

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»**

УДК 681.511.4

**Козлов
Андрей Владимирович**

**МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННОЙ ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД
АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ
ТИПА «ПРОИЗВЕДЕНИЕ»**

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Гомель 2007

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в рамках Государственной комплексной программы научных исследований № ГР 20064368 «Исследование механики технических и биомеханических систем, разработка эффективных методов повышения их надежности, создание новых компонентов машин и оборудования для машиностроения» по заданию «Механика 2.31» на тему «Математическое и программное обеспечение анализа и синтеза автоматизированных электроприводов на несущей переменного тока» и в соответствии с темой научно-исследовательской работы кафедры «Автоматизированный электропривод» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» № ГР 20001526 «Метод типовых динамических звеньев при многомерном операторном анализе САУ».

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение».

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать теоретические основы многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение»;
- развить метод типовых динамических звеньев на основе многомерного интегрального преобразования произведений функций времени;
- определить правила построения и преобразования многомерно-временных операторных структурных схем;
- получить многомерно-временные операторные структурные схемы и передаточные функции основных измерительных, модулирующе-демодулирующих, усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение»;
- реализовать многомерно-временной операторный метод для исследования типовой следящей системы, работающей на несущей переменного тока;
- внедрить научные и практические результаты в производство и в учебный процесс ряда учреждений образования Республики Беларусь.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Теоретические основы многомерно-временного операторного метода преобразования произведений временных функций, который в отличие от одномерного операторного преобразования по Лапласу позволяет получать изображения произведения временных функций без вычисления интеграла свертки.

2. Метод типовых многомерно-временных динамических звеньев, отличающийся от известного метода типовых динамических звеньев упрощением математических операций с произведениями временных функций.

3. Правила построения и преобразования многомерно-временных операторных схем, облегчающие анализ и синтез элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение».

4. Многомерно-временные структурные схемы и передаточные функции основных элементов систем управления, которые в отличие от традиционных структурных схем и передаточных функций имеют точное аналитическое выражение.

5. Программное обеспечение многомерно-временного структурного анализа элементов систем с нелинейностями типа «произведение», позволяющее проводить анализ и синтез элементов систем автоматического управления по предлагаемой методике.

6. Анализ типовой следящей системы, работающей на несущей переменного тока, разработанным методом.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем [2-А], [4-А], [5-А], [9-А], [11-А]-[15-А].

Научные результаты, полученные в соавторстве:

В [1-А], [6-А], [10-А] соискатель, используя идею многомерно-временного операторного метода, которая была предложена профессором Луковниковым В. И. в [11-А], разработал основные положения методики - типовые многомерно-временные динамические звенья и проверил их истинность путем оценки их адекватности во временной области.

В [7-А], [8-А] совместно с Комяковым Д. Н. соискатель представил многомерную операторную математическую модель обобщенного электромеханического преобразователя, а также исследовал применение метода в отношении систем автоматического управления (САУ) с обратными связями.

В [3-А] профессор Луковников В. И. и соискатель произвели анализ адекватности моделей асинхронного двухфазного электродвигателя во временной, одномерно-операторной и многомерно-временной операторной областях.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы: на международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов, посвященной 55-летию Победы в Великой Отечественной войне (Гомель, 2000); международных научно-технических конференциях «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2000, 2002, 2006); международной научно-технической конференции «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация» (Гомель, 2001); респуб-

ликанской научно-технической конференции студентов и аспирантов «НИРС-2003» (Минск, 2003); республиканской научной конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы математики и вычислительной техники» (Брест, 2003); международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 2006);

Опубликованность результатов. Результаты выполненных исследований по теме диссертации опубликованы в трех статьях журнала «Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого», одной статье журнала «Вестник Белорусско-Российского университета», семи статьях материалов международных научно-технических конференций, двух тезисах докладов.

Изданы практическое руководство «Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза электрических цепей к расчету пассивных линейных электрических цепей» и практическое руководство к расчетно-графической работе «Расчет переходного процесса пуска двухфазного асинхронного электродвигателя» к разделу «Периодические несинусоидальные токи» курса «Теоретические основы электротехники».

Всего объем опубликованных материалов составляет 98 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем работы составляет 134 страницы, в том числе 66 рисунков на 49 страницах, 8 таблиц на 17 страницах, 5 приложений на 20 страницах и библиографический список, который в свою очередь состоит из списка 56 использованных источников на 4 страницах и списка 15 публикаций соискателя на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показано, что методологической слабостью традиционных подходов к анализу элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение» является использование одномерно-го интегрального преобразования Лапласа, поскольку это приводит в общем случае к необходимости вычисления интегралов свертки от произведения временных функций. При этом аналитические преобразования становятся громоздкими, без серьезных допущений не удастся получить общую передаточную функцию элементов, структурные схемы представляются в виде бесконечных цепей.

В общей характеристике работы сформулированы цель и задачи исследования, его связь с научно-исследовательскими работами учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», представлены положения, выносимые на защиту,

личный вклад соискателя, а также апробация результатов диссертации и опубликованность результатов.

В первой главе проведен критический обзор современных символическо-операторных методов анализа элементов систем автоматического управления, который показал, что в случае наличия элементов с нелинейностями типа «произведение» наиболее перспективным для анализа является многомерно-временной операторный метод, построенный на базе модифицированного многомерного интегрального преобразования произведений функций времени.

Его применение исключает необходимость вычисления интеграла свертки и тем самым упрощает и повышает точность анализа и синтеза элементов систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение».

Во второй главе на базе многомерного интегрального преобразования произведений функций времени разработан метод многомерно-временных динамических звеньев, научная идея которого заключается в первоначальном переходе от естественной одномерной временной области с переменной t к искусственной многомерной временной области с независимыми переменными t_1, t_2, \dots, t_n , принадлежащими к различным множителям и в последующем изображении полученной функции

$$f(t) = \prod_{k=1}^n f_k(t) = \prod_{k=1}^n f_k(t_k) \quad (1)$$

по модифицированному многомерному преобразованию Лапласа

$$L \left\{ \prod_{k=1}^n f_k(t_k) \right\} = \prod_{k=1}^n F_k(p_k), \quad (2)$$

где $F_k(p_k)$ – изображения сомножителей по одномерному преобразованию Лапласа.

Такой подход дает возможность представлять произведение одномерных функций-оригиналов с различными независимыми временными переменными t_1, t_2, \dots, t_n в виде произведений их одномерных операторных изображений с различными операторами p_1, p_2, \dots, p_n , что на базе одномерного интегрального преобразования невозможно.

В подразделе «Анализ современных реализаций метода типовых динамических звеньев в системах автоматического управления» для различных типов систем автоматического управления (линейные, дискретные, нелинейные) определены границы применимости традиционного метода типовых динамических звеньев, базирующегося на одномерном интегральном преобразовании Лапласа и перспективы применения нового метода многомерно-временных динамических звеньев.

Далее в диссертационной работе раскрывается суть центрального понятия новой методики анализа - понятие «многомерно-временное динамическое звено».

Традиционные динамические звенья предлагается называть многомерно-временными динамическими звеньями, если они описываются многомерно-временными оригиналами (1) и их изображениями (2).

По типологии многомерно-временные динамические звенья разбиваются на два класса:

- многомерно-временные динамические звенья без модуляции;
- многомерно-временные динамические звенья с модуляцией.

Звенья без модуляции имеют одинаковый порядок сигнала на входе и выходе, а звенья с модуляцией разный, например, на входе и выходе звена без модуляции имеются сигналы $X_{вх}(p_1, p_2)$ и $X_{вых}(p_1, p_2)$ соответственно.

Например, передаточная функция многомерно-временного форсирующего звена первого порядка без модуляции определяется следующим соотношением:

$$W(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{X_{вых}(p_1, p_2, \dots, p_n)}{X_{вх}(p_1, p_2, \dots, p_n)} = T \cdot \sum_{k=1}^n p_k + 1, \quad (3)$$

где $X_{вх}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – многомерное изображение сигнала на входе звена; $X_{вых}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – многомерное изображение сигнала на выходе звена; T – постоянная времени звена.

Аналогичным образом можно найти соответствие всем типовым одномерным динамическим звеньям в многомерной операторной форме. Для этого нужно оператор « p » заменить на сумму операторов « $p_1 + p_2 + \dots + p_n$ ». Передаточные функции основных типов многомерно-временных динамических звеньев без модуляции приведены в таблице 1 (фрагмент). Полный вариант таблицы представлен в диссертационной работе и содержит семь типов динамических звеньев.

Таблица 1 – Передаточные функции типовых многомерно-временных динамических звеньев без модуляции

Тип звеньев	Одномерные звенья	Многомерные звенья
Безынерционное	K	K
Идеальное дифференцирующее	$T \cdot p$	$T \cdot \sum_{k=1}^n p_k$
Форсирующее первого порядка	$T \cdot p + 1$	$T \cdot \sum_{k=1}^n p_k + 1$

Продолжение таблицы 1

Тип звеньев	Одномерные звенья	Многомерные звенья
Форсирующее второго порядка	$T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1$	$T^2 \cdot \left(\sum_{k=1}^n p_k \right)^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \sum_{k=1}^n p_k + 1$
Идеальное интегрирующее	$(T \cdot p)^{-1}$	$\left(T \cdot \sum_{k=1}^n p_k \right)^{-1}$
Апериодическое первого порядка	$(T \cdot p + 1)^{-1}$	$\left(T \cdot \sum_{k=1}^n p_k + 1 \right)^{-1}$
Апериодическое второго порядка	$(T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1)^{-1}$	$\left(T^2 \cdot \left(\sum_{k=1}^n p_k \right)^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \sum_{k=1}^n p_k + 1 \right)^{-1}$

В таблице 1 обозначено: ξ – коэффициент затухания.

Для звеньев с модуляцией порядок сигнала на выходе звена отличается от порядка на входе звена. Например, сигнал на входе может быть $X_{вх}(p_1, p_2)$, а на выходе $X_{вых}(p_1, p_2, p_2)$.

Любое многомерно-временное динамическое звено с модуляцией представляется в виде одной из трех математических моделей. Это идеальный модулятор (демодулятор), модулятор–демодулятор, модулятор–пассивный четырехполюсник–демодулятор. Первые две модели можно рассматривать как частные случаи звена «модулятор–пассивный четырехполюсник–демодулятор», функциональная схема и передаточная функция которого представлены в таблице 2 (фрагмент). Полный вариант таблицы представлен в диссертационной работе и содержит три типа динамических звеньев.

Таблица 2 – Функциональная схема и передаточная функция многомерно-временного звена с модуляцией

Тип звена	Функциональная схема звена и передаточная функция звена
Модулятор–пассивный четырехполюсник–демодулятор	$x_{\text{вых}}(t) = D_t [x_{\text{вх}}(t) \cdot x_{\text{ом}}(t)] \cdot x_{\text{од}}(t)$ $W(p_1, p_2, p_3) = \frac{X_{\text{вых}}(p_1, p_2, p_3)}{X_{\text{вх}}(p_1)} = X_{\text{ом}}(p_2) \cdot F(p_1, p_2) \cdot X_{\text{од}}(p_3)$

В таблице 2 обозначено:

– $x_{\text{вх}}(t), x_{\text{ом}}(t), x_{\text{од}}(t), x_{\text{вых}}(t)$ – входной, опорный модуляции, опорный демодуляции, выходной сигналы соответственно;

– $X_{\text{вх}}(p_1), X_{\text{ом}}(p_2), X_{\text{од}}(p_3), X_{\text{вых}}(p_1, p_2, p_3)$ – многомерно-временные операторные изображения входного, опорного модуляции, опорного демодуляции, выходного сигналов соответственно;

– D_t – временной оператор, в общем случае определяющий некоторое интегро-дифференциальное преобразование над сигналами $x_{\text{вх}}(t)$ и $x_{\text{ом}}(t)$;

– $F(p_1, p_2)$ – многомерная передаточная функция пассивного четырехполюсника.

При получении передаточных функций типовых многомерно-временных динамических звеньев использовались линейные математические операции в многомерной операторной области. Это позволяет модифицировать известные для линейных систем автоматического управления правила преобразований структурных одномерных схем на многомерные схемы, с целью получения в дальнейшем общей передаточной функции всей системы.

При последовательном соединении многомерно-временных динамических звеньев без модуляции их передаточные функции перемножаются (рисунок 1, а):

$$W(p_1, p_2) = W_1(p_1, p_2) \cdot W_2(p_1, p_2). \quad (4)$$

При последовательном соединении многомерно-временных динамических звеньев с модуляцией результат оказывается тот же, но увеличивается число независимых переменных (рисунок 1, б):

$$W(p_1, p_2, \dots, p_5) = W_1(p_1, p_2, p_3) \cdot W_2(p_1, p_2, \dots, p_5). \quad (5)$$

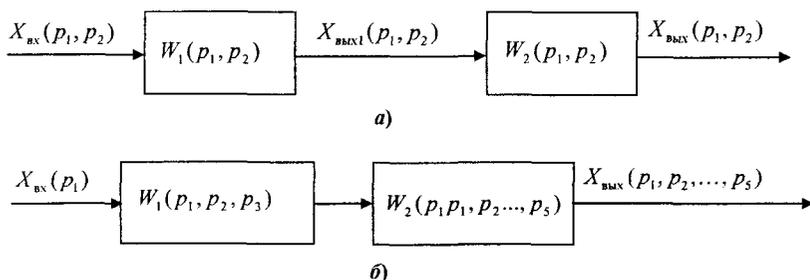


Рисунок 1 – Последовательное соединение многомерно-временных динамических звеньев: а – без модуляции; б – с модуляцией

Аналогичным образом можно показать, что при параллельном соединении многомерно-временных динамических звеньев их передаточные функции складываются.

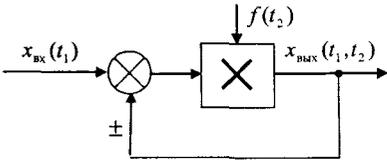
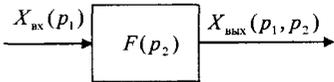
При разработке правил структурных преобразований для многомерно-временных динамических звеньев без модуляции, охваченных обратными связями, тоже использовались линейные математические операции в многомерной операторной области, что позволяет, например, для двухмерной операторной области записать:

$$W(p_1, p_2) = \frac{W_1(p_1, p_2)}{1 \pm W_1(p_1, p_2) \cdot W_2(p_1, p_2)}, \quad (6)$$

где $W_1(p_1, p_2)$ – двухмерная передаточная функция динамического звена прямого канала; $W_2(p_1, p_2)$ – двухмерная передаточная функция динамического звена обратной связи.

Правила структурных преобразований для многомерно-временных динамических звеньев с модуляцией, охваченных обратными связями, представлены в таблице 3, которая является фрагментом полного варианта таблицы, представленной в диссертационной работе и содержит два правила структурных преобразований.

Таблица 3 – Правила структурных преобразований для многомерно-временных динамических звеньев с модуляцией, охваченных обратными связями

	Многомерная структурная схема	Многомерно-операторные выражения
Многомерная временная область	 $x_{\text{вых}}(t_1, t_2) = x_{\text{вх}}(t_1) \cdot \frac{f(t_2)}{1 \pm f(t_2)} = x_{\text{вх}}(t_1) \cdot \Phi(t_2)$	$F(p_2) = \frac{X_{\text{вых}}(p_1, p_2)}{X_{\text{вх}}(p_1)} = L\{\Phi(t_2)\} = L\left\{\frac{f(t_2)}{1 \pm f(t_2)}\right\}$
Многомерная операторная область		

В таблице 3 обозначено: $f(t)$ -многомерно-временной опорный сигнал.

В третьей главе были впервые получены четырнадцать многомерных передаточных функций простейших множительных устройств для различных входных и несущих сигналов, семь многомерных передаточных функций и структурных схем типовых последовательных трактов «модулятор-звено переменного тока-демодулятор» для различных несущих (опорных) сигналов. Сделано сравнение одномерного и многомерного структурно-операторных методов анализа модулирующе-демодулирующих блоков, которое показало преимущества многомерного анализа перед одномерным.

Например, одномерное изображение выходного сигнала простейшего множительного устройства с входным сигналом

$$x_{\text{вх}} = k_{\text{вх}} \cdot \sin \Omega \cdot t$$

и несущим сигналом прямоугольной формы с периодом T при традиционном подходе будет определяться выражением:

$$X_{\text{вых}}(p) = \frac{k_{\text{вх}} \cdot k_{\text{ом(ол)}}}{2 \cdot j} \cdot \left[\frac{1}{p - j \cdot \Omega} \cdot \text{th} \frac{T \cdot (p - j \cdot \Omega)}{2} - \frac{1}{p + j \cdot \Omega} \cdot \text{th} \frac{T \cdot (p + j \cdot \Omega)}{2} \right], \quad (7)$$

где $k_{\text{вх}}$ – амплитуда входного синусоидального сигнала; Ω – угловая частота входного синусоидального сигнала; $k_{\text{ом(ол)}}$ – амплитуда несущего прямоугольного сигнала.

Многомерное же операторное изображение такого элемента определяется значительно проще:

$$X_{\text{вых}}(p_1, p_2) = X_{\text{вх}}(p_1) \cdot X_{\text{м(л)}}(p_2) = k_{\text{вх}} \cdot \frac{\Omega}{p_1^2 + \Omega^2} \cdot \frac{k_{\text{ом(ол)}}}{p_2} \cdot \text{th} \frac{T \cdot p_2}{2}, \quad (8)$$

где $X_{\text{вх}}(p_1) = k_{\text{вх}} \cdot \frac{\Omega}{p_1^2 + \Omega^2}$ – одномерное операторное изображение входного сигнала в P_1 -области; $X_{\text{м(л)}}(p_2) = \frac{k_{\text{ом(ол)}}}{p_2} \cdot \text{th} \frac{T \cdot p_2}{2}$ – одномерное операторное изображение несущего сигнала в P_2 -области.

В этом случае можно получить передаточную функцию множительного устройства

$$W_{\text{м(л)}}(p_2) = \frac{X_{\text{вых}}(p_1, p_2)}{X_{\text{вх}}(p_1)} = X_{\text{м(л)}}(p_2) = \frac{k_{\text{ом(ол)}}}{p_2} \cdot \text{th} \frac{T \cdot p_2}{2}, \quad (9)$$

что невозможно сделать при использовании одномерного интегрального преобразования из-за неявной зависимости изображения выходного сигнала от входного в выражении (7).

При анализе модулирующе-демодулирующих блоков установлено следующее:

- при использовании многомерно-временного операторного метода отпадает необходимость вычислять интеграл свертки для получения сигнала на выходе системы;

- многомерные изображения выходных сигналов рассмотренных трактов имеют аналитически замкнутый вид в отличие от одномерных изображений, которые не только сложны для анализа, но и при несущих сигналах модулятора (демодулятора) несинусоидальной (периодической) формы не имеют аналитически замкнутого вида;

- впервые для основных типовых элементов САУ с нелинейностями типа «произведение» получены многомерные передаточные функции. Одномерный структурно-операторный метод вообще не позволяет получить передаточные функции.

В четвертой главе представлены реализации многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления.

В результате впервые были получены многомерные передаточные функции измерительных, модулирующе-демодулирующих, усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение».

Покажем полученные структурные схемы исполнительных электродвигателей постоянного тока в многомерной операторной области (рисунки 2, 3). Их передаточные функции по каналу управления приведены в таблице 4.

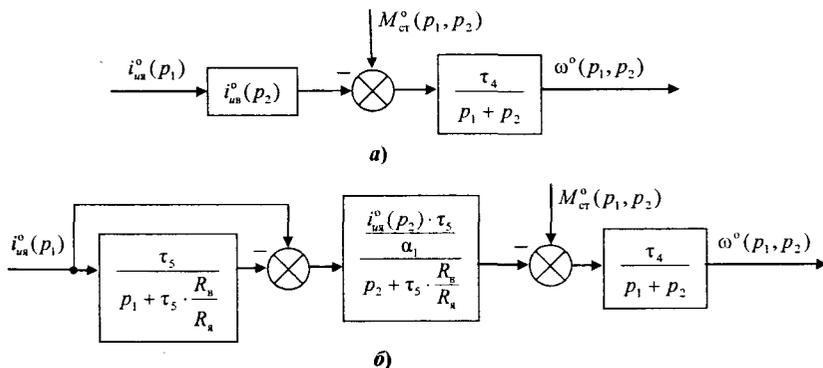


Рисунок 2 – Структурные схемы двигателя постоянного тока при питании от источника тока в двумерной операторной области: а – независимого и последовательного возбуждения; б – параллельного возбуждения

При этом использованы следующие обозначения:

– $i_{\text{я}}^{\circ}(p_1), M_{\text{ст}}^{\circ}(p_1, p_2), \omega^{\circ}$ – многомерно-временные операторные изображения задающего сигнала, статического момента, угловой скорости соответственно;

– $R_{\text{я}}, R_{\text{в}}$ – активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения электродвигателя соответственно;

– $T_{\text{я}}, T_{\text{в}}, T_{\text{мех}}, T_{\text{эм}}$ – абсолютные постоянные времени обмоток якоря, возбуждения, механическая, электромеханическая соответственно;

– $\alpha_1 = \frac{I_{\text{вN}}}{I_{\text{яN}}}, \alpha_2 = \frac{E_{\text{яN}}}{E_{\text{вN}}}, \lambda_1 = \frac{L_{\text{в}}}{L_{\text{я}}}$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров электродвигателей;

$$- \tau_1 = \frac{T_{\text{мех}}}{T_{\text{я}}}, \tau_2 = \frac{T_{\text{эм}}}{T_{\text{я}}}, \tau_3 = \frac{T_{\text{эм}}}{T_{\text{в}}}, \tau_4 = \frac{T_{\text{эм}}}{T_{\text{мех}}}, \tau_5 = \tau_2 \frac{1 + \tau_1}{\tau_1},$$

$\tau_6 = \frac{\tau_1}{1 + \lambda_1}, \tau_7 = \frac{\tau_2}{1 + \lambda_1} \cdot \left(1 + \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{я}}}\right)$ – относительные постоянные времени.

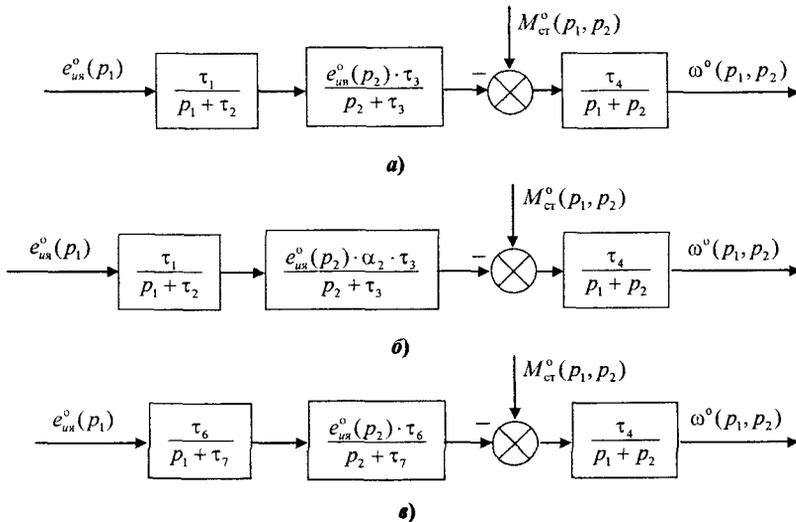


Рисунок 3 – Структурные схемы двигателя постоянного тока при питании от источника напряжения в двумерной операторной области: а – независимого возбуждения; б – параллельного возбуждения; в – последовательного возбуждения

Таблица 4 – Передаточные функции для многомерной операторной области различных типов двигателя постоянного тока

Тип электродвигателя	Передаточная функция в многомерной операторной области
ДПТ независимого возбуждения при питании от источника напряжения	$W_y(p_1, p_2) = \frac{\omega^o(p_1, p_2)}{e_{ин}^o(p_1)} =$ $= \frac{e_{ин}^o(p_2) \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4}{(p_1 + \tau_2) \cdot (p_2 + \tau_3) \cdot (p_1 + p_2)}$
ДПТ параллельного возбуждения при питании от источника напряжения	$W_y(p_1, p_2) = \frac{\omega^o(p_1, p_2)}{e_{ин}^o(p_1)} =$ $= \frac{e_{ин}^o(p_2) \cdot \tau_1 \cdot \alpha_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4}{(p_1 + \tau_2) \cdot (p_2 + \tau_3) \cdot (p_1 + p_2)}$
ДПТ последовательного возбуждения при питании от источника напряжения	$W_y(p_1, p_2) = \frac{\omega^o(p_1, p_2)}{e_{ин}^o(p_1)} =$ $= \frac{e_{ин}^o(p_2) \cdot \tau_2^o \cdot \tau_4}{(p_1 + \tau_7) \cdot (p_2 + \tau_7) \cdot (p_1 + p_2)}$
ДПТ независимого и последовательного возбуждения при питании от источника тока	$W_y(p_1, p_2) = \frac{\omega^o(p_1, p_2)}{i_{ин}^o(p_1)} = \frac{i_{ин}^o(p_2) \cdot \tau_4}{(p_1 + p_2)}$
ДПТ параллельного возбуждения при питании от источника тока	$W_y(p_1, p_2) = \frac{\omega^o(p_1, p_2)}{i_{ин}^o(p_1)} =$ $= \frac{\left(p_1 + \tau_5 \cdot \left(\frac{R_n}{R_a} - 1 \right) \right) \cdot \frac{i_{ин}^o(p_2) \cdot \tau_5 \cdot \tau_4}{\alpha_1}}{\left(p_1 + \tau_5 \cdot \frac{R_n}{R_a} \right) \cdot \left(p_2 + \tau_5 \cdot \frac{R_n}{R_a} \right) \cdot (p_1 + p_2)}$

Кроме представленных здесь структурных схем и передаточных функций в диссертационной работе получены многомерно-временные передаточные функции и структурные схемы двухфазного асинхронного электродвигателя с различными способами управления.

Для численного анализа элементов и систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение» многомерно-временным операторным методом было разработано программное обеспечение в среде MATLAB/SIMULINK.

Основой разработанного программного обеспечения является собственная библиотека из пяти универсальных блоков, описывающих все основные типы многомерно-временных динамических звеньев, при помощи которых можно численно моделировать элементы систем автоматического управления, имеющие нелинейности типа «произведение».

Полная адекватность программного обеспечения подтверждена при анализе типовой следящей системы путем сравнения результатов числен-

ного многомерного моделирования анализируемой системы с эталонным численным расчетом.

Результаты численного анализа следящей системы, проведенного для несущих частот $f_{1н} = 50$ Гц и $f_{2н} = 400$ Гц в виде графиков переходных процессов изменения углового перемещения, скорости при отработке следящей системой скачкообразного рассогласования $\theta = 5^\circ$ представлены на рисунках 4, 5 соответственно.

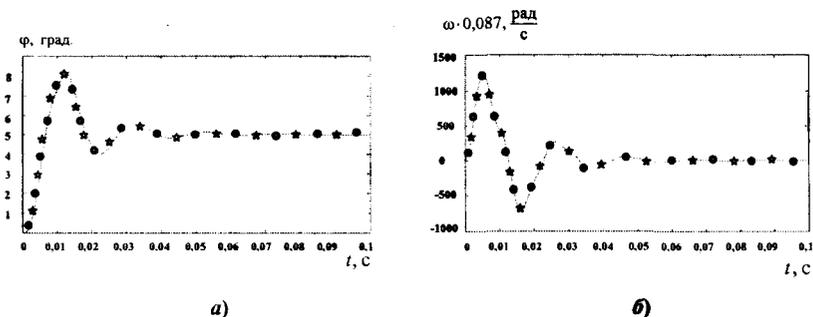


Рисунок 4 – Графики переходных процессов изменения: *a* – углового перемещения; *б* – скорости при отработке следящей системой скачкообразного рассогласования $\theta = 5^\circ$ на несущей частоте $f_{1н} = 50$ Гц

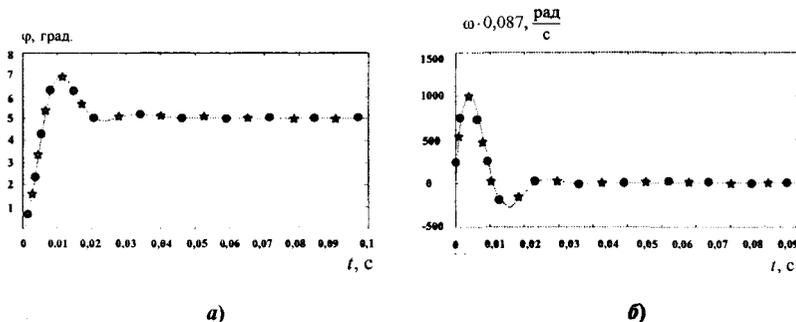


Рисунок 5 – Графики переходных процессов изменения: *a* – углового перемещения; *б* – скорости при отработке следящей системой скачкообразного рассогласования $\theta = 5^\circ$ на несущей частоте $f_{1н} = 400$ Гц

На графиках «звездочками» обозначены расчетные точки, полученные эталонным численным расчетом, а «кружками» - точки, полученные численным многомерным расчетом.

В приложениях представлены сводная таблица сравнительных одномерных и многомерных соотношений для множительных устройств, внешний вид структурных схем и диалоговых окон блоков, описывающих многомерно-временные динамические звенья, структурные схемы для численного моделирования следящей системы, полученные одномерным и многомерно-временным структурно-операторным методом, акты внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс учреждения образования «Белорусский национальный технический университет», учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», акт о полезности использования разработанного метода на Барановичском заводе автоматических линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы разработан новый многомерно-временной операторный метод анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение».

Это подтверждается следующими основными результатами, полученными в данной диссертационной работе.

1. Многомерное преобразование Лапласа интерполировано на произведение временных функций, что позволило получить теоретические основы многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение» [2-А].

2. Создан новый метод многомерно-временных динамических звеньев на основе многомерно-временного операторного преобразования, который по сравнению с операторно-частотным методом позволяет упростить и повысить точность анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение». На его базе впервые разработаны правила построения и преобразования многомерно-временных операторных структурных схем, являющиеся основой инженерных методик анализа и синтеза элементов систем управления с нелинейностями типа «произведение» [1-А], [5-А]-[8-А], [10-А], [12-А].

3. Впервые получены многомерно-временные передаточные функции и структурные схемы основных измерительных, модулирующе-демодулирующих, усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов систем автоматического управления, имеющих нелинейности типа «произведение» [3-А], [4-А], [7-А], [9-А].

4. Разработано новое программное обеспечение для численного использования многомерно-временного операторного метода, при помощи которого был проведен анализ модели следящей системы с трактом «сельсины-двухполупериодный синхронный демодулятор». При этом была удостоверена полная адекватность моделей многомерно-временных динамических звеньев традиционным динамическим звеньям [11-А], [13-А].

5. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс Барановичского завода автоматических линий. Внедрение в учебный процесс реализовано в ряде основных учреждений образования Республики Беларусь:

- в лекционный курс по дисциплине «Теория автоматического управления» Белорусского национального технического университета;

- в лекционный курс и в курс лабораторных работ по дисциплине «Теория и системы автоматического управления» учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»;

- в лекционный курс и курсовое проектирование по дисциплине «Теория автоматического управления» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»;

- изданы практическое руководство «Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза электрических цепей к расчету пассивных линейных электрических цепей» и практическое руководство к расчетно-графической работе «Расчет переходного процесса пуска двухфазного асинхронного электродвигателя» к разделу «Периодические несинусоидальные токи» курса «Теоретические основы электротехники» [14-А], [15-А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в журналах

1-А Луковников, В.И. Типовые многомерные динамические звенья / В.И. Луковников, А.В. Козлов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2000. - № 2. - С. 47-54.

2-А Козлов, А.В. Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза элементов САУ / А.В. Козлов // Вестн. ПТУ им. П.О. Сухого. - 2005. - № 4. - С. 37-48.

3-А Луковников, В.И. Адекватность моделей двухфазного асинхронного электродвигателя во временной, одномерно-операторной и многомерно-временной операторной областях / В.И. Луковников, А.В. Козлов // Вестн. Белорус-Рос. ун-та. - 2006. - № 3. - С. 119-127.

4-А Козлов, А.В. Многомерно-временные операторные модели электродвигателей постоянного тока / А.В. Козлов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006. - № 3. - С. 102-108.

Материалы конференций

5-А Козлов, А.В. Передаточные функции типовых активных многомерных динамических звеньев / А.В. Козлов // Сб. материалов республ. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвящ. 55-летию Победы в Великой Отечественной войне, Гомель, 10-12 мая 2000 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. - Гомель, 2000. - С. 117-118.

6-А Луковников, В.И. Передаточные функции типовых многомерных пассивных динамических звеньев / В.И. Луковников, А.В. Козлов // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 105 годовщине со дня рождения П.О. Сухого), Гомель, 5-7 июля 2000 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.С. Шагиняна. - Гомель, 2000. - Т. II. - С. 185-187.

7-А Козлов, А.В. Развитие многомерного операторного метода для анализа систем с обратными связями / А.В. Козлов, Д.Н. Комяков // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 105 годовщине со дня рождения П.О. Сухого), Гомель, 5-7 июля 2000 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.С. Шагиняна. - Гомель, 2000. - Т. II. - С. 182-184.

8-А Козлов, А.В. Многомерная операторная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя / А.В. Козлов, Д.Н. Комяков // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22-23 нояб. 2001 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; редкол.: Кудрин Б.И. [и др.]. - Гомель, 2001. - С. 103-104.

9-А Козлов, А.В. Применение многомерного операторного метода к исследованию структуры асинхронного двигателя / А.В. Козлов // Современные проблемы математики и вычислительной техники: материалы III республ. науч. конф. молодых ученых и студентов, Брест, 26-28 нояб. 2003 г. / Брест, гос. техн. ун-т; редкол.: В.С. Рубанов (отв. ред.) [и др.]. - Брест, 2003. - С. 61-64.

10-А Луковников, В.И. Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза элементов САУ / В.И. Луковников, А.В. Козлов // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6-8 июня 2006 г. / Бел. гос. техн. ун-т; редкол.: И.М. Жарский (отв. ред.) [и др.]. - Минск, 2006. - С. 92-94.

11-А Козлов, А.В. Реализация многомерно-временных динамических звеньев в системе MATLAB / А.В. Козлов // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6-8 июня 2006 г. / Бел. гос. техн. ун-т; редкол.: И.М. Жарский (отв. ред.) [и др.]. - Минск, 2006. - С. 214-217.

Тезисы докладов

12-А Козлов, А.В. Анализ многомерных звеньев с обратными связями / А.В. Козлов // НИРС-2003: тез. докл. VIII Республ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 9-10 дек. 2003 г. / Бел. нац. техн. ун-т; редкол.: А.В. Матюшко (отв. ред.) [и др]. - Минск, 2003. - С. 9.

13-А Козлов, А.В. Численное моделирование многомерно-временных динамических звеньев / А.В. Козлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому, Гомель, 19-20 окт. 2006 г. / А.И. Россол (отв. секретарь). - Гомель, 2006. - С. 100-101.

Учебно-методические материалы

14-А Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза электрических цепей: практ. рук. к разделу «Периодические несинусоидальные токи» курса «Теоретические основы электротехники» для студентов электротехн. специальностей / авт.-сост. А.В. Козлов. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2004. - Ч. 1: Пассивные линейные электрические цепи. - 30 с.

15-А Многомерно-временной операторный метод анализа и синтеза электрических цепей: практ. рук. к расчет.-граф. работе «Расчет переходного процесса пуска двухфазного асинхронного электродвигателя» по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. формы обучения / авт.-сост. А.В. Козлов. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. - 16 с.

РЕЗЮМЕ

Козлов Андрей Владимирович

Многомерно-временной операторный метод анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение»

Ключевые слова: элементы систем автоматического управления, нелинейности типа «произведение», многомерно-временной операторный метод анализа.

Цель работы - разработка многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение», а также программного обеспечения для его численной реализации.

Методы исследования. При разработке нового метода анализа использовались традиционные методы интегро-дифференциального и операционного исчислений, методы теории электропривода и автоматического управления. Численный анализ осуществлялся на основе современных математических пакетов программ и языков программирования на персональных ЭВМ. Адекватность полученных теоретических результатов подтверждалась путем аналитического и численного сравнения с теоретическими результатами применяемых на сегодняшний день методами (одномерно-операторного, методами дифференциального исчисления).

Полученные результаты и новизна. Впервые создан новый многомерно-временной операторный метод анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение», на основе которого получены новые передаточные функции и структурные схемы основных элементов, определены правила структурных преобразований, аналитические и численные методики перевода сигналов из временной в многомерно-временную области и обратно.

Метод внедрен в учебный процесс в УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», в Белорусском национальном техническом университете», в УО «Белорусский государственный технологический университет» и в производственный процесс Барановичского завода автоматических линий.

Область применения. Учреждения образования, организации и предприятия, занимающиеся разработкой элементов САУ с нелинейностями типа «произведение», например САУ на несущей переменного тока.

РЭЗЮМЭ

Казлоў Андрэй Уладзіміравіч

Мнагамерна-часовы аператарны метадаў аналізу элементаў сістэм аўтаматычнага кіравання з нелінейнасцямі тыпу «здабытак»

Ключавыя словы: элементы сістэм аўтаматычнага кіравання, нелінейнасці тыпу «здабытак», мнагамерна-часовы аператарны метадаў аналізу.

Мэта работы - распрацоўка мнагамерна-часовага аператарнага метадаў аналізу элементаў сістэм аўтаматычнага кіравання з нелінейнасцямі тыпу «здабытак», а таксама праграма забеспячэння для яго лікавай рэалізацыі.

Метады даследавання. Пры распрацоўцы новага метадаў аналізу выкарыстоўваліся традыцыйныя метады інтэгра-дыференцыяльнага і аперацыйнага вылічэння, метады тэорыі электрапрывода і аўтаматычнага кіравання. Лікавы аналіз здзяйсняўся на аснове сучасных матэматычных пакетаў праграм і моў праграмавання на персанальных ЭВМ. Адэкватнасць атрыманых тэарэтычных вынікаў пацвярджалася шляхам аналітычнага і лікавага параўнання з тэарэтычнымі вынікамі прымяняемых на сённяшні дзень метадаў (аднамерна-аператарнага, метадаў дыференцыяльнага вылічэння).

Атрыманыя вынікі і навізна. Упершыню створаны новы мнагамерна-часовы аператарны метадаў аналізу элементаў сістэм аўтаматычнага кіравання з нелінейнасцямі тыпу "здабытак", на аснове якога атрыманы новыя перадачныя функцыі і структурныя схемы асноўных элементаў, вызначаны правілы структурных пераўтварэнняў, аналітычныя і лікавыя метады перавода сігналаў з часовай у мнагамерна-часовую вобласць і назад.

Метадаў укаранен у вучэбны працэс ва УА «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт імя П. В. Сухого», у Беларускай нацыянальнай тэхнічнай універсітэце, ва УА «Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт» і ў вытворчы працэс Баранавіцкага завода аўтаматычных ліній.

Галіна прымянення. Установы адукацыі, арганізацыі і прадпрыемствы, якія займаюцца распрацоўкай элементаў САК з нелінейнасцямі тыпу «здабытак», напрыклад, САК на нясунай пераменнага току.

SUMMARY

Kozlov Andrei Vladimirovich

Multidimensional Timing Operator Analysis Method of the Elements of Automatic Control Systems with non-linearities of «Product»

Key words: elements of automatic control systems, non-linearities of «product», multidimensional timing operator analysis method.

The purpose of the research: the development of multidimensional timing operator analysis method of the elements of automatic control systems with non-linearities of «product» and software for its numerical realization.

Research procedures. In developing the new analysis method traditional methods integro-differential and operational calculus, electric drive methods and automatic control methods were used. Numerical analysis was based on the up-to-date mathematics software packages for PCs. The adequacy of the received theoretical results was proved by means of comparing analytical and numerical results with theoretical results of the methods used nowadays (one-dimensional operator, differential calculus methods).

The results obtained. For the first time multidimensional timing operator analysis method of the elements of automatic control systems with non-linearities of «product» was designed, on its basis the new transfer functions and structural schemes of basic elements were received, the rules of structural changes analytical and numerical methods of conversion the signals from one timing field to multidimensional fields and back were determined.

The method is introduced into education into EI «Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi», into Byelorussian National Technical University, in EI ((Byelorussian State Technological University» and into Baranovich automatic systems workshop industrial production.

The area of application. Education institutions, organizations and enterprises occupied in development of automatic control system elements with non-linearities of «product», for example automatic control systems on reference frequency alternating current.

Козлов
Андрей Владимирович

**МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННОЙ ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД
АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ
ТИПА «ПРОИЗВЕДЕНИЕ»**

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Редактор **Н. В. Гладкова**
Компьютерная верстка **Н. Б. Козловская**

Подписано в печать 13.04.07.
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ № /219/68.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».
ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.