

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(ФГАОУ ВО СПбПУ)

Бодренков Евгений Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ
СЕТЯМИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ АКТУАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЭС**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург - 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в высшей школе высоковольтной энергетики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович,
профессор высшей школы высоковольтной энергетики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты: кандидат технических наук, доцент
Чудный Владимир Сергеевич
доцент высшей школы электроэнергетических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
доктор технических наук, доцент
Силин Николай Витальевич
заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Активное развитие электросетевого комплекса предполагает решение ряда задач в различных отраслях её работы. Современным трендом совершенствования этапов проектирования, реновации и эксплуатации объектов электроэнергетики является создание адекватных моделей математической интерпретации электрических процессов. Повышение качества моделирования требует учёта связности параметров всего производственного цикла, снижения вычислительных и временных ресурсов, необходимых для расчёта, при увеличении требований к точности результата.

Новые методы оценки состояния и управления параметрами активно-адаптивных электроэнергетических систем позволят найти наилучшие места внедрения гибких систем электропередачи и устройств распределённой генерации, рассчитать оптимальные параметры этих элементов, обеспечить наилучшие технико-экономические показатели. Аналитические выражения контролируемых параметров открывают дополнительный интерес для анализа. В таких выражениях исключена связность расчётных величин, функционал представлен только изменяемыми параметрами. К этим выражениям применимы известные методы исследования функций, доступна визуальная интерпретация результатов, снижен объём вычислений.

Отсутствие оснащения средствами телеизмерений для большинства современных электросетей оставляет актуальной задачу контроля электропотребления. Получение точных аналитических зависимостей между напряжениями узлов и нагрузками, а так же параметрами силовых линий, повысит качество расчёта и оптимизации режимов ЭЭС. Актуальные значения узловых мощностей необходимы при планировании ремонтных работ, снижения потребления энергоресурсов, индикации хищения мощности в сети.

В области потребления электроэнергии актуальной остаётся задача определения нелинейности безынерционных элементов. Такими компонентами представлена значительная доля нагрузки, оснащено современное силовое оборудование. Для современной энергетики нерешённой остаётся задача восстановления ВАХ активно-резистивных элементов. Обеспечение точности расчёта в цепи с асимптотическим поведением кривой позволит получить адекватную расчётную модель схемы. Нерешённой остаётся и задача определения нелинейности тока в RL и RC цепях. Задача актуальна для моделирования процессов в цепях с разгруженными трансформаторами, дросселями, сегнетоэлектриках. С целью контроля качества поставляемой электроэнергии важно решить задачу идентификации состава многокомпонентной нелинейной нагрузки. Необходимым требованием к решению является не только обнаружение нелинейных компонентов, но и их количества.

Цель работы - разработать методы управления активно-адаптивными электрическими сетями, обеспечить достаточность математических моделей и конкурентоспособность предлагаемых решений, подтвердить эффективность практического применения разработанных методов.

Поставленная цель дифференцирована следующими задачами:

1. Получить аналитическое решение системы баланса узловых мощностей для электросетей простейших структур. Намечить пути применения результатов для решения задачи в сетях с произвольной структурой.

2. Разработать метод расчёта узловых нагрузок в распределительной электросети без внедрения дополнительного оборудования. Привести исходную нелинейную задачу к линейному виду.

3. Реализовать способ расчёта вольт-амперных характеристик нелинейных безынерционных элементов. Обеспечить наилучшую точность воспроизведения кривой.

4. Разработать метод определения параметров нелинейных RL и RC цепей. Получить адекватную модель исследования цепей при их работе в установившемся режиме.

5. Разработать способ идентификации состава многоэлементной нелинейной нагрузки. Расширить подход до возможности определения количества нелинейных компонентов.

Научная новизна основных результатов работы:

1. Использован аналитический подход к решению задачи оценки состояния электросети. Полученные решения позволяют комплексно управлять параметрами схемы. Обоснован так же алгоритм проведения структурного улучшения схемы электроснабжения.

2. Получены аналитические зависимости узловых напряжений и узловых нагрузок распределительной электросети. Результат достигнут за счёт использования значений узлового напряжения, полученных в разных состояниях схемы. Подход позволил привести нелинейную задачу к линейному виду и решить её аналитически.

3. Для реализованного способа восстановления ВАХ доказана эффективность применения для моделей с асимптотическим поведением кривой.

4. Разработан алгоритм измерения нелинейности тока в RL и RC цепях. Доказана эффективность работы метода при исследовании цепи в установившемся режиме. Рассмотрена чувствительность метода к объёму экспериментальных данных.

5. Изложен метод идентификации и определения состава нелинейной нагрузки. Получены достоверные расчёты при апробации метода на модели, содержащей линейную и нелинейные нагрузки с известными ВАХ. Даны заключения о чувствительности метода к помехам в измерении тока, числу экспериментальных данных, учёту гармонического состава входного тока.

Теоретическая значимость работы:

Теоретические выкладки представленной работы в аналитическом подходе к решению поставленных задач, приведении исходных нелинейных уравнений к линейному виду, проработанном комплексном подходе к анализу нелинейных безынерционных элементов.

Практическая ценность работы:

Полученные результаты могут использовать электросетевые организации для повышения эффективности работы электросетей, контроля несанкционированных подключений к схеме электроснабжения, идентификации состава нелинейных компонентов, расчёта нелинейности цепей.

Методология и методы исследования. В работе использованы следующие методы исследования: теория нелинейных электрических цепей, элементы теории матриц, комбинаторного анализа и математической логики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложен новый метод оценки актуального состояния ЭЭС, основанный на аналитическом решении уравнений баланса узловых мощностей. Получены решения для электрических сетей простейших структур. Намечены пути для расширения решения задачи в сложнозамкнутых сетях.

2. Разработан оригинальный способ расчёта электрических нагрузок. Анализ результатов апробации показал, что достаточными данными для решения являются параметры актуальной сети и параметры режима источника питания. Выполнено приведение исходной нелинейной задачи к линейной.

3. Изложен метод расчёта ВАХ нелинейных безынерционных элементов. Доказана адекватность расчётной модели в областях асимптотического поведения кривой.

4. Предложен способ расчёта параметров нелинейных активно-реактивных цепей. Математические модели построены по экспериментальным данным, осциллограммам тока и напряжения, достоверность модели подтверждает расчёт абсолютной и относительной погрешности.

5. Разработан метод идентификации состава многоэлементной нелинейной нагрузки. По измерениям в одном узле метод позволяет фиксировать подключение конкретных устройств в составе нагрузки, либо существенное изменение режима их работы без установки датчиков у каждого устройства.

Достоверность результатов подтверждается аналитическим решением поставленных задач, выполненных в сертифицированной системе компьютерной алгебры Maple; для отдельных результатов исследования воссозданы лабораторные условия работы цепей в программной среде NI Multisim, подтверждено совпадение теоретических и экспериментальных результатов; для

другой части исследования проведено сопоставление результатов, полученных разными методиками расчёта.

Апробация и внедрение результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: кафедральных научных семинарах СПбПУ; X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии северного Кавказа», г. Грозный, 14-18 октября 2020 г.; конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники 2021 ElConRus, 26-29 января 2021 г.; международной научной электроэнергетической конференции ISEPC 2021, 17-19 мая 2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ. 8 изданы на английском языке в изданиях из перечня Scopus, 2 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, содержащего 126 наименований. Работа изложена на 120 страницах печатного текста, содержит 30 рисунков, 24 таблицы, 46 формул, 126 литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована научная новизна представленной работы, изложены научные положения, выносимые на защиту, сформулирована теоретическая и практическая значимости работы, представлены количество публикаций и конференций по основным результатам представленного исследования.

В **первой главе** обоснована актуальность выбранных направлений исследования, изложена цель работы, поставлены задачи. Проведён литературный обзор современных способов решения поставленных задач, рассмотрены достоинства и недостатки каждого метода, предложены варианты целесообразного решения задач. Выбраны модели для апробации разработанных решений, изучены возможности передовых пакетов программирования.

Во **второй главе** разработаны новые способы оценки состояния и управления активно-адаптивными электрическими сетями. Для исследования режимной оптимизации к рассмотрению приняты схемы с двумя узлами нагрузки радиальной (а), магистральной (б) и кольцевой структуры (в).

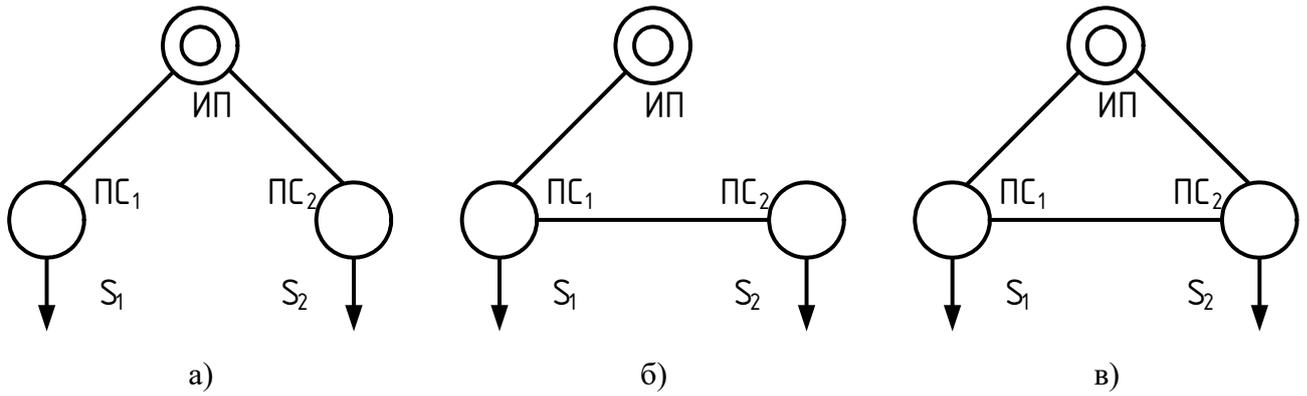


Рис. 1

Математическая модель установившегося режима электроэнергосистемы (ЭЭС) представлена уравнением:

$$\dot{\mathbf{Y}}\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{J}}, \quad \dot{\mathbf{U}}_D \hat{\mathbf{J}} = \dot{\mathbf{S}}, \quad \dot{\mathbf{U}}_D \equiv \text{diag} \{ \dot{\mathbf{U}} \}, \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{Y}}$ - матрица узловых проводимостей системы, включающая проводимости линий, соединяющих нагрузки; $\dot{\mathbf{U}}$ - вектор напряжений узлов; $\dot{\mathbf{J}}$ - вектор источников электромагнитной энергии; $\dot{\mathbf{S}}$ - вектор нагрузок; « $\hat{}$ » - символ сопряжения.

Решение (1) предполагает расчёт элементов вектора $\dot{\mathbf{U}}$ при известных $\dot{\mathbf{J}}$, $\dot{\mathbf{S}}$, $\dot{\mathbf{Y}}$. Для каждой из рассматриваемых схем требуется получить аналитическое решение (1) относительно модуля и фазы узловых напряжений.

В схеме рис. 1 (а) $\dot{\mathbf{Y}}$ представлена только элементами главной диагонали, тогда в каждом уравнении системы (1) неизвестными будут модуль U_i и фаза φ_{U_i} одного узлового напряжения $i = \overline{1,2}$. Введём в рассмотрение известные коэффициенты: $Y_{i,i}, J_i, S_i$ - модули соответственно узловой проводимости, тока головного участка, узловой нагрузки, $\varphi_{Y_{i,i}}, \varphi_{J_i}, \varphi_{S_i}$ - их фазы. Введём так же коэффициенты:

$$k_1 = 2Y_{i,i}S_i \cos(\varphi_{Y_{i,i}} - \varphi_{S_i}),$$

$$k_2 = \sqrt{J_i^2 + 2Y_{i,i}^2 S_i^2 (\cos(2(\varphi_{Y_{i,i}} - \varphi_{S_i})) - 1) / J_i^2 - 4Y_{i,i}S_i \cos(\varphi_{Y_{i,i}} - \varphi_{S_i})}$$

Тогда решение (1) представляется в компактной форме:

$$U_i = \frac{\sqrt{J_i^2 - k_1 + J_i k_2}}{\sqrt{2Y_{i,i}}} \quad (2)$$

$$\varphi_{U_i} = -\pi - \varphi_{J_i} + \arcsin \left[\frac{\sin(\varphi_{Y_{i,i}})(k_2 + J_i) + S_i Y_{i,i} (\sin(\varphi_{S_i}) - \sin(2\varphi_{Y_{i,i}} - \varphi_{S_i})) / J_i}{\sqrt{2} \sqrt{J_i^2 - k_1 + J_i k_2}} \right] \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) позволяют рассчитать узловые напряжения и их фазы для схемы радиальной конфигурации при известных параметрах сети. Эти выражения справедливы как для схемы с двумя независимыми узлами, так и для схемы с любым количеством узлов.

В математической модели схемы рис. 1 (б) введена замена: $\dot{\delta} = \dot{U}_1^{-1} \dot{U}_2$. Тогда δ и φ_δ соответственно модуль и фаза $\dot{\delta}$. Применяя замену, исключим из системы (1) комплекс второго узлового напряжения, выразим и подставим в уравнения последовательно U_1 , δ , φ_{U_1} . В результате получим одно уравнение относительно φ_δ , которое с учётом коэффициентов $f = \overline{1,5}$:

$$f_1 \sin 4\varphi_\delta - f_2 \cos 4\varphi_\delta + f_3 \sin 2\varphi_\delta - f_4 \cos 2\varphi_\delta + f_5 = 0 \quad (4)$$

Коэффициенты f в свою очередь представлены параметрами:

$$\begin{aligned} f_1 &= S_{1,2}^{1-2} Y_{1,2}^4 \sin(\varphi_{Y_{1,2}} + \varphi_{Y_{2,2}} + \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2}) \\ f_2 &= S_{1,2}^{1-2} Y_{1,2}^4 \cos(\varphi_{Y_{1,2}} + \varphi_{Y_{2,2}} + \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2}) \\ f_3 &= S_{1,2}^{1-2} Y_{1,1} Y_{1,2}^2 Y_{2,2} \sin(\varphi_{Y_{1,1}} + \varphi_{Y_{1,2}} + \varphi_{Y_{2,2}} + \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2}) \\ f_4 &= S_{1,2}^{1-2} Y_{1,1} Y_{1,2}^2 Y_{2,2} \cos(\varphi_{Y_{1,1}} + \varphi_{Y_{1,2}} + \varphi_{Y_{2,2}} + \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2}) \\ f_5 &= S_{1,2}^{1-2} Y_{1,1}^{0-2} Y_{1,2}^{2-4} Y_{2,2}^{0-2} \cos(\varphi_{Y_{1,1}} + \varphi_{Y_{1,2}} + \varphi_{Y_{2,2}} + \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2}) \end{aligned}$$

Решение для φ_δ позволяет восстановить последовательно коэффициенты φ_{U_1} , δ , U_1 , и, следовательно, U_2 и φ_{U_2} .

При решении (1) схемы рис. 1 (в) в математической модели выражены и подставлены в уравнение последовательно U_2 , φ_{U_2} , φ_{U_1} . Введена замена: $U_1^2 = Usq_1$. В итоге получено выражение (5). Аналогичным образом выражены и подставлены параметры U_1 , φ_{U_1} , φ_{U_2} . Введена замена: $U_2^2 = Usq_2$. Получено выражение (6).

$$Usq_1^6 k_{1,12} + Usq_1^5 k_{1,10} + Usq_1^4 k_{1,8} + Usq_1^3 k_{1,6} + Usq_1^2 k_{1,4} + Usq_1 k_{1,2} + k_{1,0} = 0 \quad (5)$$

$$Usq_2^6 k_{2,12} + Usq_2^5 k_{2,10} + Usq_2^4 k_{2,8} + Usq_2^3 k_{2,6} + Usq_2^2 k_{2,4} + Usq_2 k_{2,2} + k_{2,0} = 0 \quad (6)$$

Полиномиальные коэффициенты $k_{1,m}$ и $k_{2,m}$ $m = \overline{0,2,4,6,8,10,12}$ представлены:

$$\begin{aligned} k_{1,12} &= (Z_{1-3}^4 b_1^2)(2Z_{1-3}^3 b_1)(Z_{1-3}^4 b_{1-2}^2 + 2Z_{1-3}^3 b_{1-2} + Z_{1-3}^2); & k_{2,12} &= (Z_{1-3}^4 b_2^2)(2Z_{1-3}^3 b_2)(Z_{1-3}^4 b_{1-2}^2 + 2Z_{1-3}^3 b_{1-2} + Z_{1-3}^2); \\ k_{1,10} &= S_{1-2} Z_{1-3}^9 b_{1-2}^2; & k_{2,10} &= S_{1-2} Z_{1-3}^9 b_{1-2}^2; \\ k_{1,8} &= S_{1-2}^2 Z_{1-3}^9 b_{1-2}; & k_{2,8} &= S_{1-2}^2 Z_{1-3}^9 b_{1-2}; \\ k_{1,6} &= S_{1-2}^3 Z_{1-3}^{11} b_{1-2}^2; & k_{2,6} &= S_{1-2}^3 Z_{1-3}^{11} b_{1-2}^2; \\ k_{1,4} &= Z_1^2 S_1^2 (S_{1-2}^2 Z_{1-3}^9 b_{1-2}); & k_{2,4} &= Z_2^2 S_2^2 (S_{1-2}^2 Z_{1-3}^9 b_{1-2}); \\ k_{1,2} &= Z_1^4 Z_3^2 S_1^4 (S_{1-2} Z_{1-3}^7 b_{1-2}^2); & k_{2,2} &= -Z_2^4 Z_3^2 S_2^4 (S_{1-2} Z_{1-3}^7 b_{1-2}^2); \\ k_{1,0} &= Z_1^6 Z_3^6 S_1^6 (Z_{2-3}^4 b_2^2 + 2Z_{2-3}^2 b_2 + Z_{2-3}^2). & k_{2,0} &= Z_2^6 Z_3^6 S_2^6 (Z_{2-3}^4 b_2^2 + 2Z_{2-3}^2 b_2 + Z_{2-3}^2). \end{aligned}$$

Выражения (5) и (6) позволяют подобрать оптимальные значения изменяемых параметров для достижения желаемых значений U_1 и U_2 , оценить возможности различных мероприятий по снижению суммарных потерь ΔP . На рис. 2 представлены зависимости U_1 , U_2 (красная и синяя поверхности), ΔP (зелёная поверхность) при изменении реактансов силовых линий X_1, X_2 и мощностей устройств компенсации Q_1, Q_2 .

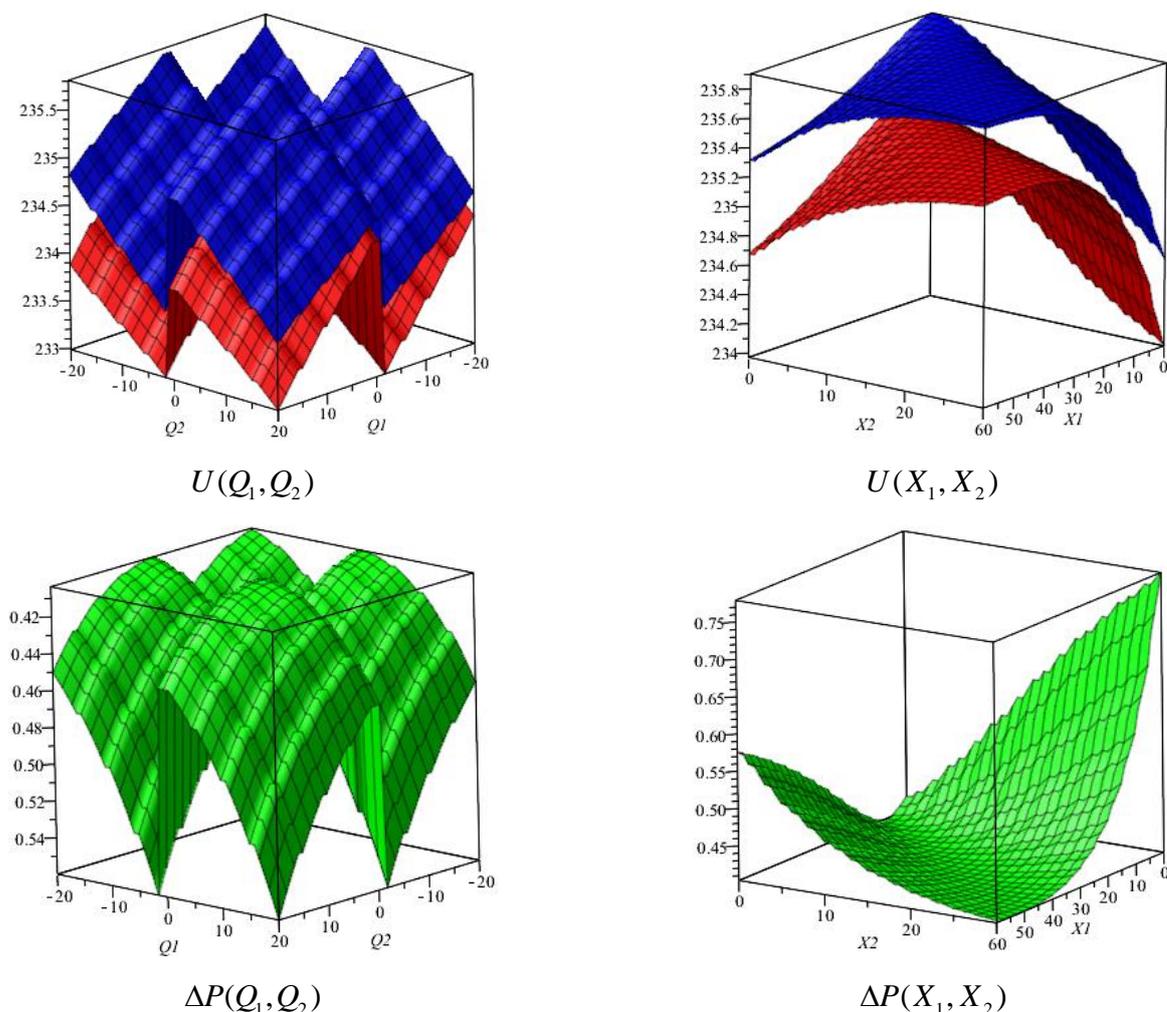


Рис. 2

Для проведения структурной оптимизации электросети применён генетический алгоритм, способный решать поставленную задачу за оперативное время. Изменяемыми параметрами выступают состояния линий электропередачи, которые могут быть в положении: 1 - включена, 2 - отключена, 3 - разомкнута в конце, 4 - разомкнута в начале. В случае решения данной задачи перебором число возможных состояний сети рассчитывается по формуле:

$$N_{BF} = 4^n, \quad (7)$$

где n - число ветвей, состояние которых можно изменять.

Проведено улучшение схем 35 кВ и 10 кВ по критерию суммарных потерь. Параметры работы алгоритма приведены соответственно в табл. 1 и табл. 2.

Табл. 1 $N_{GA} = 77$, $N_{BF} = 16384$

Номер поколения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ΔP_{\min} , МВт	2.097	2.097	1.241	2.097	1.232	1.236	1E+6	1.232	1.232	1.236	1.236
Число мутирующих генов	7	7	7	6	6	5	4	3	2	1	0

Табл. 2 $N_{GA} = 140$, $N_{BF} = 1048576$

Номер поколения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔP_{\min} , МВт	7.5	8.3	1E+6	2E+6	2E+6	6.1	6.1	1E+6	6.1	6.1	6.1	7.5	7.5	6.1
Число мутирующих генов	10	9	8	7	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0

Применение ГА позволило сократить полный перебор для сети 10 кВ $N_{BF}/N_{GA} \approx 220$ раз, для сети 35 кВ $N_{BF}/N_{GA} \approx 7500$ раз.

Третья глава посвящена задаче контроля потребления электроэнергии. В поставленной задаче необходимо определить узловые нагрузки, располагая значениями реактансов силовых линий и параметрами источника питания. Исследуемая модель представлена схемой рис. 3.

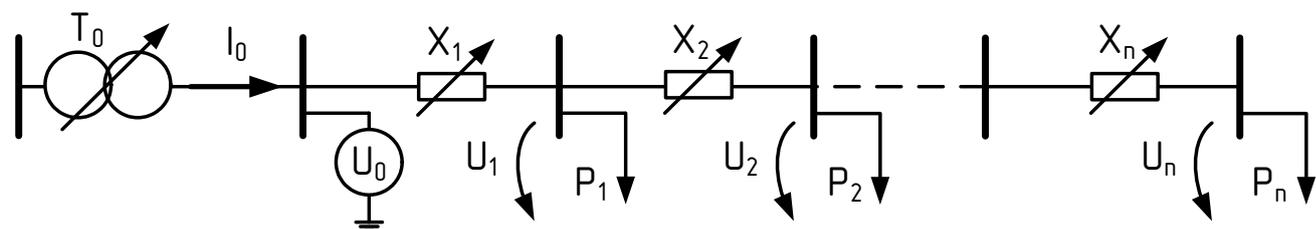


Рис. 3

В системе (1) для отдельного состояния неизвестными величинами являются \dot{S} и \dot{U} , система не определена. Изменим состояние сети. В новой системе \dot{S} останется неизменным, изменится вектор узловых напряжений. Для каждого состояния найдём:

$$U_{1,k} = I_{0,k} Z_{1,k} \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где k - номер состояния схемы; n - число состояний.

Таким образом, для каждого состояния удастся исключить одну неизвестную величину. Объединение систем балансовых уравнений при различных состояниях позволит полностью определить систему - рост числа состояний увеличивает число уравнений, компоненты \dot{S} неизменны для каждого состояния, при этом в каждом из состояний k $U_{1,k}$ будет известен.

Проведём расчёт нагрузок для схемы с двумя нагрузочными узлами. Зададим три состояния схемы, параметры которой приведены на рис. 3. Для получения аналитических связей между напряжениями узлов и мощностями нагрузок представим исходные данные в символьной форме.

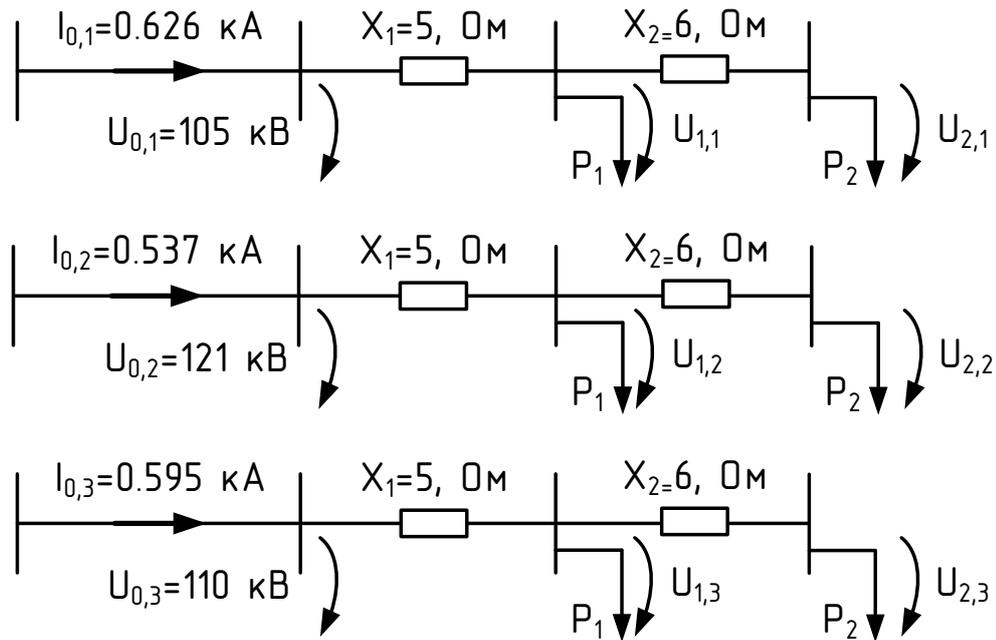


Рис. 4

Объединённая система балансовых уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1,1} \left(\frac{11}{30} U_{1,1} - \frac{1}{6} U_{2,1} - \frac{1}{5} U_1 \right) + P_1 = 0, \\ U_{2,1} \left(-\frac{1}{6} U_{1,1} + \frac{1}{6} U_{2,1} \right) + P_2 = 0, \\ U_{1,2} \left(\frac{11}{30} U_{1,2} - \frac{1}{6} U_{2,2} - \frac{1}{5} U_2 \right) + P_1 = 0, \\ U_{2,2} \left(-\frac{1}{6} U_{1,2} + \frac{1}{6} U_{2,2} \right) + P_2 = 0, \\ U_{1,3} \left(\frac{11}{30} U_{1,3} - \frac{1}{6} U_{2,3} - \frac{1}{5} U_3 \right) + P_1 = 0, \\ U_{2,3} \left(-\frac{1}{6} U_{1,3} + \frac{1}{6} U_{2,3} \right) + P_2 = 0. \end{array} \right. \quad (9)$$

Искомые величины выделены жирным начертанием. Преобразуем (9). Выразим из первого уравнения $U_{2,1}$, результат подставим во второе. Аналогичные действия проведём для остальных пар. Сгруппируем уравнения при P :

$$\begin{cases} 150P_1^2 + P_1(85U_{1,1}^2 - 60U_1U_{1,1}) + P_225U_{1,1}^2 + 6U_1^2U_{1,1}^2 - 17U_1U_{1,1}^3 + 11U_{1,1}^4 = 0, \\ 150P_1^2 + P_1(85U_{1,2}^2 - 60U_2U_{1,2}) + P_225U_{1,2}^2 + 6U_2^2U_{1,2}^2 - 17U_2U_{1,2}^3 + 11U_{1,2}^4 = 0, \\ 150P_1^2 + P_1(85U_{1,3}^2 - 60U_3U_{1,3}) + P_225U_{1,3}^2 + 6U_3^2U_{1,3}^2 - 17U_3U_{1,3}^3 + 11U_{1,3}^4 = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Система (10) нелинейна. Неизвестные каждого многочлена: $P_1^2, P_1, P_2, 1$. Систему (10) можно привести к линейной форме, выполнив ход Гаусса. Зададим матрицу коэффициентов \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 150 & 85U_{1,1}^2 - 60U_1U_{1,1} & 25U_{1,1}^2 & 6U_1^2U_{1,1}^2 - 17U_1U_{1,1}^3 + 11U_{1,1}^4 \\ 150 & 85U_{1,2}^2 - 60U_2U_{1,2} & 25U_{1,2}^2 & 6U_2^2U_{1,2}^2 - 17U_2U_{1,2}^3 + 11U_{1,2}^4 \\ 150 & 85U_{1,3}^2 - 60U_3U_{1,3} & 25U_{1,3}^2 & 6U_3^2U_{1,3}^2 - 17U_3U_{1,3}^3 + 11U_{1,3}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_{1,1} & b'_{1,2} & b'_{1,3} & b'_{1,4} \\ b'_{2,1} & b'_{2,2} & b'_{2,3} & b'_{2,4} \\ b'_{3,1} & b'_{3,2} & b'_{3,3} & b'_{3,4} \end{bmatrix}$$

Выполним ход Гаусса:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} b'_{1,1} & b'_{1,2} & b'_{1,3} & b'_{1,4} \\ 0 & \frac{b'_{1,1}b'_{2,2} - b'_{2,1}b'_{1,2}}{b'_{1,1}} & \frac{b'_{2,3}b'_{1,1} - b'_{2,1}b'_{1,3}}{b'_{1,1}} & \frac{b'_{2,4}b'_{1,1} - b'_{2,1}b'_{1,4}}{b'_{1,1}} \\ 0 & 0 & g_{3,3} & g_{3,4} \end{bmatrix},$$

$$\text{где: } g_{3,3} = \frac{b'_{1,1}(b'_{2,2}b'_{3,3} - b'_{2,3}b'_{3,2}) + b'_{1,2}(b'_{2,3}b'_{3,1} - b'_{2,1}b'_{3,3}) + b'_{1,3}(b'_{2,1}b'_{3,2} - b'_{2,2}b'_{3,1})}{b'_{2,2}b'_{1,1} - b'_{2,1}b'_{1,2}},$$

$$g_{3,4} = \frac{b'_{1,1}(b'_{2,2}b'_{3,4} - b'_{2,4}b'_{3,2}) + b'_{1,2}(b'_{2,4}b'_{3,1} - b'_{2,1}b'_{3,4}) + b'_{1,4}(b'_{2,1}b'_{3,2} - b'_{2,2}b'_{3,1})}{b'_{2,2}b'_{1,1} - b'_{2,1}b'_{1,2}}.$$

Получим систему уравнений, умножив \mathbf{G} на вектор полиномиальных коэффициентов:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \begin{pmatrix} P_1^2 \\ P_1 \\ P_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Результат представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} b'_{1,1}P_1^2 + b'_{1,2}P_1 + b'_{1,3}P_2 + b'_{1,4} = 0 \\ \frac{b'_{1,1}^2 - b'_{1,2}b'_{2,1}}{b'_{1,1}}P_1 + \frac{b'_{1,1}b'_{2,3} - b'_{2,1}b'_{1,3}}{b'_{1,1}}P_2 + \frac{b'_{1,1}b'_{2,4} - b'_{2,1}b'_{1,4}}{b'_{1,1}} = 0 \\ g_{3,3}P_2 + g_{3,4} = 0 \end{cases}$$

Уравнения 2 и 3 полученной системы линейны, решение которых:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{b'_{1,1}(b'_{2,3}b'_{3,4} - b'_{2,4}b'_{3,3}) - b'_{1,3}(b'_{2,1}b'_{3,4} + b'_{2,4}b'_{3,1}) + b'_{1,4}(b'_{2,1}b'_{3,3} - b'_{2,3}b'_{3,1})}{b'_{1,1}(b'_{2,2}b'_{3,3} - b'_{2,3}b'_{3,2}) - b'_{1,2}(b'_{2,1}b'_{3,3} + b'_{2,3}b'_{3,1}) + b'_{1,3}(b'_{2,1}b'_{3,2} - b'_{2,2}b'_{3,1})}, \\ P_2 = -\frac{b'_{1,1}(b'_{2,2}b'_{3,4} - b'_{2,4}b'_{3,2}) - b'_{1,2}(b'_{2,1}b'_{3,4} - b'_{2,4}b'_{3,1}) + b'_{1,4}(b'_{2,1}b'_{3,2} - b'_{2,2}b'_{3,1})}{b'_{1,1}(b'_{2,2}b'_{3,3} - b'_{2,3}b'_{3,2}) - b'_{1,2}(b'_{2,1}b'_{3,3} + b'_{2,3}b'_{3,1}) + b'_{1,3}(b'_{2,1}b'_{3,2} - b'_{2,2}b'_{3,1})}. \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, из нелинейной системы уравнений (10) определены аналитические выражения для P_1 и P_2 . Далее из первого, третьего и пятого уравнений системы (9) получим аналитические выражения для напряжений:

$$\begin{cases} U_{2,1} = \frac{1}{5} \frac{30P_1 - 6U_1U_{1,1} + 11U_{1,1}^2}{U_{1,1}} = \frac{6}{U_{1,1}} P_1 - \frac{6U_1}{5} + \frac{11U_{1,1}}{5}, \\ U_{2,2} = \frac{1}{5} \frac{30P_1 - 6U_2U_{1,2} + 11U_{1,2}^2}{U_{1,2}} = \frac{6}{U_{1,2}} P_1 - \frac{6U_2}{5} + \frac{11U_{1,2}}{5}, \\ U_{2,3} = \frac{1}{5} \frac{30P_1 - 6U_3U_{1,3} + 11U_{1,3}^2}{U_{1,3}} = \frac{6}{U_{1,3}} P_1 - \frac{6U_3}{5} + \frac{11U_{1,3}}{5}. \end{cases} \quad (13)$$

Уравнения (12)-(13) дают искомую аналитическую связь между мощностями нагрузок и напряжениями сети. По аналогии можно получить аналитические зависимости для схемы с любым количеством потребителей.

В первой части главы 3 рассматривается задача восстановления ВАХ нелинейных безынерционных элементов по амплитудному спектру кривой тока. Аппроксимирующая функция тока задана уравнением:

$$i = \frac{a_0 + \sum_{n=1}^{n=N} a_n u^n}{1 + \sum_{m=1}^{m=M} b_m u^m}, \quad (14)$$

где i и u - ток и напряжение исследуемого элемента; a_n, b_m $n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$ - коэффициенты многочленов числителя и знаменателя, которые являются искомыми величинами в представленном подходе.

Пусть кривые $i(t), u(t)$ измерены и разложены в ряд Фурье. Подставляя выражения для $i(t), u(t)$ в (14), выполняя переход от степеней тригонометрических функций к кратным углам, и приравнивая слагаемые с синусами и косинусами с одинаковыми $k\omega t$, получаем систему уравнений для определения коэффициентов a_n, b_m $n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$. Система уравнений для $N = 2, M = 1, N_I = 3, N_U = 2, i_0 = 0$ представлена ниже.

$$\begin{array}{c}
\left[\begin{array}{ccc}
-2, & -2U_0, & -2U_0^2 - U_{S_1}^2 - U_{S_2}^2 - U_{C_1}^2 - U_{C_2}^2, \\
0, & -2U_{S_1}, & -4U_0U_{S_1} - 2U_{C_1}U_{S_2} + 2U_{C_2}U_{S_1}, \\
0, & -2U_{S_2}, & -4U_0U_{S_2} - 2U_{C_1}U_{S_1}, \\
0, & 0, & -2U_{C_1}U_{S_2} - 2U_{C_2}U_{S_1}, \\
0, & 0, & -2U_{C_2}U_{S_2}, \\
0, & 0, & 0, \\
0, & -2U_{C_1}, & -4U_0U_{C_1} - 2U_{C_1}U_{C_2} - 2U_{S_1}U_{S_2}, \\
0, & -2U_{C_2}, & -4U_0U_{C_2} - U_{C_1}^2 + U_{S_1}^2, \\
0, & 0, & -2U_{C_1}U_{C_2} + 2U_{S_1}U_{S_2}, \\
0, & 0, & -U_{C_2}^2 + U_{S_2}^2, \\
0, & 0, & 0,
\end{array} \right. & \left. \begin{array}{c}
U_{S_1}I_{S_1} + U_{C_1}I_{C_1} + U_{S_2}I_{S_2} + U_{C_2}I_{C_2}, \\
2U_0I_{S_1} + U_{C_1}I_{S_2} - U_{C_2}I_{S_1} + U_{C_2}I_{S_3} - U_{S_1}I_{C_2} + U_{S_2}I_{C_1} - U_{S_2}I_{C_3}, \\
2U_0I_{S_2} + U_{C_1}I_{S_1} + U_{C_1}I_{S_3} + U_{S_1}I_{C_1} - U_{S_1}I_{C_3}, \\
2U_0I_{S_3} + U_{C_1}I_{S_2} + U_{C_2}I_{S_1} + U_{S_1}I_{C_2} + U_{S_2}I_{C_1}, \\
U_{C_1}I_{S_3} + U_{C_2}I_{S_2} + U_{S_1}I_{C_3} + U_{S_2}I_{C_2}, \\
U_{C_2}I_{S_3} + U_{S_2}I_{C_3}, \\
2U_0I_{C_1} + U_{C_1}I_{C_2} + U_{C_3}I_{C_1} + U_{C_2}I_{C_3} + U_{S_1}I_{S_2} + U_{S_2}I_{S_1} + U_{S_2}I_{S_3}, \\
2U_0I_{C_2} + U_{C_1}I_{C_1} + U_{C_1}I_{C_3} - U_{S_1}I_{S_1} + U_{S_1}I_{S_3}, \\
2U_0I_{C_3} + U_{C_1}I_{C_2} + U_{C_3}I_{C_1} - U_{S_1}I_{S_2} - U_{S_2}I_{S_1}, \\
U_{C_1}I_{C_3} + U_{C_2}I_{C_2} - U_{S_1}I_{S_3} - U_{S_2}I_{S_2}, \\
U_{C_2}I_{C_3} - U_{S_2}I_{S_3}
\end{array} \right] \cdot \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \end{array} \right] \\ \mathbf{X} \end{array} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 0 \\ 2I_{S_1} \\ 2I_{S_2} \\ 2I_{S_3} \\ 0 \\ 0 \\ 2I_{C_1} \\ 2I_{C_2} \\ 2I_{C_3} \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \\ \mathbf{B} \end{array} \quad (15)
\end{array}$$

Для определения искоемых коэффициентов использован метод наименьших квадратов.

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \cdot \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (16)$$

где \mathbf{A} , \mathbf{X} и \mathbf{B} - коэффициенты уравнения, приведенные в (15).

Для исследования предлагаемого подхода рассмотрены нелинейные элементы с характеристиками $i(u) = \arctg(u/10)$ и $i(u) = \tg(u/10)$. Для каждого элемента восстановлена ВАХ, выполнен расчёт относительной погрешности $E(u)$, графики представлены соответственно на рис. 5.

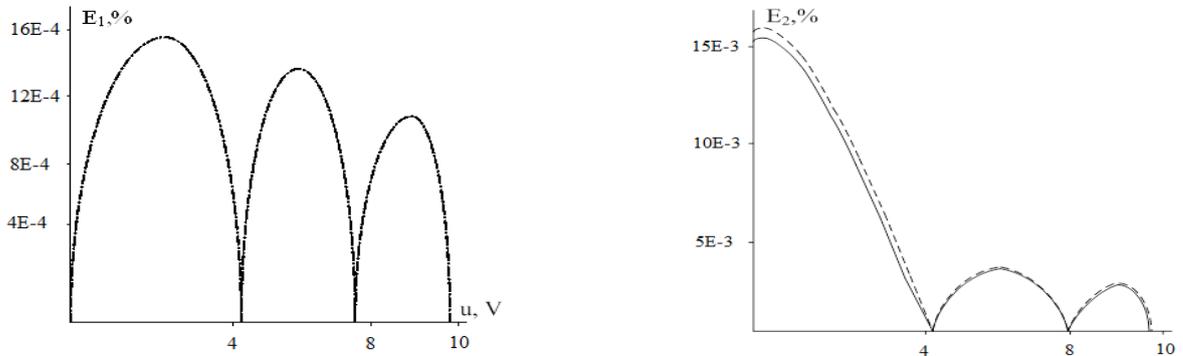


Рис. 5

Результаты испытаний показали, что для реальной ВАХ тангенса и арктангенса абсолютная погрешность модели и реальной кривой не превышает 0.0155% и 0.00014% соответственно.

Во второй части главы 3 рассматривается задача определения нелинейности тока в активно-реактивных цепях. Рассмотрим нелинейный активно-индуктивный элемент. Снимем для него осциллограммы тока и напряжения на одном периоде, аппроксимируем результаты, получим зависимости $u(t)$ и $i(t)$. Разделим период T на два участка таким образом, что на одном из них $i = i(t)$ монотонно возрастает, на другом - монотонно убывает. Такой подход позволит перейти от зависимостей $i = i(t)$, $u = u(t)$ к $t_1 = t_1(i)$, $t_2 = t_2(i)$, и, соответственно, $u_1 = u_1(i)$,

$u_2 = u_2(i)$. Тогда для каждого значения i на отрезке $[-I_m, I_m]$, есть пара значений напряжений u_1, u_2 и пара значений (за этот период) t_1, t_2 .

Математическая модель рассматриваемого элемента имеет вид:

$$u(t) = R(i)i(t) + L(i) \frac{di(t)}{dt} \quad (17)$$

Тогда из (17) получим:

$$\begin{cases} u_1(i) = R(i)i + \frac{L(i)}{dt_1(i)/di}, \\ u_2(i) = R(i)i + \frac{L(i)}{dt_2(i)/di}, \end{cases} \text{ тогда} \quad \begin{cases} L(i) = \frac{u_1(i) - u_2(i)}{di/dt_1(i) - di/dt_2(i)}, \\ R(i) = \frac{1}{i} [u_1(i) - L(i)di/dt_1(i)] \end{cases} \quad (18)$$

Рассмотрим так же параллельную связь нелинейных $R(u)$ и $C(u)$. Разделим период T на два участка так, что на одном из них функция $u(t)$ монотонно возрастает, на другом - монотонно убывает. Тогда каждому значению u на интервале $[-U_m, U_m]$ будет соответствовать пара значений $t_1(u), t_2(u)$ и, соответственно, $i_1(u), i_2(u)$.

Математическая модель устройства имеет вид:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R(u)} + C(u) \frac{du(t)}{dt} \quad (19)$$

Тогда (19) можно переписать как систему:

$$\begin{cases} i_1(u) = \frac{u}{R(u)} + \frac{C(u)}{dt_1(u)/du}, \\ i_2(u) = \frac{u}{R(u)} + \frac{C(u)}{dt_2(u)/du}, \end{cases} \text{ тогда} \quad \begin{cases} C(u) = \frac{i_1(u) - i_2(u)}{dt_1(u)/du - du/dt_2(u)}, \\ R(u) = \frac{u}{i_1(u) - C(u)du/dt_1(u)}. \end{cases} \quad (20)$$

Уравнения (18), (20) дают новый метод расчета требуемых зависимостей.

Для проверки метода рассмотрены: нелинейная RL схема, в которой $L(i) = 0.2/(1+i^2)$, $R(i) = 1+100i^2$; нелинейная RC схема с параметрами $C(u) = 16 \cdot 10^{-6} / (1+u^2 \cdot 10^{-4})$, $R(u) = 50 + 5 \cdot 10^{-3} u^2$. Для них восстановлены соответственно $L(i)$, $R(i)$ и $C(u)$, $R(u)$. Относительные погрешности представлены функциями:

$$\begin{aligned} \delta L(i) &= \frac{L(i) - 0.2/(1+i^2)}{\int_{-1.11}^{1.11} 0.2/(1+i^2) di} 100\%, & \delta R(i) &= \frac{R(i) - 1 - 100 \cdot i^2}{\int_{-1.11}^{1.11} 1 + 100 \cdot i^2 di} 100\% \\ \delta C(u) &= \frac{C(u) - 16 \cdot 10^{-6} / (1+u^2 \cdot 10^{-4})}{\int_{-140}^{140} 16 \cdot 10^{-6} / (1+u^2 \cdot 10^{-4}) du} 100\%, & \delta R(u) &= \frac{R(u) - 50 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot u^2}{\int_{-140}^{140} 50 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot u^2 di} 100\%. \end{aligned}$$

Относительная погрешность для $L(i)$ и $R(i)$ представлена на рис. 6.

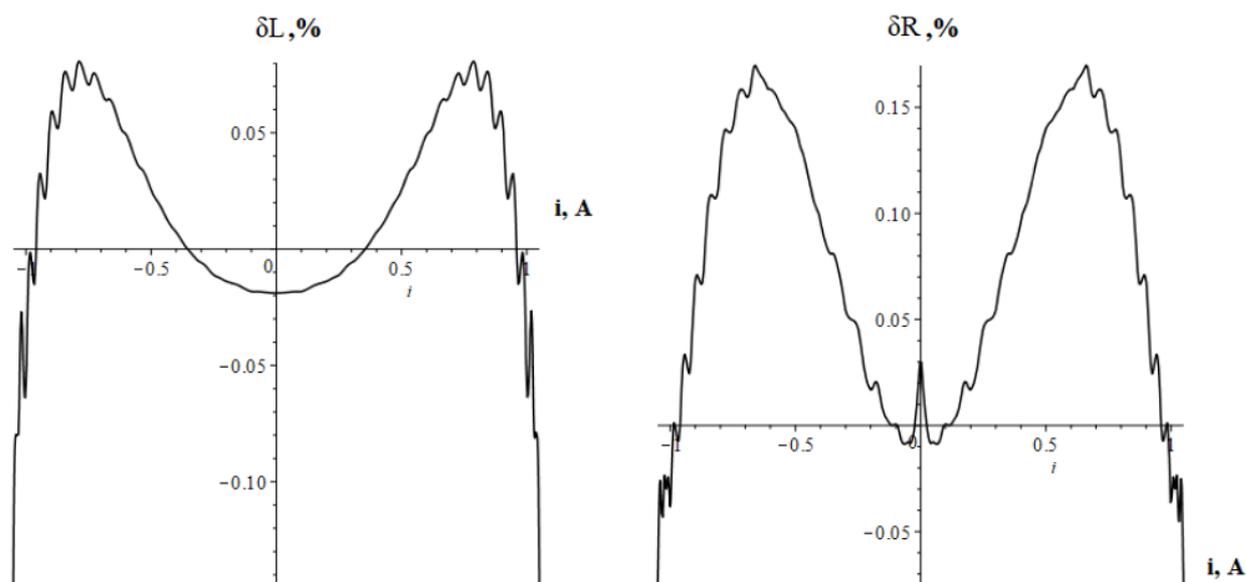


Рис. 6

На большей части интервала погрешность $L(i)$ не превышает $8E-2\%$, но увеличивается на концах интервала. Максимальная погрешность в $R(i)$ составляет примерно $17E-2\%$.

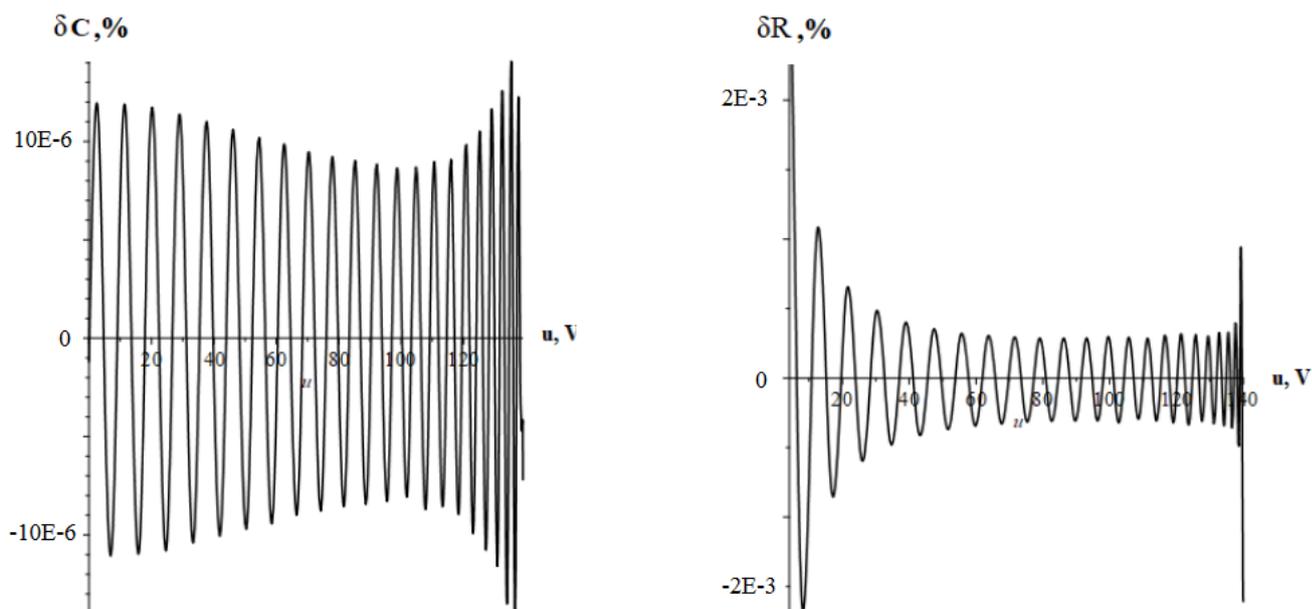


Рис. 7

Относительная погрешность $C(u)$ на большей части интервала не превышает $12E-6\%$, но резко возрастает в конце интервала. Относительная погрешность $R(u)$ не превышает $1E-3\%$ на большей части интервала, но резко возрастает в конце интервала и вблизи нуля.

В третьей части главы 3 предложен подход для идентификации состава многоэлементной нелинейной нагрузки. Для исследуемой цепи приняты допущения: напряжение источника питания синусоидальное, нагрузка состоит из нескольких параллельно соединенных устройств как нелинейных, так и линейных, соединенных между собой проводниками с малым в сравне-

нии с сопротивлением нагрузок сопротивлением, ВАХ всех нелинейных устройств, которые могут входить в нагрузку, известны.

Для каждого k -го приёмника, ВАХ которого известна, определим постоянную составляющую $I_{k,0}$ и комплексные амплитуды $\dot{I}_{k,q}$ $q = \overline{1, m}$ гармоник тока, возникающих при его подключении к синусоидальному напряжению U . Далее в качестве характеристики k -го устройства будем использовать вектор $\mathbf{I}_k = [I_{k,0}, \dot{I}_{k,1}, \dot{I}_{k,2}, \dots, \dot{I}_{k,m}]^T$.

Вектор тока, характеризующий s одинаковых параллельно включенных устройств, будет иметь вид $s\mathbf{I}_k$. Будем обозначать величины, относящиеся к линейной части нагрузки индексом L .

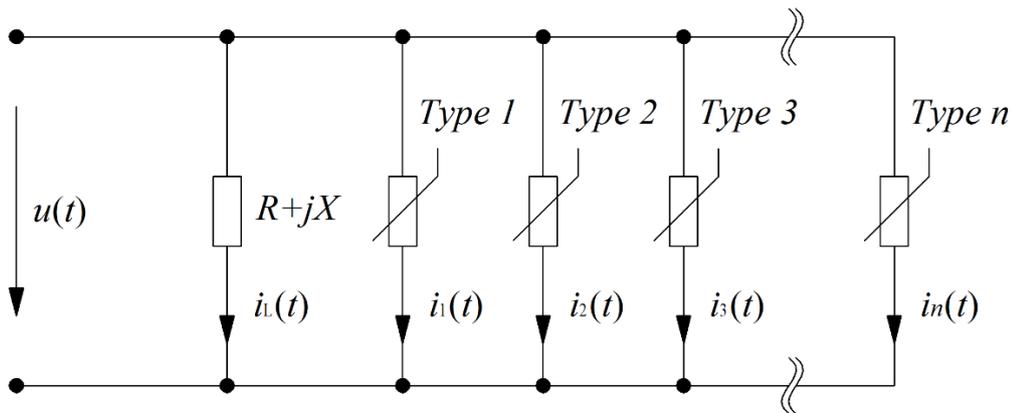


Рис. 8

Пусть теперь нагрузка содержит неизвестное количество устройств, каждое из которых относится к одному из n заранее predetermined типов $Typ 1 \dots Typ n$, а также некоторую линейную составляющую, которую можно представить в виде комплексного сопротивления $R+jX$ (рис. 8). При напряжении U измерим постоянную составляющую и комплексные амплитуды входного тока $\mathbf{J}_s = [J_{s,0}, \dot{J}_{s,1}, \dots, \dot{J}_{s,m}]^T$, $m \geq n$.

Составим систему уравнений вида:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_{0,1} & I_{0,2} & \dots & I_{0,n} \\ \dot{I}_{L,1} & \dot{I}_{1,1} & \dot{I}_{1,2} & \dots & \dot{I}_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dot{I}_{m,1} & \dot{I}_{m,2} & \dots & \dot{I}_{m,n} \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{s,0} \\ \dot{J}_{s,1} \\ \vdots \\ \dot{J}_{s,m} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_s} \quad (21)$$

Решая (21), определим вектор \mathbf{S} , k -ый элемент которого даст количество электроприёмников k типа в составе нагрузки, что и является решением поставленной задачи.

Для оценки чувствительности метода к помехам в измерении входного тока рассмотрена схема, состоящая из параллельно включенных:

- последовательно соединённых резистора (100 Ом) и диода с идеальной ВАХ - таких устройств в нагрузке два;

- нелинейного резистивного устройства с ВАХ $R_3(u) = 87.5(1+10^{-4}u^2)$ Ом, где u – мгновенное значение напряжения – такое устройство в нагрузке одно;

- идеального резистора с сопротивлением 200/3 Ом. В качестве базисного линейного сопротивления взят резистор с сопротивлением 200 Ом.

Подключив устройства поочерёдно к источнику напряжения $u(t) = U\sqrt{2} \sin \omega t$, определены $I_{k,0}$ и $I_{k,q}$ $q = \overline{1,7}$, $k = \overline{1,2}$. Далее составлена система (22) для данной задачи:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0.445 & 0 \\ 0.707 & 0.701 & 0.707 \\ 0 & -0.3j & 0 \\ 0 & -1.84 \cdot 10^{-3} & 0.19 \\ 0 & -0.0598j & 0 \\ 0 & -1.05 \cdot 10^{-3} & 0.0508 \\ 0 & -0.0256j & 0 \\ 0 & -7.26 \cdot 10^{-4} & 0.0136 \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.89 \\ 4.23 + 0.026j \\ 7.39 \cdot 10^{-3} - 0.6j \\ 0.186 + 3.42 \cdot 10^{-3}j \\ 2.96 \cdot 10^{-3} - 0.119j \\ 0.0487 + 1.48 \cdot 10^{-3}j \\ 1.9 \cdot 10^{-3} - 0.0512j \\ 0.012 + 5.13 \cdot 10^{-4}j \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_s} \quad (22)$$

Система (22) решена методом наименьших квадратов, получены значения: $S_L=3+0.02j$, $S_1=2-0.02j$, $S_2=1+0.02j$. Таким образом, в составе нагрузки присутствуют два устройства типа 1, одно устройство типа 2 и линейное сопротивление $200/S_L=200/3$ Ом, как и было задано.

Для метода выполнено исследование устойчивости в погрешности измерения входного тока, числа учитываемых гармоник и числа измеренных точек. Чувствительность метода к помехам слабо зависит от выбора базисных элементов, а также от точности измерения входного тока. Получены идентичные результаты и при учёте разного числа гармоник входного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны методы управления активно-адаптивными сетями на основе оценки актуального состояния электрических сетей. Рассмотрен ряд задач, в которых представлены новые методы диагностики и анализа электрических цепей, доказана эффективность и конкурентоспособность разработанных решений.

Основными результатами работы являются:

1. Выполнен аналитический расчёт электросетей радиальной, магистральной и кольцевой структуры, опробованы методы многофакторного улучшения эффективности работы моделей схем. Представлен так же подход к проведению структурной оптимизации сетей.

2. Изложен способ расчёта узловых нагрузок и узловых напряжений распределительной электросети. Оригинальность метода заключается в аналитическом решении системы

нелинейных уравнений через спецфункции – параметры, полученные в разных состояниях схемы.

3. Предложен метод восстановления ВАХ нелинейных безынерционных элементов. Доказана адекватность расчётной модели на примерах воспроизведения ВАХ реальных танген-са и арктанген-са.

4. Разработан способ определения нелинейности тока в активно-реактивных цепях. Алгоритм опробован на цепях с последовательным соединением RL цепей и параллельным соединением RC компонентов. Обоснована возможность применения метода при работе исследуемой цепи в установившемся режиме.

5. Предложен метод идентификации состава многоэлементной нелинейной нагрузки. Выполнено исследование модели, содержащей линейную и нелинейные нагрузки с известными ВАХ. Дана оценка чувствительности метода к помехам в измерении входного тока, объёму входных данных, числу учитываемых гармоник.

Результаты, полученные в работе, соответствуют заявленной специальности ВАК 05.09.05 «Теоретическая электротехника». Полученные теоретические выражения могут быть обобщены и расширены для решения электротехнических задач при их комплексном рассмотрении. На практике предложенные подходы могут использовать электросетевые организации для повышения эффективности работы электрических сетей, оценки их состояния, контроля коммерческих потерь. Так же результаты пригодны для электроснабжающих организаций в целях индикации нелинейной нагрузки, её состава и параметров.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из перечня ВАК:

[1] Коровкин, Н. В. Аналитический расчет узловых нагрузок распределительной электрической сети / Н. В. Коровкин, Е. А. Бодренков // Электричество. – 2021. – № 9. – С. 31-37. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-9-31-37.

[2] Коровкин, Н. В. Идентификация состава многоэлементной нелинейной нагрузки по измерениям тока и напряжения на ее входе/ Н. В. Коровкин, Е. А. Бодренков, Д.А. Селитренников // НТВ. – 2021. – № 9. – С. 31-37. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-9-31-37.

Публикации, индексируемые в базах Scopus:

[3] Selitrenikov, D. A. Determining of the characteristics of nonlinear resistive-capacitive and resistive-inductive elements / D. A. Selitrenikov, E. A. Bodrenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012070. – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012070.

[4] Stsepuro, K. I. The use of GA in the problems of circuit-mode optimization of electrical networks / K. I. Stsepuro, E. A. Bodrenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012055. – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012055.

[5] Selitrenikov, D. A. New approach to measuring the IVC of non-linear inertia-free elements / D. A. Selitrenikov, E. A. Bodrenkov, S. S. Gritsutenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012008. – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012008.

[6] Bodrenkov, E. A. Refined assessment of the state of the power system for its effective management / E. A. Bodrenkov, N. V. Korovkin // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 10–13 декабря 2019 года. – Voronezh, 2020. – P. 012037. – DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012037.

[7] Bodrenkov, E. A. Optimization of energy supply schemes using GA / E. A. Bodrenkov, N. V. Korovkin // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 10–13 декабря 2019 года. – Voronezh, 2020. – P. 012105. – DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012105.

[8] Synthesis of Bandpass Filters with an Arithmetic Symmetric Amplitude-Frequency Characteristic / E. A. Bodrenkov, E. Y. Kochetkova, A. A. Lebedeva, A. N. Modulina // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 5-7. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396192.

[9] Korovkin, N. V. Determination of Consumer Powers by Measurements at the Supply Feeder Ends / N. V. Korovkin, T. G. Minevich, E. A. Bodrenkov // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1454-1457. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396318.

[10] Calculations of the Magnetic Fields of the End Zone of the Asynchronized Synchronous Generator (Asg) by the Scalar Potential Method / E. A. Bodrenkov, E. Y. Kochetkova, A. A. Lebedeva, A. N. Modulina // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1245-1247. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396403.