

На правах рукописи

МИНЕВИЧ Татьяна Геннадьевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПЕРЕХОД-
НЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ЧАСТОТНО-
ЗАВИСИМЫМИ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Специальность 05.09.05 – теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном
Техническом Университете

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Коровкин Н.В.

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Смолвик С.В.
кандидат технических наук,
доцент Соловьева Е.Б.

Ведущая организация ОАО НПО по исследованию и
проектированию энергетического оборудо-
вания им. И.И. Ползунова

Защита состоится " ____ " _____ 2002 г. в ____ час. на заседании
Диссертационного Совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском
Государственном Техническом Университете по адресу: 195251,
Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главное здание, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2002 г.

Ученый
диссертационного
кандидат технических наук, доцент

секретарь
совета
Терешкин А.В.

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. При расчете переходных процессов в электрических цепях значительную трудность представляет учет частотной зависимости эквивалентных параметров электротехнических устройств. В то же время, для анализа широкого класса электромагнитных процессов учет этих зависимостей принципиально важен. Присутствие в электрических цепях электроэнергетических, электромеханических и электротехнических устройств с нелинейными свойствами приводит к необходимости решения задач в нелинейной постановке. Уточненный анализ процессов в таких системах требует одновременного учета частотной зависимости эквивалентных параметров и нелинейных свойств элементов электрических цепей. К задачам подобного типа относятся электромагнитная совместимость электротехнических устройств, проблемы создания и эксплуатации устройств преобразования электромагнитной энергии, проблемы проектирования релейных и других видов защитных элементов электротехнических устройств, исследование влияния электромагнитного импульса на энергосистемы и их элементы, задачи защиты систем связи и т.д. Значительное число работ, посвященных решению подобных проблем, свидетельствует об актуальности разработки методов анализа переходных и установившихся процессов в подобных системах. Основным подходом к расчету электрических цепей, эквивалентные параметры которых сложным образом зависят от частоты, в нелинейной постановке является построение схем замещения частотно-зависимых устройств методами структурного и параметрического синтеза и далее расчет методом дискретных резистивных (синтетических) схем. Эти методы получили развитие в работах Башарина Ю.А., Бутырина П.А., Бычкова Ю.А., Демирчяна К.С., Киншта Н.В., Коровкина Н.В., Короткова В.А., Кузнецова И.Ф., Кучумова Л.А., Миронова В.Г., Петренко А.И., Пухова Г.Е., Ройтгартца М.Б., Сигорского В.П., Сеницкого Л.А., Шакирова М.А., Юринова В.М., И.Влаха, А.М.Горовица, Пен Мин Лина, Л.О.Чуа и др. Методы структурного и параметрического синтеза позволяют определить структуры и параметры схемы замещения электро-

технического устройства по частотным характеристикам (ЧХ) путем решения нелинейных задач. Метод синтетических схем, используя решения задач структурного и параметрического синтеза, позволяет выполнить формирование математических моделей устройств и определение их параметров в рамках линейных процедур. Однако создание синтетических схем устройств, эквивалентные параметры которых сложным образом зависят от частоты, является недостаточно разработанным к настоящему времени. Поэтому актуальной является задача разработки новых методов построения синтетических схем непосредственно по ЧХ электротехнического устройства.

Цель работы и задача исследования. Целью настоящей работы является разработка и исследование синтетических схем элементов электрических цепей, обладающих сложными ЧХ, полученными экспериментально или расчетным путем, для анализа переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях или системах методом синтетических схем, а также выполнение расчетов цепей, содержащих одновременно нелинейные элементы и элементы, эквивалентные параметры которых сложным образом зависят от частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ и классификацию ЧХ электроэнергетических, электро-механических и электротехнических устройств;
- исследовать возможность получения синтетических схем частотно-зависимых элементов электрических цепей непосредственно по амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристикам без предварительного построения схемы замещения и определения ее параметров;
- разработать методы обоснованного выбора диапазона определения ЧХ электротехнических устройств и выработать рекомендации по дискретизации ЧХ, используемых при построении синтетических схем;
- исследовать возможность аппроксимации ЧХ при помощи кусочно-линейных функций, а также исследовать влияние точности задания ЧХ на результаты расчета процессов в электрических цепях с частотной зависимостью эквивалентных параметров;

- разработать метод, позволяющий исследовать переходные и установившиеся режимы в электрических цепях при произвольном воздействии;
- разработать методику получения синтетических схем электротехнического устройства непосредственно по экспериментальным АЧХ без экспериментального определения ФЧХ;
- разработать методику построения дискретных схем замещения по частотным зависимостям характеристик холостого хода и короткого замыкания.

Методика проведения исследования. Анализ переходных и установившихся процессов в электрических цепях с частотно-зависимыми эквивалентными параметрами, содержащих одновременно нелинейные элементы, и построение синтетических схем базируются на основных положениях теории линейных и нелинейных цепей, методах математической обработки экспериментальных данных, методах расчета переходных процессов в электрических цепях, неявных методах численного интегрирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны и исследованы принципы создания математических моделей (синтетических схем) электроэнергетических, электромеханических и электротехнических устройств, эквивалентные параметры которых зависят от частоты; показана возможность создания синтетических схем электрических цепей непосредственно по АЧХ; предложен новый подход, позволяющий использовать в расчете процессов в электрических цепях с частотно-зависимыми эквивалентными параметрами экспериментальные ЧХ;
- показана возможность, в рамках разработанного подхода, аналитического воспроизведения ФЧХ элементов электрических цепей по АЧХ при невозможности или сложности экспериментального определения ФЧХ;
- разработаны методы аппроксимации ЧХ электрических цепей кусочно-линейными функциями; получены и исследованы синтетические схемы для определения переходной и импульсной характеристик электрических устройств, а также для воспроизведения ФЧХ элементов электрических цепей по АЧХ.

Практическое значение работы заключается в:

- исследовании метода расчета электрических цепей, содержащих одно-

временно частотно-зависимые и нелинейный элементы; выработке рекомендаций по границам и величине частотного диапазона и степени дискретизации исходной ЧХ; исследовании устойчивости метода при использовании экспериментальных ЧХ;

- расчете переходных процессов в цепях защиты, автоматики и управления с низковольтными коммутационными устройствами при импульсных воздействиях;

- расчете процессов в длинных линиях при импульсных воздействиях;

- расчете процессов, протекающих в электросетях, содержащих дуговые печи с резко нелинейной вольтамперной характеристикой и компенсаторы реактивной мощности;

- расчете процессов в статорных обмотках криотурбогенератора при экспериментальном определении ЧХ холостого хода и короткого замыкания.

Апробация работы. Основное содержание работы было представлено на научно-технической конференции «Производство и передача электрической энергии» (Иваново, 1994г), на международном симпозиуме «Электромагнитная совместимость» (Цюрих, 1997 г), на международном симпозиуме «Электромагнитная совместимость» (Рим, 1998 г), на научных семинарах кафедры ТОЭ и в четырех печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Содержание изложено на 139 с., из них машинописного текста 123 с., включая рисунков 87 шт., таблиц 5 шт., библиографический список из 50 наименований - 5с., приложение – 11с.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели, формулируются основные задачи исследования.

В первой главе проведена классификация и анализ типичных ЧХ электротехнических, электроэнергетических и электромеханических устройств; исследована возможность использования в расчетах переходных и установившихся процессов в электрических цепях экспериментальных или теоретических

(полученных расчетным путем) ЧХ, показано, что при увеличении частотного диапазона существенно изменяется вид частотной характеристики. При выборе частотного диапазона следует учитывать как вид самой частотной характеристики электрической цепи, так и частотный спектр внешнего воздействия.

Выбор нижнего предела частотного диапазона обычно не вызывает трудностей. При аналитическом задании частотной характеристики выбирают частоту близкую к нулю. Для экспериментальной частотной характеристики выбор нижнего предела частотного диапазона связан с возможностями метрологического обеспечения и обычно составляет 20-30 Гц. Верхнее ограничение частотного диапазона вытекает из свойств ЧХ и может быть введено следующим образом:

$$\int_{\omega_s}^{\infty} |Y(j\omega) - Y(j\omega)|_{\infty}| \cdot d\omega / \int_{\omega_0}^{\omega_s} |Y(j\omega)| \cdot d\omega < \varepsilon,$$

где $Y(j\omega)$ - АЧХ, ω_0 и ω_s - минимальная и максимальная частоты, ε - допустимая погрешность расчета. Использование такого ограничения базируется на основном допущении, принятом в работе: зависимость $Y(j\omega)$ при $\omega \longrightarrow \infty$ можно принять равной некоторой постоянной величине. Поэтому выбор ω_s зависит от скорости процессов, протекающих в исследуемой цепи. Чем более быстрые процессы должны быть исследованы, тем более широкий частотный диапазон должен быть рассмотрен, тем большим должно быть выбрано значение ω_s .

Обычным подходом к учету зависимости параметров элементов электрических цепей от частоты при расчете переходных процессов является построение эквивалентных схем замещения, что предполагает два этапа: синтез структуры схемы замещения и определение ее параметров. Проблема синтеза структуры эквивалентной схемы замещения может быть решена при наличии аналитически заданной ЧХ, причем эта задача неоднозначная даже в простейших случаях. К недостаткам последующей численной реализации такого подхода можно отнести бесконечное число звеньев в построенной схеме замещения. При невозможности получения аналитической ЧХ и необходимости использо-

вать в расчетах ЧХ, полученную экспериментально, задача синтеза структуры схемы замещения существенно усложняется. Учитывая многообразие видов ЧХ электротехнических устройств, для каждого устройства необходимо синтезировать собственную структуру схемы замещения, что требует специальных исследований.

Отдельной задачей является проблема определения параметров эквивалентной схемы замещения. Эта задача всегда нелинейная, даже в случае, когда элементы эквивалентной схемы замещения линейны. Задачу определения параметров схемы замещения частотно-зависимого объекта электрической цепи можно рассматривать как задачу нелинейного программирования следующего вида:

$$\sqrt{\int_{\omega_0}^{\omega_s} [G(\omega, \mathbf{P}) - Q(\omega)]^2 d\omega} \xrightarrow{\mathbf{P} \in \mathbf{B}} \min, \quad (1)$$

где $Q(\omega)$ и $G(\omega, \mathbf{P})$ - экспериментально определенная ЧХ исследуемого объекта и ЧХ схемы замещения; \mathbf{P} - вектор варьируемых параметров схемы замещения; \mathbf{B} - область ограничений, определяющая приемлемость полученного результата. Решить проблему параметрического синтеза, то есть найти глобальный минимум задачи (1), удастся не всегда. Поэтому весьма важна разработка расчетного метода, который позволял бы исключить этап структурного и параметрического синтеза эквивалентной схемы замещения электротехнического устройства.

В главе приведен обзор методов расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях с частотно-зависимыми эквивалентными параметрами, на основании которого обоснована целесообразность использования метода синтетических схем, развиваемого в последнее время в работах П.А.Бутырина, К.С.Демирчяна, Н.В.Коровкина, В.Г.Миронова, А.И.Петренко, Л.А.Синицкого. Преимуществом метода синтетических схем является возможность учитывать в расчетах переходных процессов ЧХ исследуемых устройств, не налагая ограничений на линейность задачи и не требуя сложного аппарата формирования системы уравнений. Под синтетической схемой понимают эквивалентную электрическую схему, состоящую из сопротивлений (проводимо-

стей) и источников напряжения (тока), которая синтезирует топологию и типы элементов исходной электрической схемы с методами численного интегрирования. Полученная в результате этого синтетическая схема представляет собой схему постоянного тока в G - J или R - E параметрах. В работе представлен подход к получению дискретной модели частотно-зависимого устройства в G - J параметрах. Вид синтетической схемы определяется формулой $\mathbf{i}_{n+1} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}_{n+1} + \mathbf{J}$, где \mathbf{G} – матрица эквивалентных проводимостей, \mathbf{J} – вектор источников тока, \mathbf{i}_{n+1} , \mathbf{u}_{n+1} – вектора соответственно токов и напряжений в момент времени $n+1$.

Как уже отмечалось, весьма актуальны задачи построения синтетической схемы частотно-зависимого устройства непосредственно по его ЧХ, минуя этап построения эквивалентной схемы замещения, а также построение синтетической схемы непосредственно по АЧХ без экспериментального определения ФЧХ. Эти задачи рассматриваются далее в диссертационной работе.

Во второй главе изложена методика построения синтетических схем частотно-зависимых элементов электрических цепей для расчета процессов во временной области.

Использование при исследованиях процессов в электротехнических устройствах и электроэнергетических системах ЧХ требует аппроксимации исходных зависимостей. В главе обосновано применение для этой цели кусочно-линейных операторов. Аппроксимация при помощи кусочно-линейных операторов позволяет получить наиболее простые расчетные зависимости. Алгебраический непрерывный кусочно-линейный оператор имеет вид: $Y_R(\omega) = b_0 + \beta_0 \cdot \omega + \sum_{\nu=1}^s \beta_\nu \cdot |\omega - \omega_\nu|$, где $\omega_\nu, \nu = \overline{1, s}$ – узлы кусочно-линейного оператора (значения частоты, в которых измерена или рассчитана ЧХ), $b_0, \beta_\nu, \nu = \overline{1, s}$ – параметры оператора. В работе показаны различные способы определения параметров кусочно-линейных операторов. На основании свойств ЧХ рассмотрены и доказаны следующие свойства кусочно-линейных операторов, используемые в дальнейшем для построения синтетических схем частотно-зависимых элементов электрических цепей:

$$Y'_R(\omega_s) = \beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v = 0, \quad Y'_R(0) = \beta_0 - \sum_{v=1}^s \beta_v = 2 \cdot \beta_0,$$

$$Y_R(\omega_s) = b_0 - \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \omega_v, \quad Y_R(0) = b_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \omega_v.$$

Используя связь между переходной и комплексной проводимостями двухполюсника $y(t) = 2/\pi \cdot \int_0^{\omega_s} \text{Re}[Y(j\omega)] \cdot \sin(\omega \cdot t) / \omega \cdot d\omega$ и представив

$\text{Re}[Y(j\omega)]$ в виде: $\text{Re}[Y(j\omega)] = b_0 + \beta_0 \cdot \omega + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot |\omega - \omega_v|$, получим для

переходной и импульсной проводимостей частотно-зависимого объекта

$$y(t) = \text{Re}[Y(j\omega_s)] + 4/(\pi \cdot t) \cdot \left(\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \cos(\omega_v \cdot t) \right) +$$

$$4/\pi \cdot \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \omega_v \cdot \text{Si}(\omega_v \cdot t)$$

$$y'(t) = \text{Re}[Y(j\omega_s)] \cdot \delta(t) - 4/(\pi \cdot t^2) \cdot \left(\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \cos(\omega_v \cdot t) \right).$$

Откуда на основе интеграла Дюамеля: $i(t) = u(0) \cdot y(t) + \int_0^t y(t-x) \cdot u'(x) \cdot dx$

могут быть получены параметры синтетической схемы непосредственно по ЧХ, аппроксимированной при помощи кусочно-линейного оператора:

$$G = \text{Re}[Y(j\omega_s)] + h/\pi \cdot \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \omega_v^2,$$

$$J_{n+1} = -2/(\pi \cdot h) \left(\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cos(\omega_v h) \right) \cdot u_n -$$

$$\int_0^{nh} 4/(\pi \cdot (t_{n+1} - x)^2) \left[\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cos(\omega_v (t_{n+1} - x)) \right] \cdot u(x) dx.$$

Непосредственное использование этих соотношений неэффективно, так как требует вычисления интеграла типа свертки, численная реализация которого весьма трудоемка, поскольку на каждом n -ном шаге требуется заново вычислять интеграл по всему диапазону интегрирования и хранить ($n \cdot n$) переменных: величины напряжений и значения импульсных проводимостей для каждого частотно-зависимого объекта, для каждого пройденного момента времени. Упростить вычисление интеграла не удастся из-за наличия в подынтегральном выражении функции $1/(t-x)^2$, которая не может быть представлена в виде произведения функций, зависящих от t и x отдельно. Таким свойством обладает экспоненциальная функция, то есть: $e^{t-x} = e^t \cdot e^{-x}$. Поэтому в работе вы-

полнена аппроксимация функции $1/(t-x)^2$ в виде суммы экспонент:

$$1/(t-x)^2 = \sum_{k=1}^p A_k \cdot e^{\alpha_k(t-x)} = \sum_{k=1}^p A_k \cdot e^{\alpha_k t} \cdot e^{-\alpha_k x}.$$

Коэффициенты A_k и α_k определяются при решении задачи нелинейного программирования, аналогичной задаче (1):

$$1/T \cdot \int_1^T \left(1/t^2 - \sum_{k=1}^p A_k \cdot e^{\alpha_k t} \right)^2 dt \xrightarrow{A_k, \alpha_k} \min$$

Следует заметить, что данная задача решается однократно, и во всех дальнейших расчетах можно пользоваться полученными в работе значениями коэффициентов A_k и α_k , в отличие от задачи параметрического синтеза, которая решается заново для очередной частотной характеристики. В работе приведен метод определения начальных приближений. Выделение показательных функций основано на решении обыкновенного дифференциального уравнения, которое может быть представлено в виде линейной комбинации показательных функций. На рисунке 1 приведена погрешность аппроксимации функции $1/(t-x)^2$ суммой экспонент, которая не превышает тысячных долей процента на всем интервале изменения значений t .

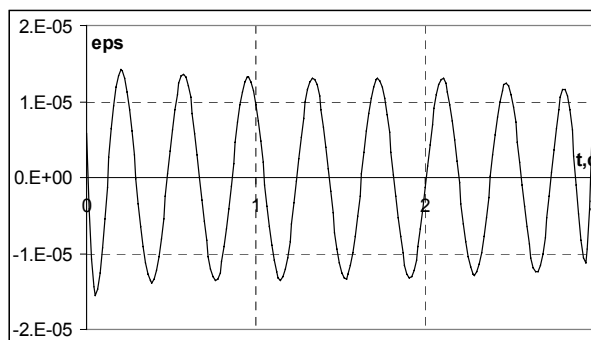


Рис. 1.

Результаты расчета коэффициентов A_k и α_k приведены в таблице:

k	1	2	3	4	5
A_k	12.6845	1.9902	0.3375	$8.8774 \cdot 10^{-3}$	$9.8897 \cdot 10^{-3}$
α_k	-3.6913	-1.4979	-0.6181	-24.9880	-0.1058
k	6	7	8	9	10
A_k	$5.7703 \cdot 10^{-2}$	$1.6979 \cdot 10^{-3}$	$2.9194 \cdot 10^{-2}$	$4.8318 \cdot 10^{-5}$	$5.4759 \cdot 10^{-6}$
α_k	0.2557	$4.3762 \cdot 10^{-2}$	$1.7828 \cdot 10^{-2}$	$6.6971 \cdot 10^{-3}$	$1.7640 \cdot 10^{-3}$

Расчет коэффициентов проводился в предположении, что шаг расчета $h = 1$; чтобы применить полученную аппроксимацию при любом шаге расчета, следует выполнить пересчет: $A_k|_h = A_k|_{h=1}/h^2$, $\alpha_k|_h = \alpha_k|_{h=1}/h$.

С учетом использования аппроксимации функции $1/(t-x)^2$ в виде суммы экспонент получены следующие соотношения для определения параметров дискретной модели:

$$\begin{aligned}
 G &= \operatorname{Re}(Y(j \cdot \omega_s)) + h/\pi \cdot \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \omega_v^2 \\
 J_{n+1} &= -4/(\pi \cdot h^2) \cdot (\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \cos(\omega_v h)) - \\
 &4/\pi \cdot \beta_0 \cdot \sum_{k=1}^{10} A_k \cdot e^{\alpha_k \cdot t_{n+1}} \int_0^{n \cdot h} e^{\alpha_k \cdot x} \cdot u(x) \cdot dx - \\
 &4/\pi \sum_{k=1}^{10} A_k \cdot e^{\alpha_k \cdot t_{n+1}} \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \cos(\omega_v t_{n+1}) \cdot \int_0^{n \cdot h} e^{\alpha_k \cdot x} \cdot \cos(\omega_v x) \cdot u(x) \cdot dx - \\
 &4/\pi \sum_{k=1}^{10} A_k \cdot e^{\alpha_k \cdot t_{n+1}} \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \sin(\omega_v t_{n+1}) \cdot \int_0^{n \cdot h} e^{\alpha_k \cdot x} \cdot \sin(\omega_v x) \cdot u(x) \cdot dx
 \end{aligned}$$

Эти соотношения позволяют определить параметры синтетической схемы замещения частотно-зависимого устройства без вычисления интеграла типа свертки, но на каждом шаге расчета необходимо заново интегрировать при новом верхнем пределе. В классической постановке метода синтетических схем величина источника тока дискретной модели зависит только от значения на предыдущем шаге. Поэтому для более рационального вычисления параметра J дискретной модели в работе получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 J_{n+1} &= -4/(\pi \cdot h^2) \cdot (\beta_0 + \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot \cos(\omega_v h)) - 4/\pi \cdot \beta_0 \cdot \sum_{k=1}^{10} A_k \cdot e^{2\alpha_k h} \cdot B_n^{(k)} - \\
 &4/\pi \sum_{k=1}^{10} A_k \cdot e^{2\alpha_k h} \sum_{v=1}^s \beta_v \cdot (C_n^{(k,v)} \cdot \cos(\omega_v n h) + S_n^{(k,v)} \cdot \sin(\omega_v n h)) \\
 \text{где } B_n^{(k)} &= e^{\alpha_k h} B_{n-1}^{(k)} + h/2 \cdot (u_n + e^{\alpha_k h} \cdot u_{n-1}), \\
 C_n^{(k,v)} &= e^{\alpha_k h} C_{n-1}^{(k,v)} + h/2 \cdot (\cos(\omega_v n h) \cdot u_n + e^{\alpha_k h} \cdot \cos(\omega_v (n-1)h) \cdot u_{n-1}), \\
 S_n^{(k,v)} &= e^{\alpha_k h} S_{n-1}^{(k,v)} + h/2 \cdot (\sin(\omega_v n h) \cdot u_n + e^{\alpha_k h} \cdot \sin(\omega_v (n-1)h) \cdot u_{n-1}),
 \end{aligned}$$

которые позволяют вычислять значение источника тока J_{n+1} синтетической схемы непосредственно по величине расчетного шага и значениям напряжения синтетической схемы для двух предыдущих моментов времени, что дает возможность избежать хранения большого объема дополнительной информации.

Эти зависимости целесообразно использовать при расчете длительных процессов, требующих большого числа точек интегрирования.

В главе рассмотрен расчет переходных процессов в электрических цепях с распределенными параметрами. Приведены результаты расчетов переходных процессов в однородной линии, возникающих при подключении длинной линии к источнику в двух вариантах: без учета и с учетом поверхностного эффекта. Показано, что предложенный метод эффективен при расчете процессов в таких системах.

Приведены синтетические схемы для анализа процессов в цепях с четырехполюсниками, полученные с использованием матрицы A -параметров четырехполюсника. Показана возможность расчета переходных и установившихся процессов в электрических цепях, содержащих четырехполюсники по предлагаемой в работе методике.

В работе получены соотношения для восстановления ФЧХ электрической цепи по АЧХ, на основе соотношения:

$$B(\omega_c) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_s} \frac{dA(\omega)}{d\omega} \cdot \ln \left| \frac{\omega + \omega_c}{\omega - \omega_c} \right| d\omega, \text{ где } A(\omega) = \ln \left(\frac{y(\omega)}{y_b} \right) \text{ или } A(\omega) = \ln \left(\frac{z(\omega)}{z_b} \right),$$

$B(\omega) = -\varphi(\omega)$ или $B(\omega) = \varphi(\omega)$ соответственно; $y_b(z_b)$ - значение проводимости (сопротивления) объекта на некоторой базовой частоте. В качестве базовой частоты обычно принято выбирать нулевую или резонансную частоты так, чтобы значения проводимости (сопротивления) были отличны от нуля и бесконечности. Выполним кусочно-линейную аппроксимацию действительной части функции цепи $A(\omega)$ при помощи кусочно-линейного оператора:

$$A(\omega) = a_0 + \gamma_0 \cdot \omega + \sum_{v=1}^{v=s} \gamma_v \cdot |\omega - \omega_v|,$$

тогда окончательное выражение для определения ФЧХ в узлах аппроксимации:

$$B(\omega_c) = -\frac{2}{\pi} \left\{ \omega_v \gamma_v \ln 4 + \sum_{v=1}^s \gamma_v \left(\omega_v \ln \left| \frac{\omega_v + \omega_c}{\omega_v - \omega_c} \right| + \omega_s \ln \left| \frac{\omega_v^2 - \omega_c^2}{\omega_c^2} \right| \right) \right\}$$

В работе приведены результаты восстановления ФЧХ по АЧХ для обмотки реле. АЧХ, полученная в результате эксперимента, приведена на рисунке

2, результаты расчета ФЧХ приведены на рисунке 3.

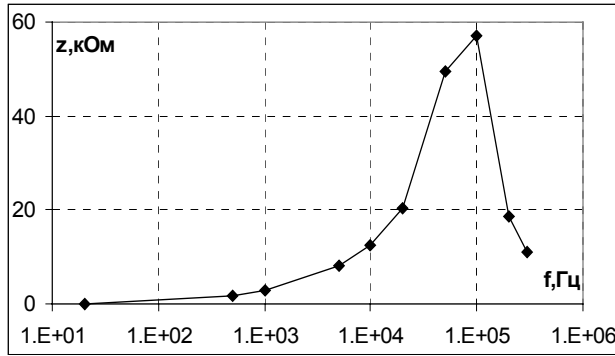


Рис. 2.

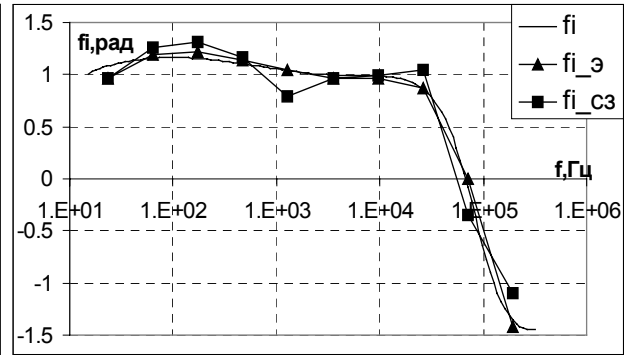


Рис. 3.

ФЧХ реле ($f_{i_э}$) получена в результате эксперимента. ФЧХ реле ($f_{i_сз}$) рассчитана по эквивалентной схеме замещения. ФЧХ реле (f_i) рассчитана по приведенной в диссертационной работе методике. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о значительно лучшем совпадении экспериментальной кривой и кривой, полученной по методике, приведенной в диссертационной работе. Погрешность определения ФЧХ реле не превышает 2% против 15% при использовании схемы замещения.

В третьей главе исследуется погрешность предлагаемого метода от дискретизации частотной характеристики, шага интегрирования и погрешности воспроизведения частотной зависимости. Показано, что число точек аппроксимации исходной частотной характеристики зависит от ее вида и должно быть выбрано в диапазоне $N=25-50$ для монотонных характеристик, когда интегральная погрешность расчета процессов в электрических цепях не превышает 1%. Для достижения аналогичной точности результата при расчете по характеристикам, содержащим экстремумы, важным является точное воспроизведение резонансных частот $N=100-500$.

Для оценки шага интегрирования по методу трапеции в работе получена следующая зависимость: $h < \sqrt{12 \cdot \varepsilon / (T_{\max} \cdot M'')}$, где T_{\max} - максимальное расчетное время, ε - допустимая погрешность аппроксимации,

$$M'' = 4/\pi \cdot E(2 \cdot \omega \cdot S_1 + (\psi(N+1) + C) \cdot S_2 - \omega^2 \cdot N^2 \cdot S_0),$$

где E - напряжение источника э.д.с в анализируемой цепи, ω - частота воздействия (при постоянном напряжении ω принимается равной ω_0), C - константа

Эйлера, $S_p = \sum_{k=1}^{10} A_k \alpha_k^p$, при $p=0,1,2$, $\psi(N+1) = \Gamma'(N+1)/\Gamma(N+1)$, где Γ - гамма функция.

Оценка влияния точности аппроксимации частотной характеристики проведена с помощью фрактального анализа. Показано, что величина погрешности расчета не превышает величины погрешности получения частотной характеристики, что говорит о высокой устойчивости метода.

В четвертой главе рассмотрен анализ переходных процессов в электротехнических системах и устройствах на базе предложенной в диссертационной работе методики.

Рассмотрены процессы, возникающие в устройстве, представленном на рисунке 4, при импульсном воздействии, приведенном на рисунке 5.

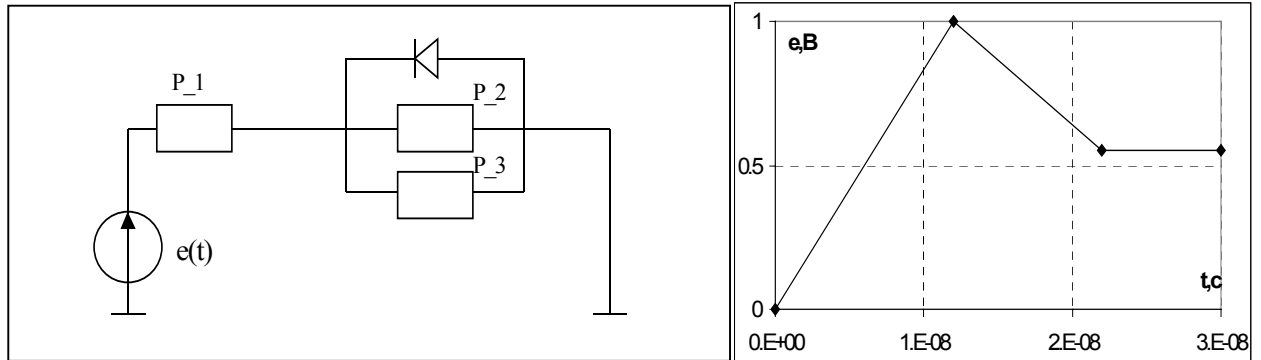


Рис. 4.

Рис. 5.

В качестве исходных данных о релейных элементах P_1 , P_2 , P_3 и соединительных проводах устройства (рис.4) были приняты их экспериментальные АЧХ ($Y_{Pk}(\omega)$, $k=1,2,3$, Y_{np}) и ФЧХ ($\varphi_{Pk}(\omega)$, $k=1,2,3$, φ_{np}), полученные на анализаторе WAYNE KEER. Наличие в исследуемой цепи диода требовало решения задачи в нелинейной постановке. Экспериментальные и расчетные постоянные времени, полученные в результате анализа переходных процессов для каждого частотно-зависимого элемента, совпадают. Результаты расчетов тока в реле 1 и напряжения на реле 2 приведены на рисунке 6.

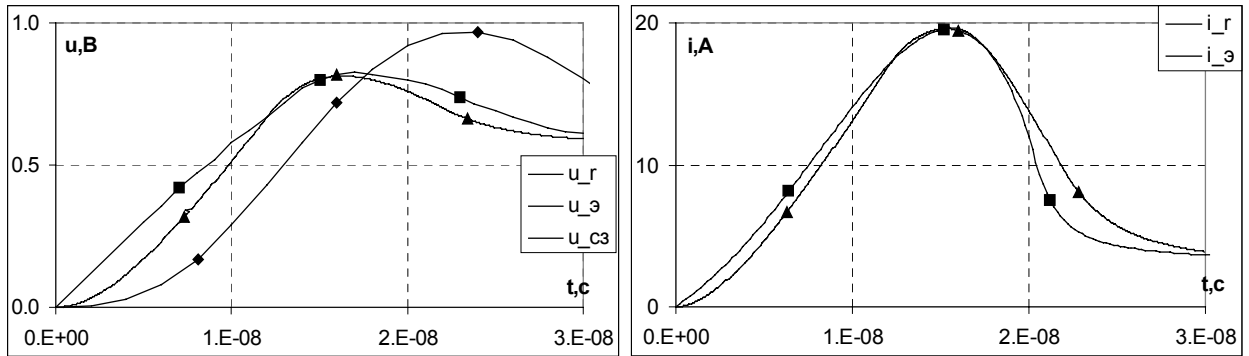


Рис. 6.

Анализируя приведенные на рисунке 6 зависимости, можно сделать вывод о совпадении экспериментальной ($u_э$) кривой и кривой, рассчитанной по предлагаемому в работе методу (u_r): значения максимумов кривых практически совпадают, интегральная погрешность не превышает 4.5%; то же время напряжение, рассчитанное с помощью эквивалентных схем замещения обмоток реле ($u_{сз}$), значительно отличается от экспериментального: погрешность составляет 20%, максимумы кривых $u_э$ и $u_{сз}$ различны и по величине и по времени их проявления.

В главе рассмотрен расчет процессов в энергосистеме с дуговой печью, схема которой приведена на рисунке 7 (1-подстанция, 2-шина, 3-конденсаторная батарея, 4-дуговая печь).

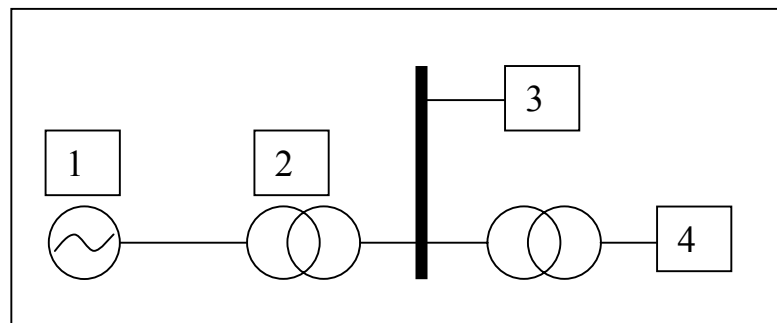


Рис. 7.

ЧХ элементов этой энергосистемы (трансформаторов, кабелей, конденсаторной батареи) заданы эмпирическими зависимостями. Нелинейный элемент (дуговая печь) моделировался в соответствии с вольтамперной характеристикой. Приведены результаты расчетов переходных и установившихся процессов в энергосистеме. Результаты расчетов токов и напряжений на батарее конденсаторов и нелинейной нагрузке (дуговой печи), при подключении исследуемой системы к

источнику синусоидальной э.д.с. приведены на рисунке 8.

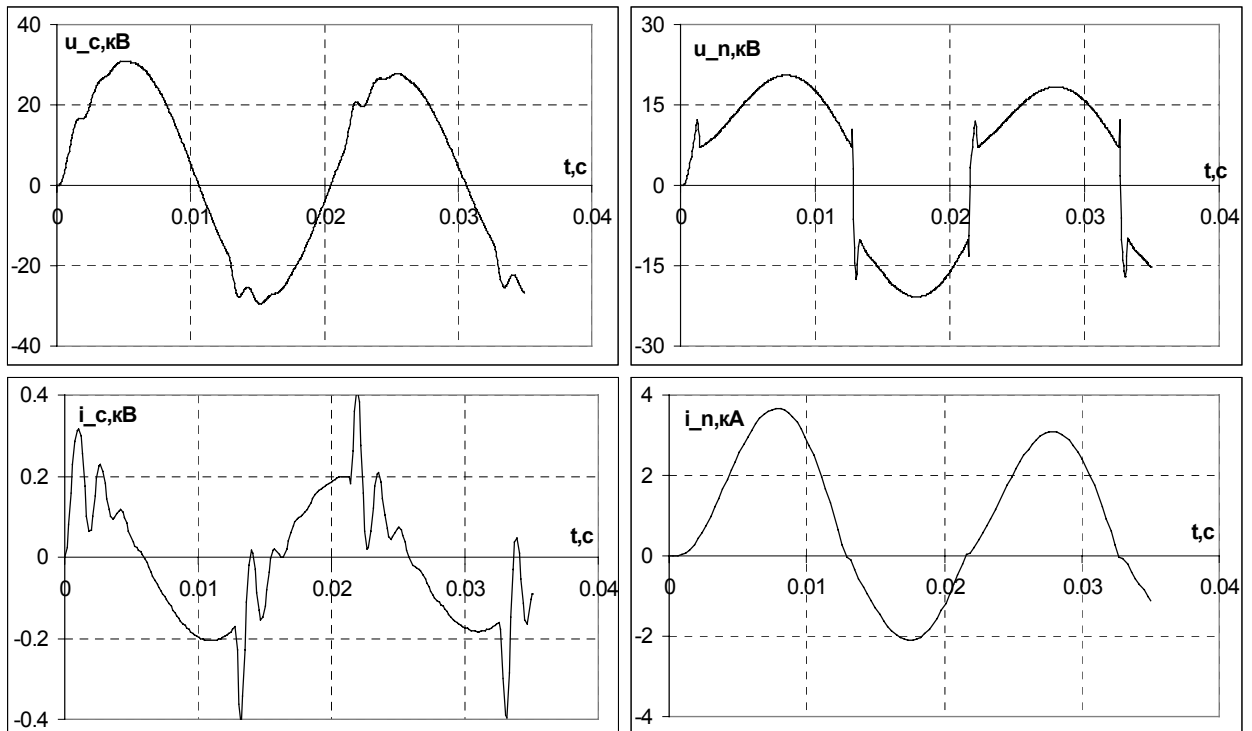


Рис. 8.

Частотный спектр тока батареи конденсаторов, полученный по рассчитанной зависимости, хорошо согласуется с данными, определенными в процессе эксплуатации энергосистемы.

В главе рассмотрены процессы в обмотках криотурбогенератора, АЧХ и ФЧХ которых в режимах холостого хода и короткого замыкания получены посредством эксперимента. Приведены расчеты переходных и установившихся процессов в обмотках.

В приложении приведены тексты расчетных программ.

В заключении приведены основные результаты работы.

Основные результаты работы.

1. Разработана методика расчета переходных и установившихся процессов в электрических цепях, содержащих одновременно нелинейные элементы и элементы, ЧХ которых сложным образом зависят от частоты, на основе метода синтетических схем.
2. Разработаны и исследованы математические модели (синтетические схемы) электрических цепей для определения переходных и импульсных характе-

ристик электрических устройств, а также для воспроизведения ФЧХ элементов электрических цепей по АЧХ.

3. Выработаны рекомендации по границам частотного диапазона и степени дискретизации исходной ЧХ; исследована устойчивость метода, при использовании экспериментальных ЧХ; приведены зависимости для определения оптимального расчетного шага.
4. Разработана и исследована методика построения дискретных схем замещения по частотным зависимостям характеристик холостого хода и короткого замыкания для четырехполюсников.
5. Рассчитаны переходные и установившиеся процессы в длинных линиях и релейных цепях при импульсных воздействиях, в электросетях, содержащих дуговые печи с резко нелинейной вольтамперной характеристикой, в статорных обмотках криотурбогенератора.

По материалам диссертации опубликованы работы:

1. Коровкин Н.В., Миневи́ч Т.Г. Синтетические схемы устройств с частотно-зависимыми эквивалентными параметрами. – В сб. Расчет электромагнитных полей, характеристик и процессов электромеханических преобразователей. – Оренбург: ОГТУ, 1995.- 102-111 с.
2. Коровкин Н.В., Миневи́ч Т.Г. Анализ цепей с частотно-зависимыми эквивалентными параметрами. – С-Пб.: СПбГТУ, 1995. – 32 с. – Деп. в ВИНТИ 28.03.95 № 834-B95.
3. N.V. Korovkin, T.G. Minevich, E.E. Selina. Calculation of transients in nonlinear systems consisting of elements described by the frequency responses. / 12 th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, pp. 52-56.
4. N.V. Korovkin, L.A. Kuchumov, T.G. Minevich, A.C. Novitskiy, E.E. Selina. The analysis of harmonics in nonlinear electric power networks including the elements with frequency dependent parameters. / International Symposium on Electromagnetic Compatibility, September 14-18, 1998, Rome – Italy, pp.96-99.