1}{2} m_{D_5} v_{c_5}^2 + \frac{1}{2} I_{c_5 x} \omega^2.$$

где v_{c_5} — абсолютная скорость центра масс дебаланса;

$$\vec{v}_{c_5} = \vec{v}_{c_5}^\omega + \vec{v}_{c_5}^{ном} + \vec{v}_{c_5}^r.$$

$$\vec{v}_{c_5}^{\omega} = \vec{\omega} \times \vec{\rho} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x_{c_5} & y_{c_5} & z_{c_5} \end{vmatrix} = \vec{i}(\omega_y z_{c_5} - \omega_z y_{c_5}) + \vec{j}(\omega_z x_{c_5} - \omega_x z_{c_5}) + \vec{k}(\omega_x y_{c_5} - \omega_y x_{c_5}) ;$$

где x_{c_5} , y_{c_5} , z_{c_5} — координаты центра масс дебаланса;

$$\begin{aligned} x_{c_5} &= 0, \quad y_{c_5} = e \sin \varphi + \frac{b}{2}, \quad z_{c_5} = e \cos \varphi . \\ \vec{v}_{c_2}^r &= \vec{\omega} \times \vec{e} . \quad v_{c_5}^{rx} = 0, \quad v_{c_5}^{ry} = v_{c_5}^r \cos \varphi = \dot{\varphi} \cdot e \cos \varphi \\ & \quad v_{c_5}^{rz} = -v_{c_5}^r \sin \varphi = -\dot{\varphi} \cdot e \sin \varphi \\ v_{c_5}^{\omega x} &= \omega_y z_{c_5} - \omega_z y_{c_5} = \dot{\beta} \cdot e \cos \varphi - \dot{\alpha} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) ; \\ v_{c_5}^{\omega y} &= \omega_z x_{c_5} - \omega_x z_{c_5} = \dot{\alpha} \cdot 0 - \dot{\psi} \cdot e \cos \varphi = -\dot{\psi} \cdot e \cos \varphi ; \\ v_{c_5}^{\omega z} &= \omega_x y_{c_5} - \omega_y x_{c_5} = \dot{\psi} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) - \dot{\beta} \cdot 0 = \dot{\psi} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) \\ \vec{v}_{c_5}^{nocm} &= \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} + \dot{z} \cdot \vec{k} . \quad v_{c_5x}^{nocm} = \dot{x}, \quad v_{c_5y}^{nocm} = \dot{y}, \quad v_{c_5z}^{nocm} = \dot{z} . \\ v_{c_5}^x &= v_{c_5}^{\omega x} + v_{c_5x}^{nocm} + v_{c_5}^{rx} = \dot{\beta} \cdot e \cos \varphi - \dot{\alpha} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{x} ; \\ v_{c_5}^y &= v_{c_5}^{\omega y} + v_{c_5y}^{nocm} + v_{c_5}^{ry} = -\dot{\psi} \cdot e \cos \varphi + \dot{\varphi} \cdot e \cos \varphi + \dot{y} ; \\ v_{c_5}^z &= v_{c_5}^{\omega z} + v_{c_5z}^{nocm} + v_{c_5}^{rz} = -\dot{\varphi} \cdot e \sin \varphi + \dot{\psi} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{z} ; \\ v_{c_5}^2 &= \left(\dot{\beta} \cdot e \cos \varphi - \dot{\alpha} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{x} \right)^2 + \left(-\dot{\psi} \cdot e \cos \varphi + \dot{\varphi} \cdot e \cos \varphi + \dot{y} \right)^2 + \\ &+ \left(-\dot{\varphi} \cdot e \sin \varphi + \dot{\psi} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{z} \right)^2 = A_5 + B_5 + C_5 . \end{aligned}$$

Преобразуем полученное выражение

$$\begin{aligned}
A_3 &= \left(\dot{\beta} \cdot e \cos \varphi - \dot{\alpha} \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{x} \right)^2 = \dot{\beta}^2 e^2 \cos^2 \varphi - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi + \dot{\alpha}^2 e^2 \sin^2 \varphi + \\
&+ 2\dot{\beta}\dot{x}e \cos \varphi - 2\dot{\alpha}\dot{x}e \sin \varphi - \dot{\beta}\dot{\alpha}be \cos \varphi + \dot{\alpha}^2 be \sin \varphi + \dot{x}^2 - \dot{\alpha}\dot{x}b + \dot{\alpha}^2 \frac{b^2}{4}; \\
B_3 &= (-\dot{\psi} \cdot e \cos \varphi + \dot{\phi} \cdot e \cos \varphi + \dot{y})^2 = \dot{\psi}^2 \cdot e^2 \cos^2 \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi} \cdot e^2 \cos^2 \varphi + \dot{\phi}^2 \cdot e^2 \cos^2 \varphi - \\
&- 2\dot{\psi}\dot{y} \cdot e \cos \varphi + 2\dot{\phi}\dot{y} \cdot e \cos \varphi + \dot{y}^2; \\
C_3 &= \left(-\dot{\phi} \cdot e \sin \varphi + \dot{\psi} \cdot \left(e \sin \varphi + \frac{b}{2} \right) + \dot{z} \right)^2 = \dot{\psi}^2 e^2 \sin^2 \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 \sin^2 \varphi + \dot{\phi}^2 \cdot e^2 \sin^2 \varphi + \\
&+ 2\dot{\psi}\dot{z}e \sin \varphi - 2\dot{\phi}\dot{z}e \sin \varphi + 2\dot{\psi}^2 \frac{b}{2} e \sin \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi} \frac{b}{2} e \sin \varphi + \dot{z}^2 + 2\dot{z}\dot{\psi} \frac{b}{2} + \dot{\psi}^2 \frac{b^2}{4}; \\
v_{c_3}^2 &= \dot{\beta}^2 e^2 \cos^2 \varphi - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi + \dot{\alpha}^2 e^2 \sin^2 \varphi + 2\dot{\beta}\dot{x}e \cos \varphi - 2\dot{\alpha}\dot{x}e \sin \varphi - \\
&- \dot{\beta}\dot{\alpha}be \cos \varphi + \dot{\alpha}^2 be \sin \varphi + \dot{x}^2 - \dot{\alpha}\dot{x}b + \dot{\alpha}^2 \frac{b^2}{4} + \dot{\psi}^2 \cdot e^2 \cos^2 \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 \cos^2 \varphi + \\
&+ \dot{\phi}^2 e^2 \cos^2 \varphi - 2\dot{\psi}\dot{y}e \cos \varphi + 2\dot{\phi}\dot{y}e \cos \varphi + \dot{y}^2 + \dot{\psi}^2 e^2 \sin^2 \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 \sin^2 \varphi + \\
&+ \dot{\phi}^2 \cdot e^2 \sin^2 \varphi + 2\dot{\psi}\dot{z}e \sin \varphi - 2\dot{\phi}\dot{z}e \sin \varphi + 2\dot{\psi}^2 \frac{b}{2} e \sin \varphi - 2\dot{\psi}\dot{\phi} \frac{b}{2} e \sin \varphi + \dot{z}^2 + \\
&+ 2\dot{z}\dot{\psi} \frac{b}{2} + \dot{\psi}^2 \frac{b^2}{4} = \left(\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2 \right) \cos^2 \varphi + \left(\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \right. \\
&+ \dot{\phi}^2 \cdot e^2 \left. \right) \sin^2 \varphi + \left(2\dot{\beta}\dot{x}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\phi}\dot{y}e \right) \cos \varphi + \left(\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - 2\dot{\phi}\dot{z}e + \right. \\
&+ \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\phi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e \left. \right) \sin \varphi + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (-\dot{\alpha}\dot{x} + \dot{z}\dot{\psi})b + \left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2 \right) \frac{b^2}{4} - \\
&- 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi; \\
T_{\mathcal{L}_3} &= \frac{1}{2} m_{\mathcal{L}_3} \left(\left(\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2 \right) \cos^2 \varphi + \left(\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \right. \right. \\
&+ \dot{\phi}^2 \cdot e^2 \left. \right) \sin^2 \varphi + \left(2\dot{\beta}\dot{x}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\phi}\dot{y}e \right) \cos \varphi + \left(\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - 2\dot{\phi}\dot{z}e + \right. \\
&+ \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\phi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e \left. \right) \sin \varphi + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (-\dot{\alpha}\dot{x} + \dot{z}\dot{\psi})b + \left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2 \right) \frac{b^2}{4} - \\
&- 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi \left. \right) + \frac{1}{2} I_{c_3, x} \dot{\varphi}^2.
\end{aligned}$$

Определим кинетическую энергию неподвижных дебалансов:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ИД}} = T_{\mathcal{L}_2} + T_{\mathcal{L}_5} = & \frac{1}{2} m_{\mathcal{L}_2} \left((\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + \right. \\
& + 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}\dot{\beta}be + 2\dot{\beta}\dot{x}e - 2\dot{y}\dot{\psi}e - 2\dot{y}\dot{\phi}e) \cos(\varphi + \varphi_0) + \\
& + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\alpha}\dot{x}e - 2\dot{z}\dot{y}e - 2\dot{z}\dot{\phi}e + \dot{\psi}^2 be + \dot{\psi}\dot{\phi}be) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + \\
& + b(\dot{\alpha}\dot{x} - \dot{z}\dot{\psi}) + \frac{b^2}{4} (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{1}{2} I_{c_2x} \dot{\phi}^2 + \\
& + \frac{1}{2} m_{\mathcal{L}_5} \left((\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2) \cos^2 \varphi + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \right. \\
& + \dot{\phi}^2 \cdot e^2) \sin^2 \varphi + (2\dot{\beta}\dot{x}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\phi}\dot{y}e) \cos \varphi + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - 2\dot{\phi}\dot{z}e + \\
& + \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\phi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e) \sin \varphi + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (-\dot{\alpha}\dot{x} + \dot{z}\dot{\psi})b + (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) \frac{b^2}{4} - \\
& \left. - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi \right) + \frac{1}{2} I_{c_5x} \dot{\phi}^2.
\end{aligned}$$

Учитывая то, что неподвижные дебалансы одинаковые, принимаем следующие обозначения:

$$m_{\mathcal{L}_2} = m_{\mathcal{L}_5} = m_{\text{ИД}}; \quad I_{c_2x} = I_{c_5x} = I_{\text{ИД}}^{\text{ИД}}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ИД}} = & \frac{1}{2} m_{\text{ИД}} \left((\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \right. \\
& + \dot{\phi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}\dot{\beta}be + 2\dot{\beta}\dot{x}e - 2\dot{y}\dot{\psi}e - 2\dot{y}\dot{\phi}e) \cos(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\alpha}\dot{x}e - \\
& - 2\dot{z}\dot{y}e - 2\dot{z}\dot{\phi}e + \dot{\psi}^2 be + \dot{\psi}\dot{\phi}be) \sin(\varphi + \varphi_0) + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + b(\dot{\alpha}\dot{x} - \dot{z}\dot{\psi}) + \frac{b^2}{4} (\dot{\alpha}^2 + \\
& + \dot{\psi}^2) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) + ((\dot{\beta}^2 e^2 + \\
& + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 e^2) \cos^2 \varphi + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\phi}e^2 + \dot{\phi}^2 \cdot e^2) \sin^2 \varphi + (2\dot{\beta}\dot{x}e - \\
& - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\phi}\dot{y}e) \cos \varphi + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - 2\dot{\phi}\dot{z}e + \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\phi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e) \sin \varphi + \\
& + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (-\dot{\alpha}\dot{x} + \dot{z}\dot{\psi})b + (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) \frac{b^2}{4} - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}e^2 \cos \varphi \sin \varphi) + I_{\text{ИД}}^{\text{ИД}} \dot{\phi}^2.
\end{aligned}$$

Преобразуем полученное выражение:

$$T_{\text{ИД}} = \frac{1}{2} m_{\text{ИД}} (a + b + c + d + e + 2(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{b^2}{2} (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2)) + I_{\text{ИД}}^{\text{ИД}} \dot{\phi}^2,$$

где:

$$a = (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \times \\ \times \cos^2 \varphi;$$

$$b = (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \times \\ \times \sin^2 \varphi;$$

$$c = (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\alpha}\dot{x}e - 2\dot{z}\dot{y}e - 2\dot{z}\dot{\varphi}e + \dot{\psi}^2 be + \dot{\psi}\dot{\varphi}be) \sin(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - \\ - 2\dot{\varphi}\dot{z}e + \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\varphi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e) \sin \varphi;$$

$$d = (\dot{\alpha}\dot{\beta}be + 2\dot{\beta}\dot{x}e - 2\dot{y}\dot{y}e - 2\dot{y}\dot{\varphi}e) \cos(\varphi + \varphi_0) + (2\dot{\beta}\dot{x}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\varphi}\dot{y}e) \times \\ \times \cos \varphi;$$

$$e = 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 (\cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) - \cos \varphi \sin \varphi).$$

$$a = (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \times \\ \times \cos^2 \varphi = (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) (1 + \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0) - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 \sin(2\varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0;$$

$$b = (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) \times \\ \times \sin^2 \varphi = (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) (1 - \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 \sin(2\varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0;$$

$$a + b = (\dot{\beta}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) (1 + \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0) - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 \times \\ \times \sin(2\varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0 + (\dot{\alpha}^2 e^2 + \dot{\psi}^2 e^2 + \dot{\varphi}^2 e^2) (1 - \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0) + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}e^2 \times \\ \times \sin(2\varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0 = (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 + 2\dot{\psi}^2 + 2\dot{\varphi}^2) e^2 + (\dot{\beta}^2 - \dot{\alpha}^2) e^2 \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0;$$

$$c = (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\alpha}\dot{x}e - 2\dot{z}\dot{y}e - 2\dot{z}\dot{\varphi}e + \dot{\psi}^2 be + \dot{\psi}\dot{\varphi}be) \sin(\varphi + \varphi_0) + (\dot{\alpha}^2 be + 2\dot{\psi}\dot{z}e - \\ - 2\dot{\varphi}\dot{z}e + \dot{\psi}^2 be - \dot{\psi}\dot{\varphi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e) \sin \varphi = 2(\dot{\alpha}^2 be + \dot{\psi}^2 be - 2\dot{\varphi}\dot{z}e) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} - \\ - 2(2\dot{\psi}\dot{z}e - \dot{\psi}\dot{\varphi}be - 2\dot{\alpha}\dot{x}e) \sin \frac{\varphi_0}{2} \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right);$$

$$d = (\dot{\alpha}\dot{\beta}be + 2\dot{\beta}\dot{x}e - 2\dot{y}\dot{y}e - 2\dot{y}\dot{\varphi}e) \cos(\varphi + \varphi_0) + (2\dot{\beta}\dot{x}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be - 2\dot{\psi}\dot{y}e + 2\dot{\varphi}\dot{y}e) \times \\ \times \cos \varphi = 2(2\dot{\beta}\dot{x}e - 2\dot{y}\dot{y}e) \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} + 2(2\dot{\varphi}\dot{y}e - \dot{\beta}\dot{\alpha}be) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin \frac{\varphi_0}{2};$$

$$e = 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 (\cos(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi + \varphi_0) - \cos \varphi \sin \varphi) = 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \cdot e^2 \sin \varphi_0 \cos(2\varphi + \varphi_0).$$

$$\begin{aligned}
a + b + c + d + e = & (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 + 2\dot{\psi}^2 + 2\dot{\varphi}^2)e^2 + (\dot{\beta}^2 - \dot{\alpha}^2)e^2 \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0 + \\
& + 2(\dot{\alpha}^2 be + \dot{\psi}^2 be - 2\dot{\varphi} \dot{z} e) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} - 2(2\dot{\psi} \dot{z} e - \dot{\psi} \dot{\varphi} be - 2\dot{\alpha} \dot{x} e) \sin \frac{\varphi_0}{2} \times \\
& \times \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) + 2(2\dot{\beta} \dot{x} e - 2\dot{y} \dot{\psi} e) \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} + 2(2\dot{\varphi} \dot{y} e - \dot{\beta} \dot{\alpha} be) \times \\
& \times \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin \frac{\varphi_0}{2} + 2\dot{\alpha} \dot{\beta} \cdot e^2 \sin \varphi_0 \cos(2\varphi + \varphi_0);
\end{aligned}$$

Кинетическая энергия неподвижных дебалансов имеет вид:

$$\begin{aligned}
T_{\text{нд}} = & \frac{1}{2} m_{\text{нд}} \left((\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 + 2\dot{\psi}^2 + 2\dot{\varphi}^2)e^2 + (\dot{\beta}^2 - \dot{\alpha}^2)e^2 \cos(2\varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0 + \right. \\
& + 2(\dot{\alpha}^2 be + \dot{\psi}^2 be - 2\dot{\varphi} \dot{z} e) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} - 2(2\dot{\psi} \dot{z} e - \dot{\psi} \dot{\varphi} be - 2\dot{\alpha} \dot{x} e) \sin \frac{\varphi_0}{2} \times \\
& \times \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) + 2(2\dot{\beta} \dot{x} e - 2\dot{y} \dot{\psi} e) \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos \frac{\varphi_0}{2} + 2(2\dot{\varphi} \dot{y} e - \dot{\beta} \dot{\alpha} be) \times \\
& \times \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin \frac{\varphi_0}{2} + 2\dot{\alpha} \dot{\beta} \cdot e^2 \sin \varphi_0 \cos(2\varphi + \varphi_0) + 2(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \left. \frac{b^2}{2} (\dot{\alpha}^2 + \dot{\psi}^2) \right) + \\
& + I_{\text{cx}}^{\text{нд}} \dot{\varphi}^2.
\end{aligned}$$

Выводы

При сложном движении вибрационной машины кинетическая энергия неподвижных дебалансов в большей степени зависит от вращательного движения, чем от поступательного.

Список литературы:

1. Сердюк Л.І., Черевко О.М., Давиденко Ю.О. Керовані вібраційні машини з дебалансними збуджувачами (теорія, дослідження, конструювання): монографія / Л.І. Сердюк, О.М. Черевко, Ю.О. Давиденко, Полтава: ТОВ “АСМІ”, 2013. — 370 с.
2. Яблонский А.А. Курс теоретической механики / Ч. II. Динамика: Учебник для техн. вузов. 6-е изд., испр. М.: Высш. шк., 1984. — 423 с.

СЕКЦИЯ 3.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

Николаев Михаил Юрьевич

*канд. техн. наук, доцент,
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: munp@yandex.ru*

Есимов Асет Мухаммедович

*студент 3 курса, энергетического факультета,
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: esimov007@mail.ru*

Леонов Виталий Владимирович

*студент 3 курса, энергетического факультета,
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск*

ELECTROSTATIC PRECIPITATORS: WORKING PRINCIPLE AND MAIN DIGNITIES

Nikolayev Michael

*candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

Esimov Aset

*student, the Institute of Energetic of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрен подробный принцип работы электрофильтров. Также рассмотрены различные типы электрофильтров, осадительных и коронирующих электродов. Приведены случаи, при которых происходит процесс ионизации газов между электродами. Описаны достоинства современных электрофильтров.

ABSTRACT

This article describes the detailed working principle of electrostatic precipitators. It also considered various types of electrostatic precipitators, the collecting and corona electrodes. Situations in which the process gases between the ionization electrodes. Described the dignities of modern electrostatic precipitators.

Ключевые слова: электрофильтр; электрод; ионизация; коронный разряд.

Keywords: electrostatic precipitator; electrode; ionization; corona discharge.

Электрофильтр — это устройство, в котором очистка газов от аэрозольных, твердых или жидких частиц происходит под действием электрических сил. В результате действия электрического поля заряженные частицы выводятся из очищаемого газового потока и осаждаются на электродах. Зарядка частиц происходит в поле коронного разряда. Электрофильтр представляет собой корпус прямолинейной или цилиндрической формы, внутри которого смонтированы осадительные и коронирующие электроды различной конструкции (в зависимости от назначения и области применения электрофильтра, а также от специфики улавливаемых частиц). Коронирующие электроды подключены к высоковольтному источнику питания выпрямленным током напряжением 50—60 кВ. Электрофильтры, в которых улавливаемые твердые частицы удаляются с электродов встряхиванием, называются сухими, а те, в которых осажённые частицы смываются с электродов жидкостью или улавливаются жидкие частицы (туман, брызги), — мокрыми.

По числу электрических полей, через которые очищенный газ последовательно проходит, электрофильтры подразделяют на однополевые и многополевые. Иногда электрофильтры разбивают на параллельные по ходу газа камеры — секции. По этому признаку они могут

быть одно- и многосекционными. Очищаемый в электрофилтре газ проходит активную зону в вертикальном или горизонтальном направлениях, поэтому электрофилтры бывают вертикальными или горизонтальными. По типу осадительных электродов электрофилтры делят на пластинчатые и трубчатые. Основные конструкторские типы электрофилтров — горизонтальный пластинчатый и вертикальный трубчатый.

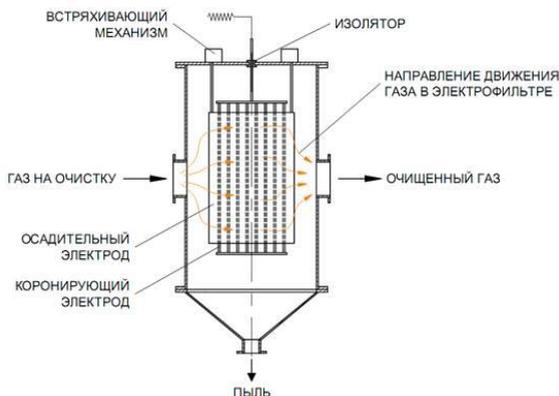


Рисунок 1. Горизонтальный пластинчатый электрофилтр

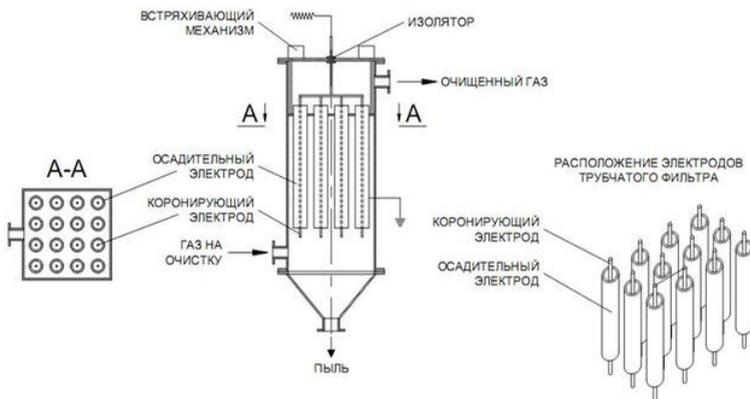


Рисунок 2. Трубчатый электрофилтр

Чтобы понять принцип работы электрофилтра, следует сначала рассмотреть электрическую цепь. Она состоит из таких элементов,

как источник тока и двух, параллельно расположенных друг к другу металлических пластин, которые разделены между собой воздухом. Это устройство представляет собой не что иное, как воздушный конденсатор, однако электрический ток в такой цепи течь не будет, потому что слой воздуха между пластинами, как, впрочем, и другие газы, не способен проводить электричество.

Однако стоит только приложить к металлическим пластинам необходимую разность потенциалов, как гальванометр, подключенный к этой цепи, зафиксирует прохождение электрического тока из-за ионизации слоя воздуха между этими пластинами.

Что касается ионизации газа между двумя электродами, то она может возникать в двух случаях:

1. Несамостоятельно, то есть с применением каких-либо «ионизаторов», к примеру, рентгеновских или других лучей. После того, как воздействие этого «ионизатора» будет закончено, начнет постепенно наступать рекомбинация, то есть будет происходить обратный процесс: ионы различных знаков вновь станут соединяться между собой, образуя тем самым электронейтральные молекулы газа.

2. Самостоятельно, осуществляется за счет повышения в электросети напряжения до величины, которая превышает величину диэлектрической постоянной используемого газа.

При электрической очистке газов применяется только вторая ионизация, то есть самостоятельная.

Если начать увеличивать разность потенциалов между металлическими пластинами, то в какой-то момент она обязательно достигнет критической точки (пробивное напряжения для слоя воздуха), воздух будет «пробит» и в цепи резко возрастет сила тока, а между металлическими пластинами появится искра, которую назвали – самостоятельный газовый разряд.

Молекулы воздуха под напряжением начинают расщепляться на положительно и отрицательно заряженные ионы, и электроны. Под воздействием электрического поля ионы двигаются к электродам, которые заряжены противоположно. С увеличением напряжения электрического поля скорость, а, соответственно, и кинетическая энергия ионов и электронов начинает постепенно возрастать. Когда их скорость доходит до критической величины и несколько превышает ее, они расщепляют все нейтральные молекулы, встречающиеся на пути. Так происходит ионизация всего газа, находящегося между двумя электродами.

Когда между параллельно расположенными пластинами одновременно образуется довольно значительное число ионов, сила

электрического тока начинает сильно возрастать и появляется искровой разряд.

В силу того, что молекулы воздуха получают от ионов, движущихся в определенном направлении, импульсы, вместе с так называемой «ударной» ионизацией возникает еще и достаточно интенсивное движение воздушной массы.

Самостоятельную ионизацию в методике электроочистки газов осуществляют путем приложения на электроды высоких напряжений. При ионизации данным способом нужно, чтобы слой газа пробивало лишь на некотором отрезке расстояния между двумя электродами. Необходимо чтобы часть газа оставалась непробитой и служила в своем роде изоляцией, которая бы предохраняла от короткого замыкания параллельные электроды от возникновения искры или дуги (чтобы не произошло пробоя диэлектрика).

Создают такую «изоляцию» путем подбора формы электродов, а также расстояния между ними в соответствии с напряжением. Стоит отметить, что электроды, которые представлены в виде двух параллельных плоскостей, в этом случае не подойдут, так как между ними в любой точке поля всегда будет одинаковое напряжение, то есть поле будет неизменно однородным. Когда разность потенциалов между одним плоским электродом и другим достигнет величины пробивного напряжения, весь воздух будет пробит и появится искровой разряд, однако ионизации воздуха не случится в силу того, что все поле однородно.

Неоднородное поле может возникнуть только между электродами, которые имеют вид концентрических цилиндров (трубы и провода), либо же плоскости и цилиндра (пластина и провода). Непосредственно вблизи провода напряжение поля настолько большое, что ионы и электроны становятся способны к ионизации нейтральных молекул, однако по мере удаления от провода напряжение поля и скорость движения ионов настолько уменьшаются, что ударная ионизация попросту становится нереальной.

Соотношение между величиной радиуса трубы (R) и провода (r) должно быть обязательно определенным во избежание появления искры между двумя цилиндрическими электродами. Расчеты показали, что ионизация газа без короткого замыкания возможна при R/r больше или равным 2,72.

Появление вокруг проволоки слабого свечения или так называемой «короны» является основным видимым признаком того, что наступил ионный разряд. Такое явление называется коронным

разрядом. Слабое свечение постоянно сопровождается характерный звук — это может быть потрескивание, либо же шипение.

Провод (электрод), вокруг которого возникает свечение, называют коронирующим электродом. «Корона» в зависимости от того каким полюсом соединен провод, бывает либо положительной, либо отрицательной. При электрической очистке газов используют только второй вариант, то есть отрицательную «корону». Хотя она, в отличие от положительной, менее равномерна, все же такая «корона» способна допускать более высокую критическую разность потенциалов.

К осадительным электродам предъявляются следующие требования: быть прочными, жесткими, иметь гладкую поверхность, чтобы можно было без проблем удалять уловленную пыль, а также достаточно высокие аэродинамические характеристики.

Осадительные электроды по форме и конструкции условно делятся на три больших группы: 1) пластинчатые; 2) коробчатые; 3) желобчатые.

К коронирующим электродам предъявляются следующие требования: должны иметь точную форму, чтобы обеспечить интенсивный и достаточно однородный коронный разряд; обладать механической прочностью и жесткостью, чтобы обеспечить надежную, бесперебойную и долговечную работу в условиях встряхивания и вибрации; быть простыми в изготовлении и иметь низкую стоимость, так как коронирующие электроды могут достигать в длину (общую) 10 километров; быть стойкими к агрессивным средам.

Различают две большие группы коронирующих электродов: электроды без фиксированных разрядных точек и электроды с фиксированными разрядными точками по всей длине электрода. У вторых источники разряда — это острые выступы или шипы, при этом есть возможность управлять работой электрода. Для этого нужно менять расстояние между шипами.

Систему осадительных и коронирующих электродов размещают, как правило, внутри металлического сварного корпуса, в редких случаях в корпусе из железобетона, который изготовлен в форме П-образных рам. Оборудование внутрь корпуса загружают либо сверху, либо сбоку. Корпус снаружи должен обязательно иметь теплоизоляцию во избежание температурных деформаций и появления конденсации влаги.

Узел подвода и равномерного распределения запыленного воздуха, как правило, состоит из системы газораспределительных решеток, которые установлены перед главной камерой, где располагается система осадительных и коронирующих электродов, и представляет

собой перфорированные листы, установленные в два яруса, их живое сечение составляет от 35 до 50 процентов.

Чтобы удалить уловленную пыль из электрофильтров, применяют специальные системы встряхивания электродов. В сухих электрофильтрах обычно используют несколько таких систем — это пружинно-кулачковая, ударно-молотковая, вибрационная, либо же магнитно-импульсная система. Кроме этого, уловленные частицы могут просто смывать с электродов водой.

Преимущества электрофильтров: возможность самой высокой степени очистки газов (до 99,9 %), низкие затраты энергии (до 0,8 кВт на 1000 м³ газа), очистка газа может проводиться даже при высоких температурах, процесс очистки может быть полностью автоматизирован.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 51707-2001. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. Введ. 29.01.2001. М.: Изд-во стандартов, 2001.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
3. Санаев Ю.И. Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация./Обзорная информация. Серия ХМ-14. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», 1984.

**ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В КАБЕЛЕ
И ТРАНСФОРМАТОРЕ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ
ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ
ФОРМЫ КРИВОЙ ТОКА**

Осипов Дмитрий Сергеевич

*канд. техн. наук,
доцент Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: ossipovdmitriy@list.ru*

Мохова Дарья Владимировна

*магистрант 2 курса
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: Paladin_93kz@mail.ru*

Киселёв Богдан Юрьевич

*студент 4 курса
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: bob_93_kz@mail.ru*

Сатпаев Дмитрий Сергеевич

*студент 5 курса
Омского государственного технического университета,
РФ, г. Омск
E-mail: satpaevdmitriy.kz@yandex.ru*

**POWER LOSSES IN CABLES AND TRANSFORMERS
IN VIEW OF TEMPERATURE LIVE PARTS
AND THE NON-SINUSOIDAL CURRENT WAVEFORM**

Dmitriy Osipov

*candidate of Science,
assistant professor of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

Daria Mohova

*undergraduate 2 course of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

Bogdan Kiselyov

*4th year student of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

Dmitriy Satpaev

*5th year student of Omsk State Technical University,
Russia, Omsk*

АННОТАЦИЯ

Целью статьи является расчет потерь мощности в токоведущих частях и трансформаторе с учётом несинусоидальности формы кривой тока и температуры токоведущей жилы. Авторами разработаны методы учета нагрева токоведущих частей при расчете потерь при несинусоидальных режимах СЭС. Для решения этой задачи предложено использование итерационного подхода. На основе анализа проделанной работы сделаны следующие выводы: показано, что не учет нагрева при выборе мероприятий по снижению потерь может привести к более серьезным ошибкам, чем просто при расчете потерь.

ABSTRACT

The aim of the article is to calculate the power loss in the current-carrying parts and transformer, taking into account non-sinusoidal current waveform and the temperature of the conductors. The authors have developed a method for heating live parts in the calculation of losses in non-sinusoidal modes of SES. To solve this problem, proposed the use of an iterative approach. On the basis of this work the following conclusions: it is shown that not keeping heat in selecting measures to reduce losses can lead to more serious errors than the calculation of losses.

Ключевые слова: несинусоидальность; нелинейная нагрузка.

Keywords: unisusoidality; non-linear load.

Элементы сети при расчете несинусоидальных режимов обычно представляются в виде схем замещения с линейными сопротивлениями и линейными проводимостями [2, с. 210]. Однако в действительности часть этих сопротивлений и проводимостей являются нелинейными. В частности, нелинейными являются проводимости поперечных ветвей трансформаторов. Причина этого явления состоит

в насыщении магнитопроводов, что приводит к появлению в сети высших гармоник через влияние намагничивающих токов.

Существует также другой вид нелинейности элементов сети — нелинейность активных сопротивлений проводников вследствие температурной зависимости.

Пусть через элемент сети сопротивлением R проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega \cdot t)$, где I_m — амплитуда тока, ω — круговая частота. Тогда падение напряжения на этом элементе равно

$$\Delta u = iR = I_m R \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

При этом сопротивление R обладает зависимостью от температуры, которая выражается формулой

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Theta_n) \quad (2)$$

где: R_0 — активное сопротивление при нуле градусов Цельсия;

α — температурный коэффициент сопротивления;

Θ_n — температура проводника;

R — активное сопротивление при температуре Θ_n .

Величины Θ_n и i связаны между собой дифференциальным уравнением нагрева элемента сети, которое в простейшем случае имеет вид

$$i^2 R = C \frac{d\Theta_n}{dt} + A(\Theta_n - \Theta_{окр}) \quad (3)$$

где: C — теплоемкость элемента сети;

A — коэффициент теплоотдачи;

$\Theta_{окр}$ — температура окружающей среды.

Подставив (2) в (3), учтя синусоидальный характер тока и проведя некоторые несложные преобразования, запишем уравнение нагрева в следующем виде:

$$I^2 R_0(1 + \alpha \cdot \Theta_n) - I^2 R_0(1 + \alpha \cdot \Theta_n) \cdot \cos(2\omega \cdot t) = C \frac{d\Theta_n}{dt} + A(\Theta_n - \Theta_{окр}) \quad (4)$$

где I — действующее значение тока.

Уравнение (4) нелинейно. Для его линеаризации исключим температуру из второго слагаемого левой части, считая ее наличие фактором второго порядка. При этом заменим фактическое сопротивление в этом слагаемом на некоторое среднее значение R_{cp} и после преобразований получим следующее линейное уравнение:

$$B_1 - B_2 \cdot \cos(2\omega \cdot t) = C \frac{d\Theta_n}{dt} + A_1 \cdot \Theta_n \quad (5)$$

где

$$A_1 = A - I^2 R_0 \alpha, \quad (6)$$

$$B_1 = A \cdot \Theta_{окр} + I^2 R_0 \quad (7)$$

$$B_2 = I^2 R_{cp} \quad (8)$$

Произведем расчет потерь мощности в токоведущих частях с учетом высших гармоник представленной на рис. 1а системы электроснабжения. Источником высших гармоник будем считать нелинейную нагрузку (НН), представленную классическим 6-пульсным преобразователем с четко определенным спектром генерируемых гармоник тока. В качестве элементов системы электроснабжения примем трансформатор ТМГ 160/10 У1 и кабель АПсшВГ 4х70. Их параметры заданы в таблице 1.

Для схемы замещения на основной частоте, представленной на рис. 1 б, за источник бесконечной мощности условно может быть принята секция шин 10 кВ трансформаторной подстанции. Напряжение шин, к которым подключена нелинейная нагрузка (НН) будет зависеть от падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях трансформатора R_t, X_t и кабельной линии $R_{кл}, X_{кл}$.

В схеме замещения на высших гармониках, представленной на рис. 1 в, нелинейная нагрузка задается источником тока с внутренним сопротивлением $R_{вн}$. Индуктивные сопротивления X_t и $X_{кл}$ в расчете должны быть представлены с учетом частоты высшей гармоники, для которой производятся вычисления.

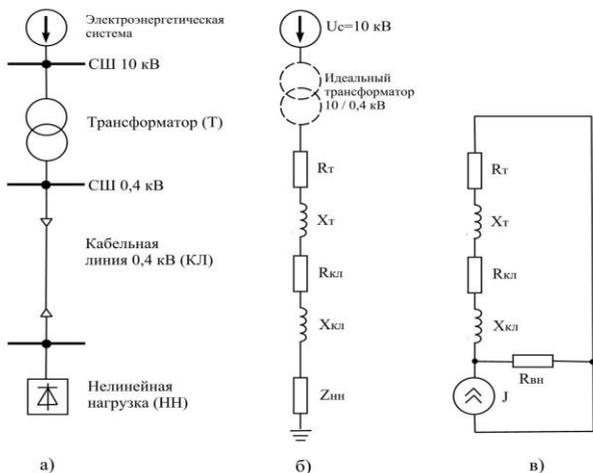


Рисунок 1. а) система электроснабжения, б) схема замещения для основной частоты, в) схема замещения для высших гармоник

Так как температура проводника определяется всем спектром гармоник тока, то для расчета несинусоидальных режимов с учетом температуры метод наложения в чистом виде неприменим. Поэтому для расчета предлагается использование итерационного подхода. Будем задавать на начальном этапе температуру всех токоведущих частей, равную 0°C. Сопротивление нелинейной нагрузки в первом приближении может быть определено по формуле (9):

$$Z_{\text{нн}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} \quad (9)$$

Уравнения узловых напряжений основной гармоники при напряжении балансирующего узла $U_6 = 0$ можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 \dots Y_{1n}U_n = I_1 \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 \dots Y_{2n}U_n = I_2 \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 \dots Y_{3n}U_n = I_3 \\ \dots \\ Y_{m1}U_1 + Y_{m2}U_2 + Y_{m3}U_3 \dots Y_{mn}U_n = I_m \end{cases} \quad (10)$$

где: I_k — задающий ток k -го узла, $k=1,2,3\dots m$;
 U_k — неизвестное узловое напряжение, т. е. напряжение между k -м узлом и балансирующим, совпадающим с базисным по U ;
 Y_{kj} (при $k \neq j$) — взаимная проводимость узлов j и k ;
 Y_{kk} — собственная проводимость узла k .

Таблица 1.

Параметры элементов системы электроснабжения

Трансформатор ТМГ 160/10 У1		Кабель АПсВГ 4х70	
Номинальная мощность, $S_{ном}$	160 кВА	Допустимый длительный ток, $I_{доп}$	180 А
Номинальное напряжение, $U_{вн}$	10 кВ	Удельное реактивное сопротивление, X_0	0,0612 Ом/км
Потери холостого хода, $P_{хх}$	410 Вт	Удельное активное сопротивление, R_0	0,443 Ом/км
Потери короткого замыкания, $P_{кз}$	2600 Вт		
Напряжение короткого замыкания, $U_{кз}$	4,5 %	Длина кабеля, l_k	250 м
Ток холостого хода, $I_{хх}$	0,5 %	Допустимая температура жилы, $t_{ж.д.}$	+85 °С
Допустимая температура верхних слоев масла	+75 °С		

Следует составить систему уравнений узловых потенциалов для каждой гармоники:

$$\begin{cases} Y_{v11}U_{v1} + Y_{v12}U_{v2} + Y_{v13}U_{v3} \dots Y_{v1n}U_{vn} = I_{v1} \\ Y_{v21}U_{v1} + Y_{v22}U_{v2} + Y_{v23}U_{v3} \dots Y_{v2n}U_{vn} = I_{v2} \\ Y_{v31}U_{v1} + Y_{v32}U_{v2} + Y_{v33}U_{v3} \dots Y_{v3n}U_{vn} = I_{v3} \\ \dots \\ Y_{vm1}U_{v1} + Y_{vm2}U_{v2} + Y_{vm3}U_{v3} \dots Y_{vnm}U_{vn} = I_{vm} \end{cases} \quad (11)$$

Получаем v систем уравнений с количеством уравнений m , где v — число гармоник.

Активные сопротивления элементов электрической сети являются нелинейными, вследствие зависимости от температуры, которая выражается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} R_1 = R_{1,0}(1 + \alpha \cdot \Theta_1) \\ R_2 = R_{2,0}(1 + \alpha \cdot \Theta_2) \\ R_3 = R_{3,0}(1 + \alpha \cdot \Theta_3) \\ \dots \\ R_i = R_{i,0}(1 + \alpha \cdot \Theta_i) \end{cases} \quad (12)$$

где: i — количество элементов сети, подверженных нагреву, при протекании по ним электрического тока;

α — температурный коэффициент сопротивления;

Θ_i — температура i -го элемента.

Тепловые процессы в элементах системы электроснабжения описываются уравнениями теплового баланса, которые в общем виде можно представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} W_1(\Theta_1, \Delta P_1) = 0 \\ W_2(\Theta_2, \Delta P_2) = 0 \\ W_3(\Theta_3, \Delta P_3) = 0 \\ \dots \\ W_i(\Theta_i, \Delta P_i) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Алгоритм расчета режима с учетом высших гармоник и температурной зависимости сопротивлений представлен на рисунке 2.

Для моделирования стационарного режима ЭС с учетом зависимости сопротивлений элементов ЭС от нагрева токоведущих частей необходимы выражения, связывающие электрические и тепловые величины. Эта связь описывается уравнениями теплового баланса.

Уравнение теплового баланса согласно [1, с. 152] для кабеля может быть записано в виде

$$\frac{P_{кл}^2 + Q_{кл}^2}{U_{кл}^2} R_{кл} = A_{кл} \Theta_{ж} \quad (14)$$

где: $P_{кл}, Q_{кл}$ — активная и реактивная нагрузка в конце кабельной линии соответственно, Вт ;

$U_{кл}$ — напряжение на в конце кабельной линии, В;

$A_{кл}$ — коэффициент теплоотдачи;

$\Theta_{ж}$ — превышение температуры жилы кабеля над температурой окружающей среды, К.

В допустимом режиме это уравнение при известной допустимой температуре жилы $t_{жд}$ и номинальной температуре окружающей среды (поверхности земли) $t_{окр..н}$ примет вид:

$$\Delta P_{кдоп} = A_{к} (t_{жд} - t_{окр..н}), \quad (15)$$

где: $t_{окр..н}$ — номинальная температура окружающей среды, °С;

$\Delta P_{кдоп}$ — допустимые потери в кабеле, равные:

$$\Delta P_{кдоп} = 3I_{доп}^2 R_{к0} (1 + \alpha_{жд}) \quad (16)$$

где: $I_{доп}$ — допустимый ток кабеля, А;

$R_{к0}$ — активное сопротивление кабеля при 0 °С, Ом.

Уравнение теплового баланса трансформатора в стационарном режиме согласно [1, с. 152]:

$$\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_m = A_m \Theta_m^{1,25}, \quad (17)$$

где: P, Q — активная и реактивная мощности нагрузки трансформатора соответственно, Вт, вар;

U — напряжение на шинах потребителя, подключенного к трансформатору, В;

R_m — активное сопротивление трансформатора, Ом;

A_m — коэффициент, определяющий интенсивность теплоотдачи от обмоток трансформатора в воздух.

Коэффициент A_m можно определить из уравнения теплового баланса в допустимом режиме, которое имеет вид:

$$\Delta P_{тдоп} = A_m \Theta_{тдоп}^{1,25} = A_m (t_{тдоп} - t_{окр..н})^{1,25}, \quad (18)$$

где: $\Theta_{тдоп}$ — допустимый перепад температуры между обмотками и окружающей средой, К;

$t_{окр..н}$ — номинальная температура окружающей среды, °С;

$t_{\text{мдоп}}$ — средняя допустимая температура обмоток трансформатора, °С;

$\Delta P_{\text{мдоп}}$ — допустимые потери в обмотках трансформатора, определяемые по выражению:

$$\Delta P_{\text{мдоп}} = \left(\frac{1,05 S_{\text{н}}}{U_{\text{в.н.ом}}} \right)^2 R_{\text{мо}} (1 + \alpha t_{\text{мдоп}}) \quad (19)$$

где: $S_{\text{н}}$ — номинальная мощность трансформатора, В А;

$U_{\text{в.н.ом}}$ — номинальное напряжение высокой стороны трансформатора, В;

$R_{\text{мо}}$ — активное сопротивление обмоток трансформатора при 0 °С, Ом;

α — температурный коэффициент сопротивления, °С⁻¹;

Тогда коэффициент $A_{\text{м}}$ можно определить по формуле:

$$A_{\text{м}} = \frac{\Delta P_{\text{мдоп}}}{(t_{\text{мд}} - t_{\text{окр.л}})^{1,25}} \quad (20)$$

Результаты расчётов, позволяющие оценить величину потерь активной мощности в кабеле и трансформаторе, приведены в таблице 2.

Результаты расчётов, выявляющие погрешность оценки температуры элементов без учета и с учетом высших гармоник, приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Потери активной мощности на элементах системы

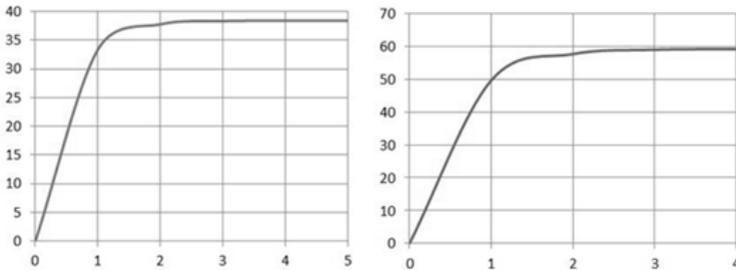
Потери в кабеле, кВт				Потери в трансформаторе, кВт			
С учетом температуры		Без учета температуры		С учетом температуры		Без учета температуры	
С учетом гармоник	Без учета гармоник	С учетом гармоник	Без учета гармоник	С учетом гармоник	Без учета гармоник	С учетом гармоник	Без учета гармоник
11,86	10,38	10,77	9,03	2,13	1,78	1,71	19,80

Таблица 3.

Оценка температуры на элементах системы без учета и с учетом высших гармоник

№ итерации	Кабель			Трансформатор		
	Температура, С°		Погрешность, %	Температура, С°		Погрешность, %
	Без учета гармоник	С учетом гармоник		Без учета гармоник	С учетом гармоник	
1	30,06	33,37	9,92	47,27	49,67	4,83
2	33,59	37,77	11,05	54,52	57,71	5,53
3	34,00	38,34	11,31	55,65	59,02	5,72
4	34,05	38,42	11,37	55,82	59,23	5,76
5	34,06	38,43	11,38	-	-	-

На основе результатов были построены графики зависимостей изменения температур жилы и трансформатора от количества проведенных итераций с учетом высших гармоник. Графики изображены на рис. 2.



а) температура жилы. б) температура трансформатора.

Рисунок 2. Графики изменения температуры элементов, где $\theta_{ж}$ и $\theta_{т}$ — температуры жилы и трансформатора соответственно, n — количество итераций

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что не учет нагрева при выборе мероприятий по снижению потерь может привести к более серьезным ошибкам, чем просто при расчете потерь. Погрешность в определении потерь активной мощности на токоведущих элементах системы без учета температуры и высших гармоник составляет 9,23 % для кабеля и 19,8 %

для трансформатора. Погрешность в оценке температуры на элементах системы без учета высших гармоник достигает 11,38 % и 5,76 % для кабеля и трансформатора соответственно.

2. Разработаны методы учета нагрева токоведущих частей при расчете потерь при несинусоидальных режимах СЭС. Для решения этой задачи предложено использование итерационного подхода. Графики изменения температур токоведущих элементов (см. рис. 2) являются сходящимися, т. е. имеют предельную границу нагрева, что говорит о корректно составленной схеме замещения и верно заданных исходных данных.

3. Для упрощения расчетов целесообразно использовать критерии учета температурной зависимости сопротивления.

Приложение 1.

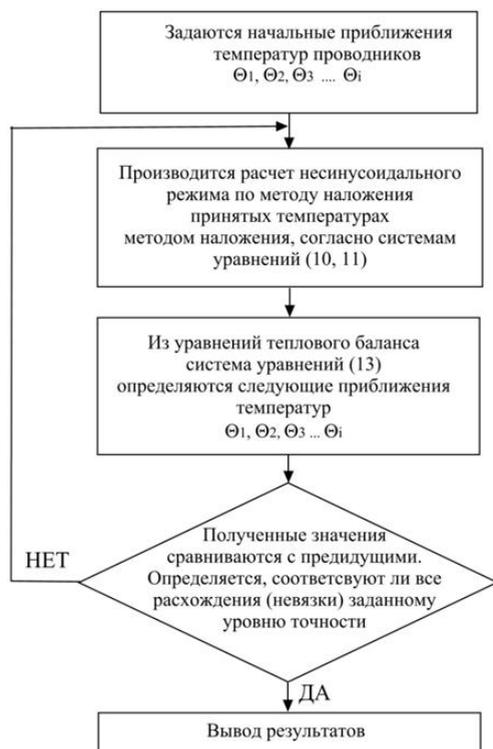


Рисунок 3. Алгоритм расчета

Список литературы:

1. Осипов Д.С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Д.С. Осипов Омский государственный технический университет, Омск, 2005. — 152 с.
2. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / Шидловский А.К., А.Ф. Жаркин [монография] //Киев. Наукова думка. 2005. — 210 с.

СЕКЦИЯ 4.

АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

МЕТОД КОНФИГУРАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ В ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ АППАРАТНЫХ УРОВНЕЙ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Савкин Леонид Васильевич

*аспирант ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»,
начальник бюро Филиала ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»,
РФ, г. Калуга
E-mail: android4.1@mail.ru*

THE METHOD OF CONFIGURATION FUNCTIONS IN THE DESCRIPTION OF PROCESSES FORMATION THE HARDWARE LEVELS OF THE RECONFIGURABLE SYSTEM MONITORING AND DIAGNOSTICS OF THE SPACECRAFT

Leonid Savkin

*graduate student, chief of bureau,
The Branch of Federal Enterprise "Lavochkin Association",
Russia, Kaluga*

АННОТАЦИЯ

Предложен способ математической формализации процессов формирования диагностической модели в реконфигурируемой системе контроля и диагностики космического аппарата. Показан процесс формирования аппаратных уровней диагностической модели. Получена система уравнений, описывающая диагностическую модель с точки зрения топологии связей между ее элементами и функций данных элементов.

ABSTRACT

The method of mathematical formalization of the processes formation diagnostic model in the reconfigurable system monitoring and diagnostics of the spacecraft is offered. Process of formation of the hardware levels of diagnostic model is shown. The system of equations describing diagnostic model on the basis topology of communications between its elements and on the basis functions of these elements is received.

Ключевые слова: конфигурационная функция; диагностическая модель; многоуровневая реконфигурация; топология; логико-арифметическая связь.

Keywords: configuration function; diagnostic model; multi-level reconfiguration; topology; logic arithmetical communication.

В предыдущих работах [8—10] рассматривались принципы организации бортового диагностического обеспечения космических аппаратов (КА) на базе реконфигурируемых вычислительных систем (РВС). В качестве основного аргумента, выдвигаемого на обоснование преимуществ реконфигурируемой системы контроля и диагностики (СКД), построенной на базе РВС, перед СКД, реализованными программными средствами, была представлена возможность глубокого перестроения диагностической модели в процессе идентификации неисправностей и отказов сложного типа.

Построение диагностической модели в реконфигурируемом вычислительном поле (РВП) предлагалось осуществлять по принципу сложной иерархической системы, обладающей возможностью реконфигурации функциональных элементов, которые бы участвовали в формировании всех ее аппаратных уровней, что, в свою очередь, наделило бы систему возможностью многоуровневой реконфигурации. Данная возможность обеспечила бы СКД КА возможностью кардинального перестроения диагностической модели в процессе выбора наиболее эффективных алгоритмов диагностики и контроля, адаптируя тем самым всю аппаратную структуру СКД под информационную структуру задач бортового диагностирования. Данное свойство является особенно актуальным ввиду как непрерывного роста сложности аппаратно-программного построения бортовых систем современных КА, так и ввиду соответствующего усложнения алгоритмов идентификации состояний данных систем с заданной степенью достоверности.

В [10] было предложено строить диагностическую модель по принципу вложенных матричных структур не зависимо от того,

какой бы степенью сложности (в структурном отношении) она обладала на самом высоком аппаратном уровне.

Сам принцип формирования аппаратных уровней диагностической модели представлен на рисунке 1, где показано, что каждый элемент q -го аппаратного уровня образуется путем строго заданной топологии параллельно-последовательных логико-арифметических связей между функциональными элементами $(q-1)$ -го аппаратного уровня, где $q = \overline{1, m}$ порядковый номер аппаратного уровня диагностической модели, образованной в РВП СКД КА.

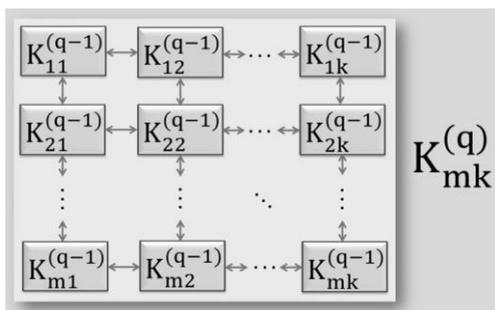


Рисунок 1. Принцип формирования аппаратных уровней диагностической модели в реконфигурируемой СКД КА

Из данного рисунка следует, что каждый из аппаратных уровней диагностической модели формируется независимо, начиная от первого аппаратного уровня $q=1$, и заканчивая последним аппаратным уровнем $q=m$.

На рисунке 2 показан процесс формирования уровней аппаратной конфигурации диагностической модели в РВП в зависимости от конфигурационной функции $K^{(q)}$, которая должна учитывать топологию логико-арифметических связей диагностической модели на каждом из образующих ее аппаратных уровней.

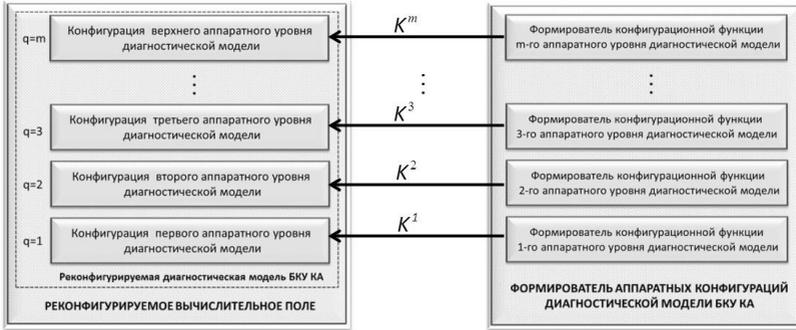


Рисунок 2. Формирование уровней аппаратной конфигурации диагностической модели в зависимости от конфигурационной функции $K^{(q)}$

Однако, не смотря на то, что данный рисунок иллюстрирует процесс формирования конфигурационных функций в независимых формирователях, это вовсе не означает, что можно построить диагностическую модель с многоуровневой реконфигурацией, не учитывая при этом конфигурационные функции ее отдельных аппаратных уровней. Интуитивно понятно, что такое в принципе не может быть, поскольку каждые последующие аппаратные уровни диагностической модели образуются за счет комбинаций и топологических связей между функциональными элементами предыдущих аппаратных уровней, что можно записать в виде рекуррентного соотношения

$$\mathbf{K}^{(q)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(q-1)})), \quad (1)$$

где: $\mathbf{K}^{(q)}$ — конфигурационная функция q -го аппаратного уровня диагностической модели;

$\mathbf{L}^{(1)}$ — матрица логико-арифметических функций, реализуемых посредством коммутируемых логических блоков (КЛБ), не учитывающая топологию их логико-арифметических связей внутри РВП;

$G(\mathbf{K}^{(q-1)})$ — орграф логико-арифметических связей между функциональными элементами $(q-1)$ -го аппаратного уровня диагностической модели, которые образуют элемент q -го аппаратного уровня.

Для более наглядного представления об аргументах $\mathbf{L}^{(1)}$ и $G(\mathbf{K}^{(q-1)})$ функции F рассмотрим рисунок 3, на котором представлен участок РВП, образованный матричным набором КЛБ.

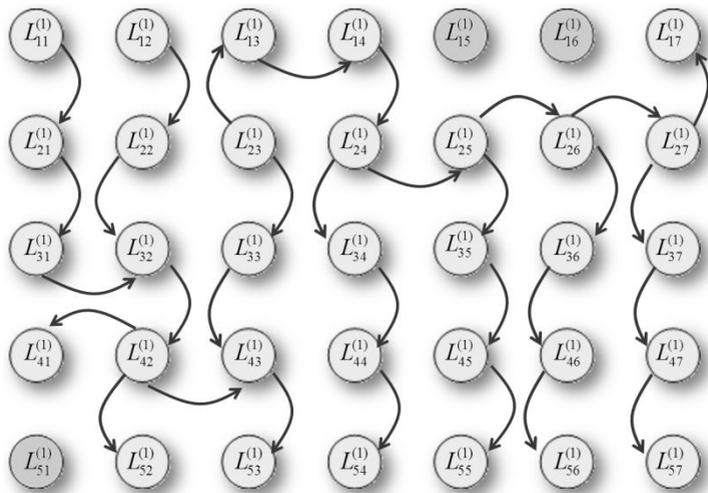


Рисунок 3. Параллельно-последовательная топология логико-арифметических связей внутри элемента второго аппаратного уровня диагностической модели

Здесь посредством КЛБ реализуется определенная базовая логико-арифметическая операция $L_{ij}^{(1)}$, поэтому матрица $\mathbf{L}^{(1)}$ представляет собой набор логико-арифметических функций $L_{ij}^{(1)}$, реализуемых посредством КЛБ, которые расположены в строке матрицы РВП $i = \overline{1, m}$ и в столбце матрицы РВП $j = \overline{1, k}$. Представить математически данную матрицу можно в следующем виде:

$$\mathbf{L}^{(1)} = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11}L_{11}^{(1)} & a_{12}L_{12}^{(1)} & \cdots & a_{1k}L_{1k}^{(1)} \\ a_{21}L_{21}^{(1)} & a_{22}L_{22}^{(1)} & \cdots & a_{2k}L_{2k}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}L_{m1}^{(1)} & a_{m2}L_{m2}^{(1)} & \cdots & a_{mk}L_{mk}^{(1)} \end{array} \right\|,$$

где коэффициент a_{ij} есть функция включения (задействия) КЛБ в образовании элемента второго аппаратного уровня, т. е.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ вкл.}, \\ 0, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ выкл.} \end{cases} \quad (2)$$

Матрицу логико-арифметических функций для данного рисунка можно записать в виде

$$\mathbf{L}^{(1)} = \begin{pmatrix} a_{11}L_{11}^{(1)} & a_{12}L_{12}^{(1)} & a_{13}L_{13}^{(1)} & a_{14}L_{14}^{(1)} & a_{15}L_{15}^{(1)} & a_{16}L_{16}^{(1)} & a_{17}L_{17}^{(1)} \\ a_{21}L_{21}^{(1)} & a_{22}L_{22}^{(1)} & a_{23}L_{23}^{(1)} & a_{24}L_{24}^{(1)} & a_{25}L_{25}^{(1)} & a_{26}L_{26}^{(1)} & a_{27}L_{27}^{(1)} \\ a_{31}L_{31}^{(1)} & a_{32}L_{32}^{(1)} & a_{33}L_{33}^{(1)} & a_{34}L_{34}^{(1)} & a_{35}L_{35}^{(1)} & a_{36}L_{36}^{(1)} & a_{38}L_{38}^{(1)} \\ a_{41}L_{41}^{(1)} & a_{42}L_{42}^{(1)} & a_{43}L_{43}^{(1)} & a_{44}L_{44}^{(1)} & a_{45}L_{45}^{(1)} & a_{46}L_{46}^{(1)} & a_{47}L_{47}^{(1)} \\ a_{51}L_{51}^{(1)} & a_{52}L_{52}^{(1)} & a_{53}L_{53}^{(1)} & a_{54}L_{54}^{(1)} & a_{55}L_{55}^{(1)} & a_{56}L_{56}^{(1)} & a_{57}L_{57}^{(1)} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а, учитывая, что элементы (КЛБ) $L_{15}^{(1)}$, $L_{16}^{(1)}$ и $L_{51}^{(1)}$ не задействованы, и, принимая во внимание (2), получим

$$\mathbf{L}^{(1)} = \begin{pmatrix} a_{11}L_{11}^{(1)} & a_{12}L_{12}^{(1)} & a_{13}L_{13}^{(1)} & a_{14}L_{14}^{(1)} & 0 & 0 & a_{17}L_{17}^{(1)} \\ a_{21}L_{21}^{(1)} & a_{22}L_{22}^{(1)} & a_{23}L_{23}^{(1)} & a_{24}L_{24}^{(1)} & a_{25}L_{25}^{(1)} & a_{26}L_{26}^{(1)} & a_{27}L_{27}^{(1)} \\ a_{31}L_{31}^{(1)} & a_{32}L_{32}^{(1)} & a_{33}L_{33}^{(1)} & a_{34}L_{34}^{(1)} & a_{35}L_{35}^{(1)} & a_{36}L_{36}^{(1)} & a_{38}L_{38}^{(1)} \\ a_{41}L_{41}^{(1)} & a_{42}L_{42}^{(1)} & a_{43}L_{43}^{(1)} & a_{44}L_{44}^{(1)} & a_{45}L_{45}^{(1)} & a_{46}L_{46}^{(1)} & a_{47}L_{47}^{(1)} \\ 0 & a_{52}L_{52}^{(1)} & a_{53}L_{53}^{(1)} & a_{54}L_{54}^{(1)} & a_{55}L_{55}^{(1)} & a_{56}L_{56}^{(1)} & a_{57}L_{57}^{(1)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для матриц (3) и (4) необходимо отметить следующее. Ввиду того, что логико-арифметическая функция КЛБ может быть отключена как функционально, так и топологически (т. е. находиться во включенном состоянии, но быть незадействованной в вычислительном процессе), то коэффициент a_{ij} должен присутствовать как в матрице базового аппаратного уровня КЛБ в РВП, так и в матрицах конфигурационных функций. Это связано с тем, что в процессе формирования диагностической модели или ее реконфигурации, могут отключаться функциональные элементы не только первого аппаратного уровня, но и элементы более высоких аппаратных уровней $q \geq 2$.

Поэтому для различных ситуаций матрица $\mathbf{L}^{(1)}$ может быть записана либо в виде выражения (3), либо в виде выражения (4).

Из рисунка 3 также видно, что функциональное назначение элемента второго аппаратного уровня зависит от параллельно-последовательной топологии логико-арифметических связей. Именно поэтому орграф $G(\mathbf{K}^{(q-1)})$ необходимо включать как аргумент конфигурационной функции $\mathbf{K}^{(q)}$, начиная со второго аппаратного уровня, которому будет соответствовать конфигурационная функция

$$\mathbf{K}^{(2)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(1)})),$$

$G(\mathbf{K}^{(1)})$ — орграф логико-арифметических связей между функциональными элементами первого аппаратного уровня, в качестве которых выступают КЛБ, причем в данном случае

$$\mathbf{K}^{(1)} = \mathbf{L}^{(1)}.$$

На рисунке 4 показано, что процесс образования элемента второго аппаратного уровня есть не что иное, как обычное выделение фрагмента РВП с минимально необходимым набором КЛБ.

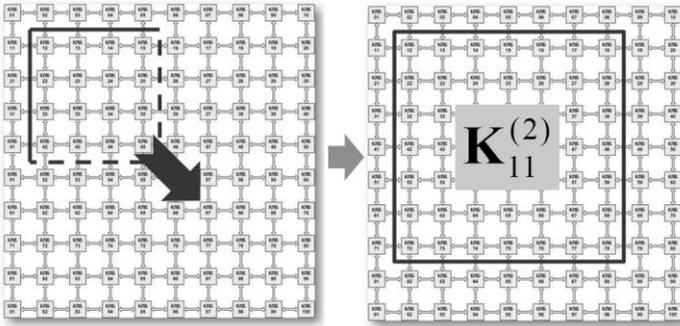


Рисунок 4. Выделение из РВП функционального элемента второго аппаратного уровня диагностической модели

При этом, в некоторых случаях элемент второго аппаратного уровня $\mathbf{K}_{11}^{(2)}$ может быть образован не только в виде квадратичного набора $m \times n$, но также и в виде строки или столбца.

Продолжая использовать принцип вложенных матричных наборов в образовании функциональных элементов более высоких аппаратных уровней диагностической модели, рассмотрим рисунок 5.

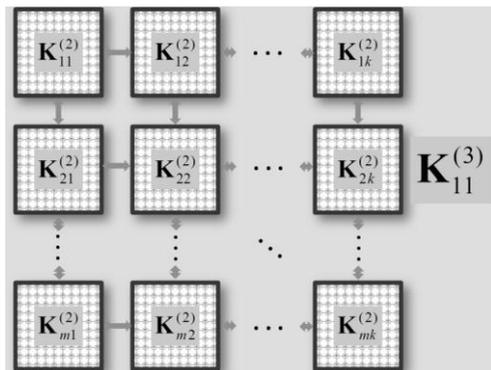


Рисунок 5. Формирование элемента третьего аппаратного уровня диагностической модели

Здесь показано, что элемент третьего аппаратного уровня диагностической модели, образуется на базе матрицы элементов второго аппаратного уровня, что исходя из (1) можно представить соответствующей конфигурационной функцией третьего аппаратного уровня вида

$$\mathbf{K}^{(3)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(2)})),$$

где $G(\mathbf{K}^{(2)})$ — орграф логико-арифметических связей между функциональными элементами второго аппаратного уровня, образующими элемент третьего аппаратного уровня.

Из рисунка 5 становится понятно, что конфигурационная функция аппаратного уровня $(q-1)$ также представляет собой матрицу вида

$$\mathbf{K}^{(q-1)} = \begin{pmatrix} a_{11}K_{11}^{(q-1)} & a_{12}K_{12}^{(q-1)} & \dots & a_{1k}K_{1k}^{(q-1)} \\ a_{21}K_{21}^{(q-1)} & a_{22}K_{22}^{(q-1)} & \dots & a_{2k}K_{2k}^{(q-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}K_{m1}^{(q-1)} & a_{m2}K_{m2}^{(q-1)} & \dots & a_{mk}K_{mk}^{(q-1)} \end{pmatrix},$$

где элемент $K_{ij}^{(q-1)}$ является уже логико-арифметической функцией элемента $(q-1)$ -го аппаратного уровня диагностической модели; коэффициент a_{ij} — функция включения функционального элемента $(q-1)$ -го аппаратного уровня.

Аналогичным образом происходит формирование элементов более высоких аппаратных уровней (рисунок 6).

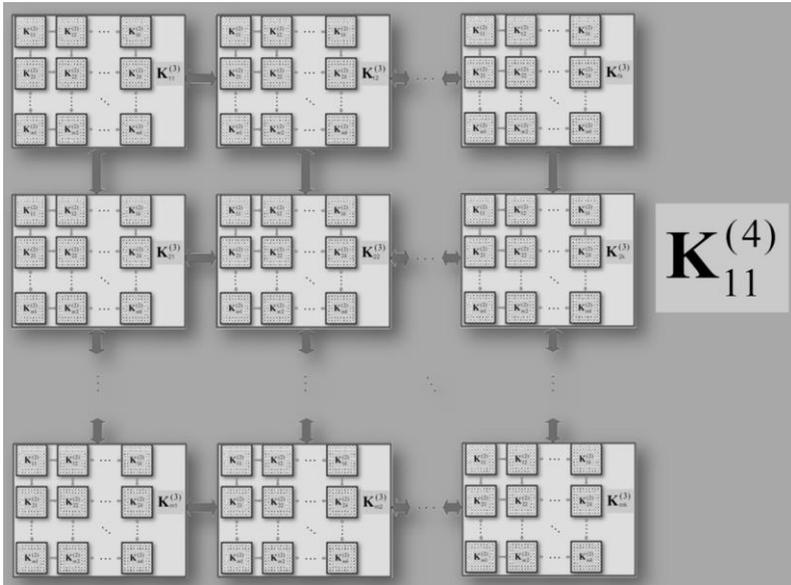


Рисунок 6. Формирование элемента четвертого аппаратного уровня диагностической модели

Исходя из всего вышесказанного, необходимо отметить, что поскольку конфигурационные функции описывают все особенности структуры диагностической модели, причем как вычислительную структуру, так и топологию логико-арифметических связей, то для полного описания диагностической модели, построенной по предложенному принципу, достаточно использовать систему уравнений вида

$$\mathbf{K}^{DM} = \begin{cases} \mathbf{K}^{(1)} = F(\mathbf{L}^{(1)}), \\ \mathbf{K}^{(2)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(1)})), \\ \vdots \\ \mathbf{K}^{(q-1)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(q-2)})), \\ \mathbf{K}^{(q)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(q-1)})), \end{cases} \quad (5)$$

где \mathbf{K}^{DM} — система конфигурационных функций, образующих диагностическую модель с возможностью многоуровневой реконфигурации.

Таким образом, выражение (5) полностью описывает диагностическую модель, формируемую в реконфигурируемой СКД КА, включая при этом как базовый уровень РВП, так и структурную организацию диагностической модели на всех этапах ее формирования.

Выводы:

1. Предложен способ математической формализации процесса формирования диагностической модели по принципу вложенных матричных структур, с возможностью многоуровневой реконфигурации функциональных элементов за счет перераспределения топологии логико-арифметических связей на всех аппаратных уровнях диагностической модели.

2. Детально рассмотрены принципы формирования диагностической модели в РВП, учитывающие следующие основные характеристики диагностической модели:

- базовые логико-арифметические функции, реализуемые за счет КЛБ;
- логико-арифметические функции элементов аппаратных уровней $q \geq 2$;
- структуру и способы организации аппаратных уровней диагностической модели;
- топологию логико-арифметических связей на каждом из аппаратных уровней диагностической модели;
- возможности реконфигурации диагностической модели на каждом из ее аппаратных уровней.

3. Получена система уравнений, описывающая диагностическую модель в РВП реконфигурируемой СКД КА на всех стадиях формирования ее аппаратных уровней. Данная система уравнений учитывает особенности диагностической модели как на базовом логико-арифметическом уровне КЛБ, так и на топологическом уровне, включающем в себя описание всех типов логико-арифметических

связей между функциональными элементами диагностической модели с образованием новых на каждом из формируемых аппаратных уровней.

Список литературы:

1. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009. — 352 с.
2. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами. /Под ред. проф. А.С. Сырова М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. — 304 с.
3. Глушенко П.В. Техническая диагностика: Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов. М.: Вузовская книга, 2004. — 248 с.
4. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды. М.: Радио и связь, 1981. — 208 с.
5. Евреинов Э.В., Хорошевский В.Г. Однородные вычислительные системы.-Новосибирск: Наука, 1978.
6. Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. М.: Радио и связь, 1984, — 240 с.
7. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры /Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под общ. Ред. И.А. Каляева. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. — 344 с.
8. Савкин Л.В. О решении задач бортового диагностирования космических аппаратов с помощью реконфигурируемых вычислительных систем. Технические науки — от теории к практике / Сб. ст. по материалам XXXIX Междунар. науч.-практ. конф. № 10 (35). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. — с. 79—87.
9. Савкин Л.В., Ключко О.С., Макаров А.С. Реализация алгоритмов распознавания сложных видов неисправностей и отказов бортовой аппаратуры космических аппаратов на основе встроенных реконфигурируемых диагностических систем // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. 2014. № 11 (12) . [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/1756> (дата обращения: 23.12.2014).
10. Савкин Л.В., Новичков В.М., Ширшаков А.Е. Многоуровневая реконфигурация моделей диагностических систем как средство повышения гибкости алгоритмов диагностики и контроля бортовых систем космических аппаратов. Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 25—27 ноября 2014 г. Т. 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — С. 296—299.

СЕКЦИЯ 5.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРИРАЩЕНИЙ В ЗАДАЧАХ РАСЧЁТА МЕМБРАННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Амоян Миша Фрикович

*студент 3 курса, Саратовский Государственный Технический
Университет им. Гагарина Ю.А.,*

РФ, г. Саратов

E-mail: ezid-007@yandex.ru

Алиев Ариз Алихан оглы

*студент 2 курса, Саратовский Государственный Технический
Университет им. Гагарина Ю.А.,*

РФ, г. Саратов

E-mail: 164apple164@gmail.com

Ким Алексей Юрьевич

*д-р техн. наук, профессор кафедры ТСК, Саратовский
Государственный Технический Университет им. Гагарина Ю.А.,*

РФ, г. Саратов

E-mail: sberbanksp@yandex.ru

CALCULATION OF COMBINED PRESSURIZED SYSTEMS USING ITERATIVE INCREMENTAL APPROACH

Amoyan Misha

*3-d year student,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,
Russia, Saratov*

Aliev Ariz

*2-nd year student,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,
Russia, Saratov*

Kim Alexey

*doctor of Technical Sciences,
professor of the Department «Theory of structures and constructions»,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,
Russia, Saratov*

АННОТАЦИЯ

Статья знакомит специалистов с разрабатываемой авторами уточненной методикой расчета комбинированных мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов и упругой работы воздуха в пневматических полостях.

Современное воздухоопорное пневматическое сооружение содержит воздуходвигательный вентилятор, который может быть совмещён с теплогенератором, шлюзы и гибкую оболочку, закреплённую по контуру и образующую полость с избыточным давлением воздуха.

ABSTRACT

This research paper describes an updated calculation procedure being developed by the author for combined membrane inflated / pressurized systems considering nonlinear factors and elastic action of air in pressurized hollow spaces.

Modern air-inflated pneumatic systems consist of the following components: air pressurizing fan / blower which can be combined with heat generator, air locks and flexible properly secured enclosure which forms hollow space with positive pressure.

Ключевые слова: мембранно-пневматические сооружения; метод приращения параметров; шаговый метод; метод конечных элементов.

Keywords: membrane pneumatic constructions; method increments parameters; step method; the finite element method.

Авторы статьи студенты 2 и 3 курса СГТУ имени Гагарина Ю.А. под руководством проф. Кима А.Ю. исследовали ряд воздухоопорных и линзообразных сооружений, обладающих высокими технико-экономическими показателями. По данным известного российского ученого профессора Московского архитектурного института В.В. Ермолова пневматические сооружения очень эффективны для строителей, МЧС и в виде спортивных сооружений [1].

В статье описывается итерационный метод последовательных приращений параметров с поэтапным применением метода конечных элементов, с помощью которого автор рассматривает линзообразные пневматические и воздухоопорные сооружения.

Прежде чем излагать итерационный метод приращений параметров, напомним историю создания известного шагового метода приращений параметров.

Численный метод приращений параметров, применяемый для решения нелинейных операторных уравнений, получил развитие во второй половине двадцатого века [2].

Начиная с семидесятых годов данный метод, широко применяется и совершенствуется учёными многих стран и постепенно получает устойчивое название «метод приращений параметров» [3].

В известном методе приращений параметров варьируются различные параметры: параметры, характеризующие нагрузочные воздействия, параметры, характеризующие жёсткость системы и, наконец, параметр времени. Поэтапная линеаризация системы нелинейных уравнений производится по выбираемым параметрам x . Затем варьируемым параметрам последовательно придаются малые приращения Δx . Исходное напряженно-деформированное состояние системы, соответствующее некоторым значениям x_i варьируемых параметров x , считается известным. Все последовательные этапы расчета состоят в определении изменения напряженно-деформированного состояния при задаваемых изменениях варьируемых параметров. Для того чтобы на каждом этапе можно было в рамках требуемой точности пренебречь нелинейными членами (с применением на шаге численной процедуры Эйлера), приращения Δx параметров назначаются достаточно малыми.

На конечной стадии монтажа система определена, усилия в её элементах соответствуют равновесному состоянию, система обладает достаточной несущей способностью. На стадии эксплуатации к системе могут быть приложены пневматическая нагрузка, силовая нагрузка, температурное воздействие и кинематическое воздействие в любых сочетаниях.

На каждом шаге приращения параметров с помощью матрицы связности узлов формируется исходная система поэтапно линеаризованных алгебраических уравнений:

$$[r_{ab}] \eta = (R_a), \quad (1)$$

где: r_{ab} — глобальная матрица жесткости системы;

η — матрица-столбец искомых перемещений;

(R_a) — матрица-столбец свободных членов. Порядок матрицы $[r_{ab}]$ равен $N = 3K - d$, где d — количество заданных опорных связей закрепленных узлов системы.

Вычислив коэффициенты системы уравнений (1) при $a = 1, K$, в соответствии с номерами узлов системы формируем разрешающую систему уравнений метода конечных элементов

$$[r_{ik}] \bar{x}_k = (R_i), \quad i = \overline{1, K}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

в соответствии с глобальной нумерацией наложенных на систему связей.

Решая систему уравнений (2), находим искомые перемещения x_k и распределяем их по узлам системы, т.е. определяем узловые перемещения u_{na} , v_{na} и w_{na} , полученные системой на шаге n по направлению осей x , y и z .

Далее определяем приращение продольного усилия ΔN_{ab} в каждом стержне ab на шаге n . Значения координат узлов системы x_a , y_a , z_a в конце n -го шага варьирования параметров определяются по формулам

$$x_{n+1,a} = x_{na} + u_{na}, \quad y_{n+1,a} = y_{na} + v_{na}, \quad z_{n+1,a} = z_{na} + w_{na}. \quad (3)$$

При расчете мембранно-пневматических систем проф. Ким А.Ю. предложено учитывать упругие свойства воздуха, закаченного в герметически замкнутую полость сооружения, т.е. учитывать влияние на давление p_n упругих перемещений поясов линзообразного

покрытия. При этом приращение объема пневмолинзы ΔV определяется в зависимости от давления P и температуры T воздуха в замкнутой полости пневмолинзы.

Из универсального уравнения состояния газа

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{PV}{T}, \quad (4)$$

объединяющего известные законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака, в котором параметры P_1 , V_1 , T_1 характеризуют систему на конечной стадии монтажа, с учетом зависимостей

$$P = P_1 + \Delta P, \quad V = V_1 + \Delta V, \quad T = T_1 + \Delta T$$

находим, что

$$\Delta P = \frac{P}{T} \Delta T - \frac{P_1}{V} \Delta V. \quad (5)$$

Вычисляем приращение объема ΔV замкнутой полости (помещения, пневмолинзы или нескольких пневмолинз, если они являются сообщающимися сосудами) в зависимости от вертикальных прогибов поясов покрытия на произвольном шаге n нагружения системы.

Полагая

$$\begin{aligned} \Delta P &= p_n, \quad \Delta V = \Delta V_n, \quad \Delta T = \Delta T_n, \\ P &= P^0, \quad V = V^0, \quad T = T^0, \end{aligned} \quad (6)$$

где P^0 , V^0 , T^0 характеризуют невозмущенное состояние системы на текущем шаге n , т. е.

$$\begin{aligned} P^0 &= P_1 + \sum_{l=1}^{n-1} p_r + 0,5 p_n^{(c-1)}, & V^0 &= V_1 + \sum_{r=1}^{n-1} V_r + 0,5 \Delta V_n^{(c-1)}, \\ T^0 &= T_1 + \sum_{r=1}^{n-1} T_r = 0,5 \Delta T_n^{(c-1)}, \end{aligned} \quad (7)$$

выражаем приращение давления в замкнутой полости на шаге n через приращения на шаге n температуры ΔT_n и объёма ΔV_n замкнутой полости

$$\Delta P_n^{(c)} = P_n^{(c)} = \frac{P^0}{T^0} \Delta T_n - \frac{P_1}{V^0} \Delta V_n \quad (8)$$

Задача, решаемая авторами статьи, состоит в численном исследовании итерационным методом приращений параметров комбинированных пневматических сооружений, т.е. пневматических сооружений, усиленных большепролетными стержневыми или предварительно напряженными вантовыми системами.

Цель исследований состоит в создании новых конструктивных форм мембранно-пневматических сооружений, отличающихся экономичностью и простотой возведения.

Список литературы:

1. Ермолов В.В. Воздухоопорные здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1980. — 304 с.
2. Ким А.Ю. Численное исследование нелинейных мембранно-пневматических систем. СГАУ, Саратов, 2001. — 263 с. Монография депонирована в ВИНТИ РАН 28.04.01 № 1122 — В2001.
3. К решению задач в нелинейных операторах / Давиденко Д.Ф. М.: Высшая школа. 1953 — 412 с.

ОБЗОР МЕТОДОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Максимов Сергей Павлович

*магистрант, канд. техн. наук,
доцент Южно-Уральский государственный университет,
РФ, г. Челябинск
E-mail: maximovsp@susu.ac.ru*

Алексеев Иван Андреевич

*студент, филиал
Южно-уральского государственного университета в г. Златоусте,
РФ, г. Златоуст
E-mail: johnalexisthenerd@yandex.ru*

OVERVIEW OF BIOLOGICAL METHODS OF SEWAGE REFINING

Sergey Maksimov

*postgraduate, PhD in Technical Sciences,
associate Professor South Ural State University,
Russia, Chelyabinsk*

Ivan Alekseev

*student, South Ural State University, Zlatoust branch,
Russia, Zlatoust*

АННОТАЦИЯ

Обоснована актуальность метода биологической очистки сточных бытовых вод. Приведена классификация способов и раскрыт механизм эффективной очистки за счет поддержания оптимального размера бактериальных флоккул.

ABSTRACT

The relevance of issue of sewage refining was justified. The classification of methods biological refining was provided. The mechanism of effective sewage refining for maintenance optimal size of bacterial floccules was discovered.

Ключевые слова: бытовые стоки; биологическая очистка; классификация; схема; флокула; активный ил.

Keywords: sewage; sewage refining; classification; diagram; flocules; active sludge.

Одной из острейших экологических проблем человечества является очистка сточных вод. Сточные воды классифицируют на следующие группы. Производственные стоки — воды, которые используют в технологических процессах при работе технологических машин и агрегатов, изготовления узлов и деталей машин, получении материалов и т. п. [5]. Бытовые воды — стоки от санитарных узлов производственных и жилых помещений. Третью группу составляют атмосферные стоки, которые содержат дождевые воды и талый снег. Наибольшие проблемы составляют бытовые и производственные стоки. В последние годы предприятия активно переходят на использование воды по закрытой технологии, которая обеспечивает ее рециркуляцию и минимизирует утечку и забор недостающей из окружающей среды. Подобную технологию для бытовых вод не используют, поскольку степень очистки не соответствует нормам качества подачи воды для бытовых помещений. В связи с этим бытовые стоки после некоторой очистки сбрасывают в водный бассейн, находящийся ниже по уровню от водозаборного.

По статистическим данным ежедневно в РФ сбрасывается порядка 1,5 млн. м³ жидких бытовых сточных вод [5]. Анализ состава сточных вод показывает, что 85 % его состава содержит органические отходы человеческой деятельности. Очистку сточных бытовых отходов осуществляют последовательно (рисунок 1) по следующей распространенной цепочке.

Для более качественной очистки на последних стадиях иногда вводят водохранилища, вода в которых фильтруется твердыми (медленными) фильтрами. Однако процесс фильтрации занимает значительный временной промежуток, фильтры имеют незначительный ресурс и требуют периодической, высокочрезвычайно затратной очистки или замены [3]. Качество воды в таких сооружениях, хоть и находится на достаточном уровне, но сам процесс фильтрации не получил широкого распространения при больших объемах очистки. Подобно приведенной технологии не нашли широкого применения и фильтры тонкой очистки. Незначительный срок их эксплуатации, и как следствие высокие капитальные и эксплуатационные затраты, свели на нет использование последних на очистных сооружениях городских сточных вод.

Для уменьшения энергозатрат и повышения эффективности очистки бытовых стоков используют методы биологической очистки [1]. Эти методы основаны на использовании бактерий, которые в своей жизнедеятельности поедают мельчайшие остатки взвешенных и растворенных в воде органических соединений [1].

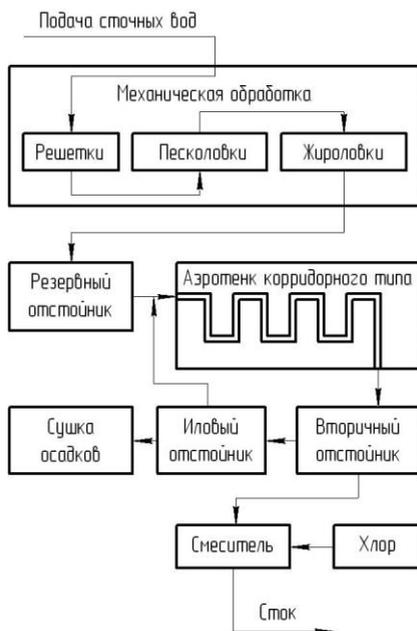


Рисунок 1. Схема очистки сточных бытовых вод

Биологическая очистка перед другими методами имеет ряд значительных преимуществ. Микроорганизмы осуществляют полное разложение бытовых стоков до нейтральных продуктов (газ и вода), обеспечивая при этом круговорот веществ в природе. Таким образом, биологическая очистка в отличие от других способов не извлекает и не переводит загрязнения в другие формы, что обеспечивает практически безотходность производства. В то же время биологические методы менее затратные, так как за исключением капитальных вложений почти не требуют эксплуатационных расходов. При этом основной рабочий компонент, активный ил, при благоприятных условиях самовоспроизводится.

Процесс биологической очистки, как уже было показано выше, основан на способности микроорганизмов, использовать для своего

питания, находящиеся в сточных водах, органические вещества (спирты, кислоты, углеводы, белки, жиры и др. вещества) [6]. Азот, который необходим бактериям для жизнедеятельности, они извлекают из аммиака, нитратов, аминокислот, фосфор и калий – из минеральных солей, содержащихся в сточных водах. Активный ил, в процессе жизнедеятельности, получает материал для формирования и роста бактерий, скорость которого напрямую зависит от состава сточных вод. На интенсивность и эффективность биологической очистки значительное влияние оказывает скорость размножения бактерий [2].

Все методы биологической очистки в основном подразделяются на аэробные и анаэробные. При аэробных методах микроорганизмы используют растворенный в сточных водах кислород, а при анаэробных доступа к кислороду микроорганизмы не имеют.

Основными представителями аэробных методов являются аэротенки и биофильтры. В аэротенках процесс очистки осуществляется микроорганизмами. В процессе взаимодействия микроорганизмов друг с другом образуется активный ил, размер хлопьев, которых составляет в пределах от 1 до 4 мм. Биологическая очистка при этом осуществляется в ходе продвижения активного ила и сточной жидкости по коридору аэротенка. В ходе этого движения различают следующие процессы — деструкцию и трансформацию органического загрязнения микроорганизмами и биосорбцию загрязнения с образованием активного ила. Сорбируются как органические загрязнения, так и минеральные.

Биофильтр представляет собой герметичный объект, размещаемый на ровной площадке. При этом возможен быстрый его монтаж на площадках очистных сооружений из готовых заводских деталей. Механизм изъятия органических загрязнений из сточных вод осуществляется при контакте очищаемой сточной жидкости с активной биомассой. При этом активная биомасса биофильтра представляет собой структуру в виде биологическую пленку. Нужно иметь ввиду, что видовой состав, из которого состоит биопленка гораздо разнообразнее. Эта специфика, однозначно, повышает эффективность и стабильность очистки сточных вод. Кроме того, количество активной биопленки, на единицу объема биофильтра, в 25...50 раз больше для биофильтров с объемной загрузкой. При эксплуатации биофильтров с плоскостной загрузкой рабочей биомассы — в сотни раз больше, чем в аэротенках.

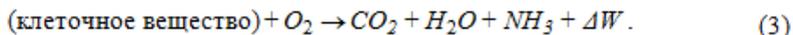
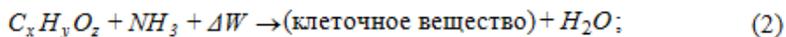
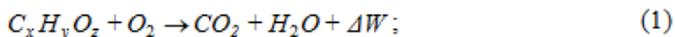
Основным преимуществом биофильтров по сравнению с аэротенками является естественное соответствие качества питательных веществ качеству потребителей. Качество субстрата обуславливает формирование биоценоза по ходу потока и создание оптимальных

условий для очистки сточных вод. При эксплуатации не наблюдается вспухание активного ила, пенообразование, вынос активного ила из сооружения.

Анаэробные способы очистки сточных вод представлены различными септиктенками, сбраживателями и биофильтрами с обратной фильтрацией. Все представители данной группы не получили широкого применения очистки сточных бытовых вод из-за высокой стоимости высокопористых насадок, ограничений по взвесям в стоках и необходимости периодической трудоемкой промывки биофильтров.

Способы биологической очистки, как видно, обладают рядом преимуществ: низкое энергопотребление; возможность автономной работы и использовании изымаемых излишек активного ила в качестве удобрения; отсутствие при обработке вредных химических веществ; отсутствие в стоках примесей и взвесей. Однако эти методы требуют в аэротенках заданного уровня насыщения кислородом и температуры в очищаемой жидкости.

Процессы преобразования органических веществ и энергии, протекающие при биологической очистке сточных бытовых вод, можно представить в виде системы реакций [4]:



Уравнение (1) показывает процесс окисления органического вещества, уравнение (2) — процесс синтеза клеточного материала. Уравнение (3) описывает процесс самоокисления бактериальных клеток активного ила.

Качество очистки биологическими методами зависит, прежде всего, от скорости окисления поверхности микроорганизмов, входящих в состав активного ила. Скорость окисления определяется скоростью доставки органических веществ к поверхности бактериальных клеток. Доставка осуществляется с помощью молекулярной диффузии. Диффузионные процессы происходят в слое II (рисунок 2). Чем тоньше слой II, тем быстрее происходит диффузия и тем выше скорость насыщения флоккулы органическими веществами из стоков. Для уменьшения пограничного слоя требуется эффективное перемешивание.

При перенасыщении флоккулы, ее размеры достигают значительных критических величин и ее способность к очищению падает. Таким образом, образуется вспухающий ил, от которого нужно избавляться и поддерживать оптимальный размер флоккул режимами механического воздействия.

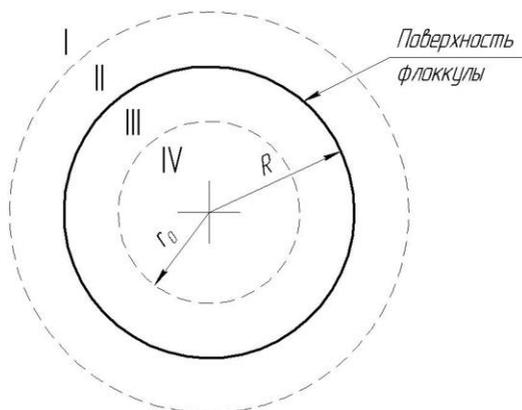


Рисунок 2. Структура флоккулы в диффузионной модели:
I — очищаемая среда; II — пограничный слой между слоем переработки органики и средой; III — объём внутри флоккулы с переменной концентрацией субстрата; IV — объём внутри флоккулы с нулевой концентрацией субстрата

Биологическая очистка сточных вод является самой эффективной и экологичной на сегодняшний день. Она обеспечивает высокую степень очистки и является химически безопасной по сравнению с другими методами. Однако ее эффективность в значительной степени зависит от размера флоккул активного ила. Поэтому разработка методов позволяющих за короткий промежуток времени эффективно изменять размеры флоккул до пределов, определяющих их наиболее активное состояние, является актуальной задачей в области водоочистки.

Список литературы:

1. Биологическая очистка сточных вод. Мосин О.В. [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/oprecnenie/biologi4eckaa_o4ictka_cto4nyh_vod.htm (дата обращения 12.12.2014).

2. Макаренко Э.Н. Использование симбиоза микробных ассоциаций для интенсификации биологической очистки сточных вод / Э.Н. Макаренко, Н.И. Касторной, Н.В. Смолина. Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2003. — С. 32 – 36.
3. Нюансы очистки сточных вод [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://kanalizaciya-expert.ru/naruzhnaya/stochnye-vody/ochistnye-sooruzheniya-kanalizacii-99> (дата обращения 02.12.2014).
4. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы/ М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. М.: Мир, 2004. — 480 с.
5. Процессы и аппараты защиты гидросферы — Ветошкин А.Г. [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://bookbk.net/book/127-processy-i-apparaty-zashhity-gidrosfery-vetoshkin-ag/7-14-metody-i-sposoby-ochistki-stochnyx-vod-ot-primesej.html> (дата обращения 14.11.2014).
6. Современные методы интенсификации работы аэротенков на очистных сооружениях больших городов: обзорная информация / В.И. Калицун, В.Н. Николаев, В.Д. Журавлёв, М.Г. Картавцева. М.: МГЦНТИ. — 1985. — Вып. 6. — 24 с.

ДИЛАТОМЕТРИЯ ФАНЕРЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ТЕПЛОВОМУ СТАРЕНИЮ И УФ-ОБЛУЧЕНИЮ

Мамонтов Семен Александрович

ассистент

Тамбовского государственного технического университета,

РФ, г. Тамбов

E-mail: kardinal61@mail.ru

Киселева Олеся Анатольевна

канд. техн. наук, доцент

Тамбовского государственного технического университета,

РФ, г. Тамбов

E-mail: kiseleva_oa@rambler.ru

DILATOMETRY OF PLYWOOD EXPOSED TO THERMAL AGING AND UV-IRRADIATION

Semen Mamontov

*assistant of Tambov State Technical University,
Russia, Tambov*

Olesya Kiseleva

*candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Tambov State Technical University,
Russia, Tambov*

АННОТАЦИЯ

Описано дилатометрическое исследование фанеры, которое позволяет оценить влияние теплового старения и УФ-облучения на её структуру и выявить процессы, протекающие в композите. Установлено, что длительное действие повышенной температуры и УФ-облучения увеличивают температурные деформации фанеры в 1,5—2 раза, что необходимо учитывать при её эксплуатации.

ABSTRACT

Dilatometric research of plywood, which allows to evaluate the effect of thermal aging and UV-irradiation on its structure and identify the processes occurring in the composite, is described. It is found that long action of elevated temperature and UV-irradiation increases the temperature deformations of plywood in 1,5—2 times that should be considered when its operation.

Ключевые слова: дилатометрия; фанера; тепловое старение; УФ-облучение.

Keywords: dilatometry; plywood; thermal aging; UV-irradiation.

Исследования, основанные на определении теплового расширения тел и его различных аномалий при фазовых переходах, называются дилатометрическими. Они составляют основу дилатометрии - раздела физики, изучающего зависимость изменения размеров твердого тела от температуры и других факторов [3, с. 34].

Старение древесных композитов, сопровождается изменением их влагосодержания, процессами деструкции и отверждения, а также процессами, связанными со снятием внутренних напряжений. В свою очередь это сказывается на их тепловом расширении [2, с. 86].

Использование таких прямых физических методов исследования строительных материалов, как дилатометрия, позволяет достаточно

обоснованно делать предположения о протекающих в материале процессах при их старении.

В качестве объекта исследования выбрана строительная фанера марки ФК на карбамидном связующем, образцы которой подвергались воздействию температуры 80°C и УФ-облучению в течение 10, 50, 100, 150 и 300 часов.

Реакции термо- и фотоокисления, инициирующие на разных стадиях старения образование новых связей или деструкцию материала, сказываются на расположении дилатометрических кривых (рисунок 1). Наблюдаемое на представленных кривых сужение образцов связано с уменьшением гигроскопической влажности древесного шпона и температурной усадкой полимерного связующего [2, с. 87].

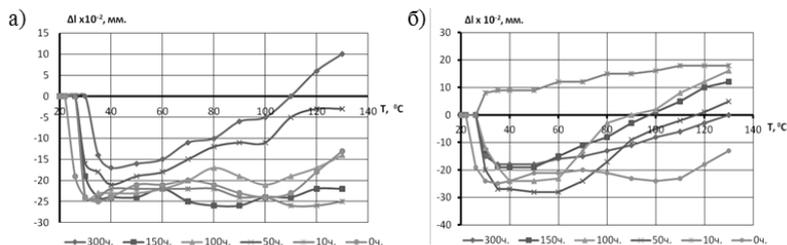


Рисунок 1. Дилатометрические кривые для фанеры, подверженной тепловому старению (а) и УФ-облучению (б) в течение заданного времени

В процессе изготовления фанерных плит в материале возникают значительные остаточные температурные напряжения из-за разности коэффициентов линейного расширения древесного шпона и карбамидного клея. Такое напряженное состояние сдерживает температурные деформации материала, в результате чего коэффициент термического расширения фанеры очень мал [2, с. 87]. В результате длительного прогревания и облучения величина коэффициента линейного термического расширения изменяется (таблица 1).

Таблица 1.

Влияние теплового старения (80⁰С) и УФ-облучения на величину коэффициента линейного термического расширения фанеры, α (1/⁰С)

	Время воздействия фактора старения, часы					
	0	10	50	100	150	300
Тепловое старение	5,3x10 ⁻⁶	5,09x10 ⁻⁶	6,29x10 ⁻⁶	5,47x10 ⁻⁶	4,77x10 ⁻⁶	7,25x10 ⁻⁶
УФ-облучение	5,3x10 ⁻⁶	5,17x10 ⁻⁶	11,1x10 ⁻⁶	11,9x10 ⁻⁶	9,45x10 ⁻⁶	5,44x10 ⁻⁶

Тепловое старение при 80⁰С в течение первых 50 часов приводит к перераспределению и релаксации внутренних остаточных напряжений. Коэффициент линейного температурного расширения при этом увеличивается в 1,2 раза, а соответствующая дилатометрическая кривая располагается выше кривой, описывающей температурные деформации для неподверженной старению фанеры (рисунок 1 а). Доотверждение синтетического клея при более длительном прогревании (150 часов) значительно снижает тепловое расширение фанеры. Однако, протекающие в следующие 150 часов реакции термоокислительной деструкции клея, древесного вещества и полимеров, входящих в его состав, увеличивают температурные деформации и после 300 часов они в 1,5 раза больше первоначальных. Соответствующая дилатометрическая кривая лежит выше кривой для материала, не подверженного старению, что подтверждает наличие большого числа дефектов в структуре композита.

Световое старение оказывает большее влияние на термическое расширение фанеры (рисунок 1 б). Фотохимические реакции, протекающие в облученном древесном шпоне в течение 100 часов, нарушают его целостность – материал становится рыхлым.

Соответствующая 100 часам уф-облучения дилатометрическая кривая проходит выше кривой для необлученной фанеры. В результате коэффициент теплового расширения увеличивается в 2 раза. Дальнейшее действие фактора, по-видимому, делает материал более жестким за счет возникновения новых связей, что приводит к уменьшению температурных деформаций после 300 часов облучения в 2 раза. Дилатометрическая кривая при этом находится выше кривой для исходного материала, что свидетельствует о нарушении связей в материале и определяющей роли полимера в процессах разрушения фанеры (рисунок 1 б).

Для подтверждения высказываний о накоплении дефектов структуры в процессе старения были сделаны микрофотографии поверхности образцов на цифровом микроскопе Levenhuk D50L NG (рисунок 2).

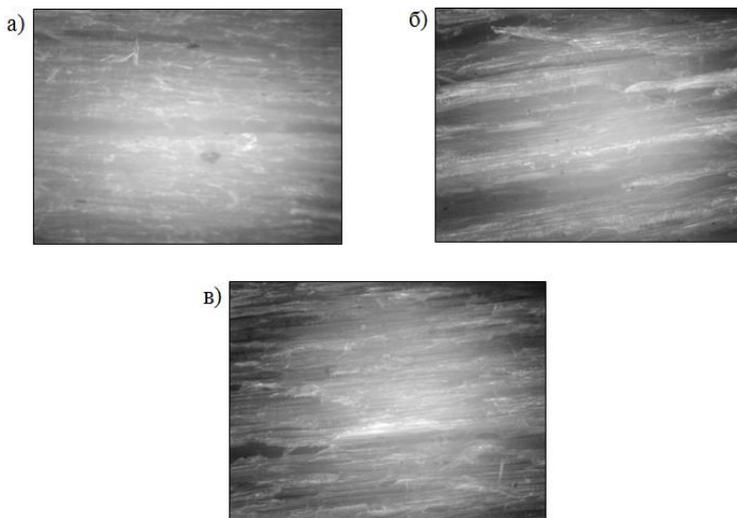


Рисунок 2. Микрофотографии поверхности образцов фанеры:
а) не подверженных старению; б) после 300 ч. УФ-облучения;
в) после 300 ч. теплового старения

Длительное действие повышенных температур и УФ-облучения вызывает растрескивание древесного шпона, что отражено на снимках в виде темных полос. Это связано с усадкой древесины, явившейся результатом испарения гигроскопической влаги из стенок древесных клеток [1, с. 35]. Кроме того, ультрафиолетовое облучение способствует окислению лигнина — природного полимера, входящего в состав древесины. Энергии ультрафиолетовых волн достаточно для разрушения связей в его основной молекулярной цепи. В результате образуются свободные радикалы, которые тут же окисляются кислородом воздуха [1, с. 443]. Так происходит фотодеструкция, в результате которой древесина меняет свой цвет, становится рыхлой и рассыпается. Подобное явление наблюдается на представленных снимках, на которых видны оборванные волокна древесины (рисунок 2 б).

Проведенное исследование по влиянию старения на изменение температурных деформаций фанеры подтверждает общеизвестный факт о том, что физико-химические превращения, протекающие в композите под действием факторов старения и вызывающие изменение его структуры, имеют сложный и непостоянный характер. Установлено, что длительное действие повышенной температуры и УФ-облучения увеличивает термическое расширение фанеры в 1,5 и 2 раза соответственно, что необходимо учитывать при её эксплуатации.

Список литературы:

1. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. Учебник для вузов. СПб.: СПбЛТА, 1999. — 628 с.
2. Мамонтов С.А., Киселева О.А. Тепловое и световое старение фанеры строительного назначения.//Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 5 (46). — С. 85—89.
3. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел: Монография М.: Наука, 1974. — 294 с.

СЕКЦИЯ 6.

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ГЕНЕРАЦИЯ КОМПЛЕКТОВ ОДЕЖДЫ ИЗ ОПТИМАЛЬНОГО АССОРТИМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Евдущенко Елена Владимировна

*канд. техн. наук, старший преподаватель
Омского государственного института сервиса,
РФ, г. Омск*

E-mail: evd.chi@gmail.com

GENERATION OF SETS OF CLOTHING FROM THE OPTIMAL ASSORTMENT IN THE DESIGN PROCESS FASHION APPAREL

Evdushchenko Elena

*candidate of technical sciences,
senior lecturer of Omsk state institute of Service,
Russia, Omsk*

АННОТАЦИЯ

В статье описывается математическая модель формирования комплектов изделий из оптимального ассортимента, которая позволяет формализовать процесс проектирования коллекций одежды. В работе используются методы: экспертных оценок, декомпозиции и морфологического анализа для генерации комплектов одежды в коллекцию с учетом предпочтений потребителей и модных тенденций. Решение задачи генерации комплектов одежды из ассортимента необходимо для автоматизации процесса проектирования промышленной коллекции в системе «гардероб».

ABSTRACT

The present article describes the mathematical model of formation sets of clothing from the optimal assortment which allows formalizing the process of designing fashion collections. In the paper the methods of expert estimates, decomposition and morphological analysis is used to generate sets of clothing in the collection based on consumer preferences and fashion trends. Solution of the problem of sets generation from the assortment is necessary to automate of collection designing in the fashion industry.

Ключевые слова: математическая модель; коллекция одежды; ассортимент; формализация; опрос потребителей; комплект одежды; морфологическая таблица.

Keywords: mathematical model; clothing collection; assortment; formalization; fashion trends; consumer research; set of clothing; morphological table.

В настоящее время процесс проектирования изделий легкой промышленности выполняется не только на основе тенденций моды, но и с учетом предпочтений потребителей. Проводятся изучение предпочтений, поведения и мотивов потребителей одежды, для использования результатов опроса в качестве исходной информации [1, с. 70].

Для удовлетворения спроса покупателей необходимо получить рациональную структуру промышленной коллекции одежды, созданную с учетом предпочтений потребителей, а также анализа модных тенденций [2, с. 243]. Разработка структуры коллекции позволит сократить затраты времени дизайнера на этапе выполнения технического задания, а также избежать ошибок, связанных с неправильным определением состава проектируемой коллекции одежды.

Было проведено научное исследование с целью формализации процесса, направленного на формирования рациональной структуры коллекции одежды в системе «гардероб» [5, с. 116]. Для успешного решения задачи по автоматизации формирования структуры коллекции необходимо определить критерии, по которым будет производиться оценка результата. Коллекция в системе «гардероб», которая рассчитывается на одну целевую группу, по сравнению с другими типами коллекций находится в большей зависимости от предпочтений потребителей.

В качестве первого критерия рассматривается рациональность структуры коллекции, то есть максимальное удовлетворение структуре спроса потребителей. Второй критерий рациональности коллекции в системе «гардероб» — это количество комплектов из изделий

коллекции. То есть комплектация всех изделий является очевидным показателем, как оптимальности ассортимента, так и соответствия модным тенденциям и предпочтениям потребителей.

Формирование комплекта из оптимального ассортимента происходит с учетом разработанных в исследовательской работе принципов, предпочтений потребителей и тенденций моды. Кроме того этот процесс требует соблюдения ограничений, так как сочетание определенных видов ассортимента не является функциональным и не соответствует эстетическим показателям. Так, в качестве примера может служить несовместимость жилета и полукомбинезона и др.

Для формирования комплекта одежды разрабатывается следующая последовательность, представленная на рисунке 1. Предлагаемая схема построена по принципу выделения определенного слоя комплекта в отдельные пять уровней. На каждом уровне представляются взаимозаменяемые и одинаковые по своему предназначению ассортиментные группы. Жилет и платье выделяются в самостоятельную группу для возможности комбинации с изделиями из других слоев. Согласно предложенной схеме формирование комплекта одежды происходит снизу вверх. На каждом уровне предусмотрен «нулевой» вариант, т.е. можно не выбирать ассортимент из данного уровня. На последнем уровне «нулевой» вариант нужен для того, чтобы был возможен выход, если в комплекте присутствует платье. Возможен выбор двух изделий одного уровня, но в этом случае должен быть пропущен другой уровень. Изделия нижнего уровня (пальто, плащ и т. д.) сочетаются со всеми изделиями из последующих уровней, поэтому для сокращения возможных вариантов комплектов можно формирование комплекта начинать со второго уровня. При этом изделия нижнего уровня, если они присутствуют в коллекции, можно рассматривать как самостоятельные и не включать в комплекты.

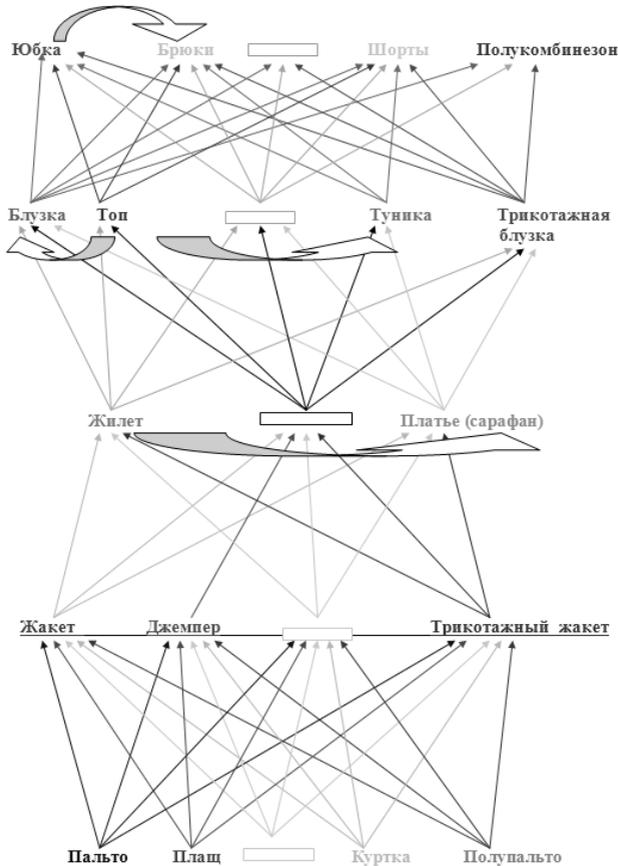


Рисунок 1. Схема выбора комплекта одежды по слоям

Таким образом, подбор изделий в комплекты осуществляется по четырем позициям, начиная со второго уровня и заканчивая пятым.

Разнообразие комплектов зависит от использованного ассортимента четырех уровней $i = 2, \dots, 5$ и может быть представлено в виде морфологической таблицы (таблицы 1), разработанной на основе экспертного опроса [3, с. 32, с. 50]. Морфологическая таблица представляет собой обобщенную структуру возможных вариантов комплектации ассортимента четырех уровней [4, с. 175]. Каждому варианту комплектации изделий ставится в соответствии одна строка таблицы, а каждому способу его реализации o_{ij} — одну клетку в этой

строке. Ассортимент в данной таблице имеет два способа реализации — присутствует в комплекте или нет.

Мощность способов реализации — сумма значений, которые принимает ассортимент каждого уровня в строке таблицы, обозначена d_i и равна:

$$d_i = \sum_{j=1}^{m_i} o_{ij}, \quad (1)$$

где: i — номер уровня с определенным составом видов ассортимента, $i = 2, \dots, n$;

j — номер вида ассортимента на заданном уровне, $j = 1, \dots, m_i$.

Каждый вариант комплектации включает по одному значению из строки морфологической таблицы, в результате количество всех альтернатив комплектов a_l одного варианта — строки — рассчитывается по формуле:

$$a_l = \prod_{i=2}^6 d_i, \quad (2)$$

где: d_i — мощность способов реализации ассортимента определенного уровня,

$i = 2, \dots, n$;

l — количество строк таблицы, соответствующих вариантам комплектации,

$l = 1, \dots, g$.

Таблица 1.

Морфологическая таблица возможных вариантов комплектации изделий

Варианты комплектации	2 уровень				3 уровень			4 уровень					5 уровень				6 уровень (дополнительный)			
	Жакет	Джемпер	Трикотажный жакет	Данный уровень не выбран	Жилет	Платье (сарафан)	Данный уровень не выбран	Блузка	Топ	Туника	Трикотажная блузка	Данный уровень не выбран	Юбка	Брюки	Полукомбинезон	Шорты	Данный уровень не выбран	Жилет	Топ	Юбка
1	+		+		+			+		+	+		+	+		+				
2	+		+			+						+	+				+			
3	+		+				+	+	+	+			+	+		+				
4	+		+				+	+	+	+					+	+				
5		+					+		+	+			+	+		+				
6	+	+	+				+					+	+	+	+	+				
7				+	+		+		+	+	+	+	+			+				
8				+		+	+	+		+	+	+	+			+				
9				+			+	+	+	+		+	+		+					
10				+			+	+	+	+				+						
11				+			+	+	+	+		+	+		+			+		
12				+		+					+						+	+		
13	+	+	+				+			+			+							+

Число возможных альтернатив — комплектов морфологической таблицы — определяются по формуле:

$$A = \sum_{l=1}^g a_l. \quad (3)$$

Математическое представление комплекта изделий показано в виде списка, максимальное количество элементов которого установленного размера — четыре вида ассортимента:

$$K_z = \{u_{iz}\}, \quad (4)$$

где: z — порядковый номер комплекта, $z = 1, \dots, t$;

i — номер позиции ассортимента в комплекте, $i = 1, \dots, 4$;

K_z — комплект изделий, $z = 1, \dots, t$;

u_{iz} — элемент комплекта.

Такое представление комплектов характерно как для всего множества комплектов $\{K_z\}$, так и для комплектов, сформированных по итогам опроса потребителей и анализа модных тенденций. Для отбора оптимальных комплектов, удовлетворяющих и предпочтениям потребителей и направлению моды, используется метод перебора. Отбор комплектов происходит при условии: 1) полного совпадения ассортимента; 2) присутствия одного отличия в списке комплектов из двух-трех изделий.

Математическая модель формирования комплектов изделий из ассортимента позволят разработать алгоритм для автоматизации процесса проектирования промышленных коллекций. Алгоритм генерации комплектов из установленного оптимального ассортимента должен реализовывать сравнение с предпочтительными и модными комплектами, присвоение определением рангов в соответствии со степенью их совпадения.

Решение задачи генерации комплектов одежды из оптимального ассортимента помимо автоматизации процесса проектирования промышленной коллекции в системе «гардероб», позволяет лучшим образом организовать совместную работу дизайнера, конструктора и маркетолога.

Список литературы:

1. Виниченко И.В., Баландина Е.А. Потребительские предпочтения населения как исходная информация при проектировании одежды / Современные исследования социальных проблем (электронный журнал). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. — Т. 7. — № 3. — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://sisp.nkras.ru/issues/2011/3/vinichenko.pdf>.
2. Виниченко И.В., Евдущенко Е.В. Особенности модных предпочтений и поведения потребителей, сформированных под влиянием эпохи дефицита // Омский научный вестник. Серия «Общество. История. Современность». — 2012. — № 1 (105). — С. 241—245.
3. Гуцыкова С.В. Метод экспертных оценок: теория и практика. М.: Издательство «Институт психологии РАН», 2011. — 144 с.
4. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. — 336 с.
5. Франк Е.В. Формализация процесса проектирования промышленных коллекций одежды с учетом предпочтений потребителей // Омский научный вестник. — 2006. — № 6 (41), — С. 115—118.

СЕКЦИЯ 7.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ МНОГОЛЕТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ АФРИКИ

Коваленко Виктор Васильевич

*д-р техн. наук,
зав. кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов, профессор,
Российский государственный гидрометеорологический университет,
РФ, г. Санкт-Петербург*

Гайдукова Екатерина Владимировна

*канд. техн. наук,
доцент кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, доцент,
Российский государственный гидрометеорологический университет,
РФ, г. Санкт-Петербург
E-mail: oderiut@mail.ru*

Диавара Хамиду

*аспирант кафедры гидрофизики и гидропрогнозов,
Российский государственный гидрометеорологический университет,
РФ, г. Санкт-Петербург*

Бонгу Эрнесто

*аспирант кафедры гидрофизики и гидропрогнозов,
Российский государственный гидрометеорологический университет,
РФ, г. Санкт-Петербург*

APPROBATION OF THE TECHNIQUE LONG-TERM EVALUATION MULTIYEAR EVAPORATION FOR AFRICAN RIVER BASINS

Viktor Kovalenko

*doctor of sciences,
Head of Department of Hydrophysics and Hydrological Forecasts,
Professor Russian State Hydrometeorological University,
Russia, St. Petersburg*

Gaidukova Ekaterina

*PhD, Associate Professor,
Department of Hydrophysics and Hydrological Forecasts,
Russian State Hydrometeorological University,
Russia, St. Petersburg*

Diawara Hamid

*graduate student of Department of Hydrophysics and Hydrological Forecasts,
Russian State Hydrometeorological University,
Russia, St. Petersburg*

Bongu Ernesto

*graduate student of Department of Hydrophysics and Hydrological Forecasts,
Russian State Hydrometeorological University,
Russia, St. Petersburg*

Исследования финансировались Министерством образования и науки РФ по теме: «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» № 1413 (№ государственной регистрации 01 2014 58678).

АННОТАЦИЯ

В работе применяется методика долгосрочного оценивания стоковых характеристик, основанная на уравнении Фоккера–Планка–Колмогорова, для прогнозирования характеристик испарения с речных бассейнов Африки. Произведено генерирование рядов годовых испарений с использованием метеорологических элементов (температуры воздуха и осадков). Выполнены ретроспективные прогнозы характе-

ристик испарения, которые подтвердили возможность применения рассматриваемой методики для долгосрочной оценки многолетних характеристик испарения в Африке.

ABSTRACT

In this paper used a technique of estimating the long-term runoff characteristics based on the Fokker–Planck–Kolmogorov for forecast the characteristics of evaporation from the river basins of Africa. Generated series of annual evaporation using meteorological elements (air temperature and precipitation). Performed a retrospective forecasts characteristics of evaporation, which confirmed the possibility of using this method for long-term estimating the evaporation characteristics in Africa.

Ключевые слова: годовое испарение; долгосрочные прогнозы; ретроспективные прогнозы; коэффициент вариации испарения; Африка.

Keywords: annual evaporation; long-term forecasts; retrospective forecasts; the coefficient of variation of evaporation; Africa.

Введение

Происходящие глобальные климатические изменения [8], наблюдаемые за последние три десятилетия, оказывают негативные воздействия на гидрометеорологические элементы. Примером такого негативного воздействия изменения климата является усложнение процесса формирования речного стока (как следствие уменьшения стока во многих речных бассейнах), из-за возрастающей роли испарения с поверхности водосборов [6, с. 236]. Усиливающаяся роль испарения, в свою очередь, приводит к неустойчивости решений модели формирования речного стока [3, с. 139—147]. В связи с этим актуальной становится задача долгосрочной оценки речного стока в условиях изменяющегося климата. Методика, позволяющая оценить речной сток в новых климатических условиях, уже разработана, апробирована и широко применяется к различным бассейнам Земного шара в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) [1, с. 78—84].

Целью данной статьи является апробация методики РГГМУ для испарения, которое вносит значительный вклад в процесс формирования стока с речных бассейнов Африки как в текущем, так и наиболее вероятно будет играть существенную роль, в ожидаемом климате.

Создание базы данных гидрометеорологических характеристик и статистическая оценка рядов испарений с речных бассейнов Африки

По данным Всемирной Метеорологической организации (ВМО) были собраны ряды годовых сумм осадков и среднегодовых температур воздуха с 1951 по 1990 гг. по 156 речным бассейнам (территориальное распределение постов, замыкающих речные бассейны, представлено на рис. 1).

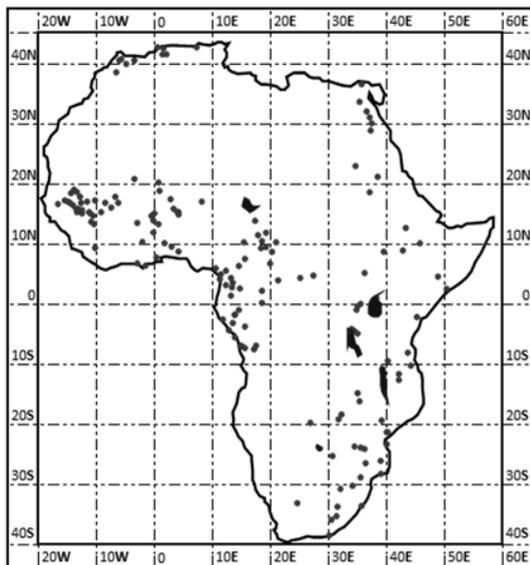


Рисунок 1. Карта распределения используемых в исследовании постов по территории Африки

Ряды годового испарения сгенерированы по наиболее подходящей для этих целей формуле Тюрка [7, с. 314]:

$$E = P / \sqrt{0,9 + P^2 / (300 + 25T + 0,05T^3)^2}, \quad (1)$$

где: E — суммарное испарение с речного бассейна, мм;

P — сумма годовых осадков, мм;

T — среднегодовая температура воздуха, °С.

Производилась статистическая обработка [5, с. 279] рядов испарения, в результате которой определены основные характеристики: норма испарения (\bar{E}), коэффициенты вариации (Cv) и асимметрии (Cs), коэффициент автокорреляции при годовой сдвигке ($r(1)$).

Для наглядности и анализа рассчитанных статистических характеристик построены карты их распределения по территории речных бассейнов Африки. Распределение нормы и коэффициента вариации испарения представлены на рис. 2.

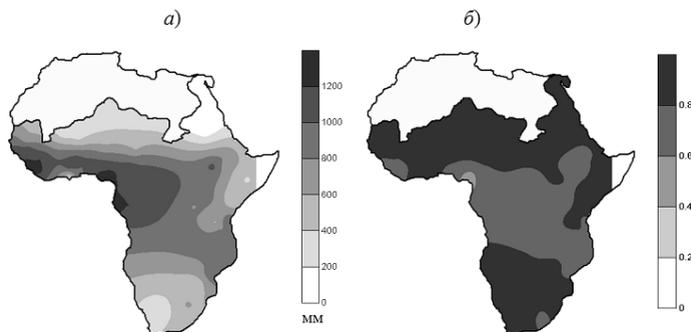


Рисунок 2. Карта нормы (а) и коэффициента вариации (б) годового испарения

Из построенных карт следует вывод о том, что максимальное значение испарения за год наблюдается в центральной части Африки и может достигать 1200 мм. Норма испарения постепенно уменьшается по мере удаления от экватора к тропикам, где годовое испарение с речных бассейнов составляет от 200 до 400 мм. Что касается изменчивости во времени, коэффициент вариации наоборот максимален в тропической части континента (больше 0,8) и минимален в центральной части (от 0,2 до 0,4). Такая закономерность изменения годового испарение можно объяснить, опираясь на понимание погодных и климатических условий экваториальной и субтропической Африки. Так в центральной части имеет место экваториальный тип климата, т. е. осадки выпадают в течение всего года, и среднемесячные температуры воздуха колеблются около 20 °С, что способствует испарению воды на протяжении всех месяцев года со значениями, мало отличающимися друг от друга (т. е. с маленькой вариацией), и, соответственно, увеличению объема испарившейся воды. На субтропической части температуры такие же высокие, а продолжительность сезона дождей намного меньше (до 3 месяцев), чем продолжительность сезона без дождей (сухой сезон), т. е. выпадает меньшее количество осадков, и они неравномерно распределены в течение

сезона, поэтому наблюдаем маленькие значения испарения с большой дисперсией.

Апробация методики долгосрочной оценки испарения для речных бассейнов Африки

Методика долгосрочной оценки испарения идентична методике для речного стока (сток заменяется испарением). Методика основана на уравнении Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) [2, с. 230], которое можно аппроксимировать системой дифференциальных уравнений для начальных моментов m_i [4, с. 51]. В данном случае использовался упрощенный (для практических целей) вариант системы, который подразумевает: стационарный режим случайного процесса формирования испарения; ликвидацию внутренних и взаимных шумов системы для получения устойчивых решений в текущем и в ожидаемом климате; постоянства соотношения коэффициентов вариации и асимметрии и интенсивности климатического шума ($G_{\bar{N}}$) при изменении климата. При таких допущениях система имеет следующий вид [4, с. 51]:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0; \\ -\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где: $\bar{c} = 1/k_E\tau$; $\bar{N} = \bar{X}/\tau$;

k_E — коэффициент испарения;

τ — время релаксации речного бассейна (для многолетнего стока $\tau = 1$ год);

\bar{X} — интенсивность осадков;

m_1, m_2 — первый и второй момент соответственно.

Апробация методики основана на использовании ретроспективного материала, т. е. существующие ряды испарения разбиваются на две части максимально отличные друг от друга по однородности среднего и дисперсии (рассчитываются статистические оценки однородности по критерию Стьюдента и Фишера). Таким образом, получаются неоднородные относительно друг друга ряды испарения (половинки одного исходного ряда), которые можно использовать для поверочных долгосрочных прогнозов. Алгоритм долгосрочного прогнозирования характеристик испарения содержит следующие этапы [4, с. 51]:

Этап 1 — параметризация модели.

По первой половине ряда рассчитываем интенсивность климатического шума ($G_{\bar{N}}$) по модели (2), при известных значениях начальных моментов m_1 , m_2 , коэффициента обратного коэффициенту стока (\bar{c}) и нормы осадков (\bar{N}).

Этап 2 — долгосрочный прогноз.

Зная $G_{\bar{N}}$ (из предыдущего этапа), осадки, соответствующие второй половине ряда, параметр \bar{c} , который может быть связан с метеорологическими характеристиками [4, с. 51], например, температурой воздуха, решается система (2) относительно моментов, которые можно считать прогнозными для второй половины ряда (поверочные прогнозы). От моментов уже можно перейти к статистическим характеристикам (норме и коэффициенту вариации испарения).

В данном исследовании осуществились прямые и обратные (параметризация производилась по второй половине ряда, и прогноз давался на первую половину) ретроспективные прогнозы по 12-ти рядам испарения. Прогнозы давались в двух вариантах: 1 — при постоянном коэффициенте испарения ($k_E = \text{const}$); 2 — с фактическим для того периода, на который давался прогноз, коэффициентом стока ($k_E = k_{\text{факт}}$).

Результаты, полученные по ретроспективным прогнозам (норма, коэффициенты вариации и асимметрии испарения), позволили построить прогнозные кривые обеспеченности, которые сравнивались с фактическими кривыми обеспеченности. Пример таких кривых показан на рис. 3.

Оценка эффективности ретроспективных прогнозов (т. е. проверка соответствия прогнозных кривых фактической) производилась по критерию согласия Колмогорова [5, с. 279]. Число и доля оправдавшихся ретроспективных прогнозов при различных уровнях значимости (у.з.) показаны в табл. 1.

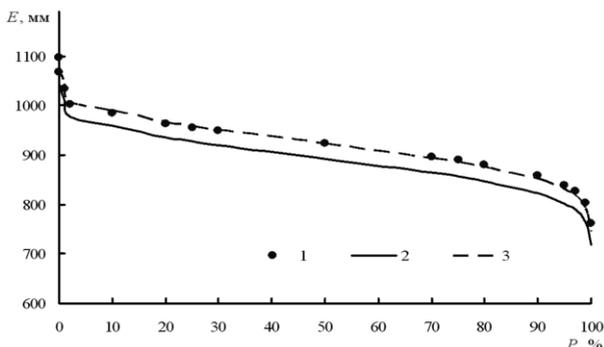


Рисунок 3. Фактические точки (1) и прогнозные (2 — $k_E = \text{const}$ и 3 — $k_E = k_{\text{факт}}$) кривые обеспеченности испарения с водосбора реки Чари, пост Sarh

Таблица 1.

Результаты ретроспективных прогнозов

Оправдавшиеся прогнозы	$k_E = k_{\text{факт}}$				$k_E = \text{const}$			
	1 % у.з.	5 % у.з.	10 % у.з.	20 % у.з.	1 % у.з.	5 % у.з.	10 % у.з.	20 % у.з.
число	22	22	22	22	19	16	15	12
в % от общего числа	91,7	91,7	91,7	91,7	79,2	66,7	62,5	50,0

Из таблицы видно, что на всех представленных уровнях значимости оправдалось 22 из 24 (или 91,7 %) прогноза при использовании фактического значения коэффициента испарения. При постоянном коэффициенте испарения доля оправдавшихся прогнозов уменьшается, и на 5 % уровне значимости она составляет 66,7 % (очевидно, что с увеличением уровня значимости доля оправдавшихся прогнозов уменьшается).

Выводы

В результате проделанной работы построены карты характеристик испарения с водосборов Африки. Применена методика РГГМУ долгосрочной оценки стоковых характеристик для испарения; выполненные ретроспективные прогнозы показали возможность использования этой методики для испарения. Сделанный вывод позволяет в будущем повысить надежность выполняемых долгосрочных прогнозов статистических характеристик речного стока с учетом испарения при изменении климата на Африканских водосборах.

Список литературы:

1. Коваленко В.В. К методике прогноза двумерных вероятностных распределений многолетнего стока и испарения // Метеорология и гидрология, — 2014, — № 2. — С. 78—84.
2. Коваленко В.В. Частично инфинитная гидрология. СПб.: изд. РГГМУ, 2007. — 230 с.
3. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Куасси А.Б.Г. Прогнозирование изменений фрактальной размерности многолетнего речного стока // Естественные и технические науки, — 2007, — № 6. — С. 139—147.
4. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. СПб.: изд. РГГМУ, 2010. — 51 с.
5. Сикан А.В. Статистические методы обработки гидрологической информации. СПб.: изд. РГГМУ, 2007. — 279 с.
6. Bates В.С., Kundzewicz Z.W., Palutikof J.P., éd. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève: Secrétariat du GIEC, 2008. — 236 p.
7. Musy André, Higy Christophe. Hydrologie: Une science de la nature, Tome 1. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004. — 314 p.
8. The IPCC Assessment reports / IPCC. — 2009. [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.ipcc.ch>.

СЕКЦИЯ 8.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАПЛИ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Алабушев Алексей Анатольевич

*канд. физ.-мат. наук, с.н.с. лаборатории Вычислительной
гидродинамики, Института Механики сплошных сред УрО РАН,
РФ, г. Пермь*

E-mail: alabuzhev@mail.ru

Кашина Марина Анатольевна

*студент 2 курса физического факультета
Пермского национального исследовательского университета,
РФ, г. Пермь*

E-mail: alabuzhev@mail.ru

PARAMETRICAL INSTABILITY OF CYLINDRICAL DROP IN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Aleksey Alabuzhev

*candidate of Science, Senior staff scientist of Laboratory of Computational
Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Russia, Perm*

Marina Kashina

*student of Physical Department, Perm State University,
Russia, Perm*

Работа поддержана РФФИ (грант № 14-01-96017-р-урал-а).

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется поведение капли несжимаемой жидкости под действием переменного электрического поля. В равно-

весном состоянии капля имеет форму цилиндра, ограниченного в осевом направлении параллельными твердыми плоскостями. Электрическое поле периодически по времени с некоторой частотой. Рассмотрены вынужденные колебания капли. Получены данные об отклонении поверхности и частотных характеристиках в зависимости от параметров задачи.

ABSTRACT

The behavior of a drop of incompressible fluid under the influence of an alternating electric field is investigated in this paper. In equilibrium, the drop is cylindrical, limited axially parallel solid planes. The electric field is periodic in time with a certain frequency. The forced oscillations of the drop considered. The surface deviation and frequency characteristics depending on the parameters of the problem were obtained.

Ключевые слова: капля жидкости; линейный резонанс; переменное электрическое поле; вынужденные колебания; электросмачивание.

Keywords: fluid drop, linear resonance, alternating electric field, power oscillations, electrowetting.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Капля несжимаемой жидкости с плотностью ρ_i^* , окруженная другой жидкостью плотности ρ_e^* . Вся система ограничена двумя параллельными твердыми поверхностями (рис. 1), расстояние между которыми равно h^* . Сосуд замкнут на бесконечности. Капля имеет форму цилиндра радиусом R^* в отсутствие внешних сил. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердыми плоскостями прямой. На систему действует переменной неоднородное электрическое поле с амплитудой A^* и частотой ω^* . Это поле играет роль внешней силы, которая заставляет двигаться контактную линию. Для описания движения контактной линии используется модифицированное условие Хокинга [3]: скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональная удвоенной частоте электрического поля ω^* .

постоянную Хокинга (параметр смачивания)
 $\lambda = \Lambda^* / \sqrt{(\rho_e^* + \rho_i^*) R^* h^2 / \sigma}$, частоту внешнего воздействия
 $\omega = \omega^* \sqrt{(\rho_e^* + \rho_i^*) R^* h^2 / \sigma}$, геометрический параметр $b = R^* / h^*$,
 плотность внешней жидкости $\rho_e = \rho_e^* / (\rho_e^* + \rho_i^*)$, плотность жидкости
 в капле $\rho_i = \rho_i^* / (\rho_e^* + \rho_i^*)$, последние два параметра связаны
 соотношением $\rho_i + \rho_e = 1$.

2. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

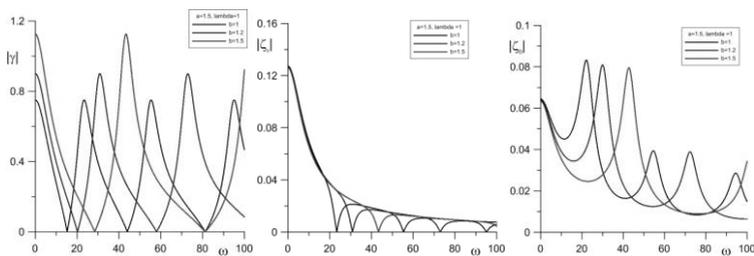
Собственные колебания такой капли были изучены в работе [1].
 Нечетные моды вынужденных колебаний исследовались в [2].
 Решение уравнения Лапласа (0.1) с учетом граничного условия (0.4)
 можно записать в виде:

$$\varphi_e(r, z, t) = \sum_{k=0}^{\infty} b_k K_0(2k\pi br) \cos(2k\pi z) e^{i\omega t}, \quad (0.5)$$

$$\varphi_i(r, z, t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k I_0(2k\pi br) \cos(2k\pi z) e^{i\omega t}, \quad (0.6)$$

$$\zeta(z, t) = \left(\sum_{k=0}^{\infty} c_k \cos(2k\pi z) + d \cos\left(\frac{z}{b}\right) \right) \cos(\alpha) e^{i\omega t} \quad (0.7)$$

где: I_0 , K_0 — модифицированные функции Бесселя. Подставляя
 решения (0.5)—(0.7) в уравнения (0.1)—(0.4), получим выражения
 для неизвестных амплитуд a_k , b_k , c_k и d .



**Рисунок 2. Максимальное отклонение боковой поверхности
 и краевого угла при трех разных значениях**

b ($\lambda = 1$, $\alpha = 1.5$, $\rho_i = 0.7$).

На рис. 2 показано максимальное отклонение боковой поверхности на верхней подложке $|\zeta|_{z=1/2} = |\zeta_s|$, в середине слоя $|\zeta|_{z=0} = |\zeta_s|$ и значения краевого угла $\vartheta: |\gamma| = \text{ctg}(\vartheta)$ в зависимости от частоты электрического поля при разных значениях геометрического параметра b .

На рис. 3 показано максимальное отклонение боковой поверхности на верхней подложке $|\zeta_s|$, в середине слоя $|\zeta_s|$ и значения краевого угла $\vartheta: |\gamma| = \text{ctg}(\vartheta)$ в зависимости от частоты электрического поля при разных значениях постоянной Хокинга λ .

Сравнивая полученные зависимости с результатами натуральных экспериментов можно определить постоянную Хокинга λ .

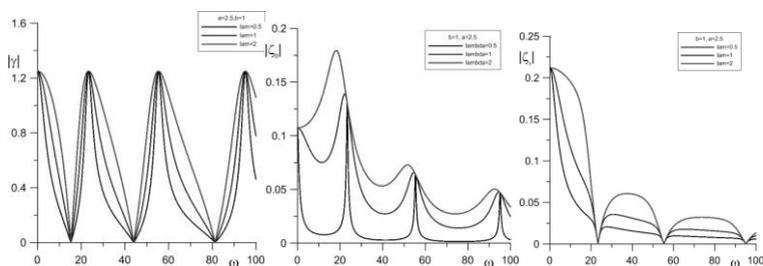


Рисунок 3. Максимальное отклонение боковой поверхности и краевого угла при трех разных значениях

$$\lambda \quad (b = 1, \alpha = 1.5, \rho_i = 0.7)$$

Список литературы:

1. Алабужев А.А., Любимов Д.В. Влияние динамики контактной линии на собственные колебания цилиндрической капли // ПМТФ. — 2007. — Т. 48, № 5. — С. 78—86.
2. Кашина М.А. Влияние переменного электрического поля на колебания цилиндрической капли // Материалы XXIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». Изд-во ПНИПУ, г. Пермь, 2014. — С. 120—122.
3. Hocking L.M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // J. Fluid Mech. — 1987. — V. 179. — P. 253—266.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

**«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ –
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ»**

Сборник статей по материалам
XLI международной научно-практической конференции

№ 12 (37)

Декабрь 2014 г.

Подписано в печать 30.12.14. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,125. Тираж 550 экз.

Издательство «СибАК»
630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 165, офис 9
E-mail: mail@sibac.info

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Allprint»
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3