

На правах рукописи



Дворкин Дмитрий Валентинович

МЕТОДИКА ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В
ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ И ОЦЕНКИ ИХ
ФАКТИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

Специальность 05.14.02 — Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2018

Работа выполнена на кафедре Электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Тульский Владимир Николаевич

Официальные оппоненты

Вахнина Вера Васильевна
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

Шамонов Роман Геннадьевич
кандидат технических наук,
ПАО «ФСК ЕЭС»
заместитель начальника Департамента оперативно-
технологического управления – начальник отдела
электрических режимов

Ведущая организация АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского»
(АО «ЭНИН»)

Защита состоится «12» февраля 2019 года в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 512.002.01 на базе АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по адресу 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж 3, зал НТС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по адресу www.ntc-power.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Новиков Николай Леонтьевич

Актуальность работы. В энергосистеме (ЭС) России в настоящее время актуальна проблема неравномерного распределения мощности нагрузки потребителей по фазам трехфазной сети, что является следствием естественно хаотичного подключения неполнофазных электроприемников (ЭП). Неизбежное сохранение тенденции увеличения числа потребителей с подобной характеристикой и, как следствие, их суммарной мощности ведет к различным техническим и экономическим проблемам в ЭС:

1) В условиях мониторинга и регулирования режима работы трехфазной ЭС на основе анализа состояния ее однолинейной эквивалентной электрической схемы замещения возможны ошибки в отдаче оперативных команд по причине неполноты имеющейся информации у диспетчера.

2) Ухудшение качества электрической энергии (КЭЭ), связанное с несимметрией напряжения питающей сети, ведет к многочисленным негативным последствиям, в числе которых:

- снижение срока службы основного оборудования ЭС;
- ухудшение условий работы измерительного оборудования;
- ложные срабатывания технологических защит на подстанциях (ПС) ЭС и снабжаемых ими предприятиях;
- снижение уровня надежности снабжения потребителей;
- увеличение потерь мощности и электрической энергии (ЭЭ);
- снижение производительности и срока службы ЭП потребителей.

Работа ЭС в условиях несимметрии напряжения в ее узлах и токов в ее ветвях на практике возможна, однако не является оптимальной, поскольку описанные негативные факторы в конечном счете выражаются в росте себестоимости производства ЭЭ и увеличении имущественных ущербов.

Настоящая законодательная база нормирует искажение симметрии напряжения в узлах передачи ЭЭ от поставщика потребителю с помощью двух количественных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) – коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности – однако она не определяет порядок поиска источников искажений и оценки их фактического вклада (ФВ) в измеренные значения ПКЭ.

В случае, если измеренные значения ПКЭ превышают допустимые, необходимо применение специальных компенсирующих устройств для обеспечения требуемого уровня КЭЭ. Высокая стоимость этих устройств диктует необходимость их оптимального применения, которое, в свою очередь, возможно только в том случае, если весь состав источников искажений известен и оценено их фактическое негативное влияние.

Дополнительным вызовом является недостаточная оснащенность информационно-измерительных систем. При дефиците исходных данных оценка режима работы ЭС, поиск источников искажений и оценка их влияния могут быть существенно затруднены. Таким образом, необходимо сосредоточить усилия на разработке методик, требующих минимума допущений и работающих в наиболее неблагоприятных условиях дефицита информации с минимально возможной погрешностью до тех пор, пока современная измерительная инфраструктура ЭС не достигнет своего наиболее совершенного состояния.

Объект исследования: ЭС класса напряжения 220 кВ и ниже.

Предмет исследования: влияние потребителей с неравномерным по фазам потреблением ЭЭ и мощности на несимметрию напряжения в узлах ЭС.

Цель исследования: разработка методики поиска потребителей с неравномерным по фазам потреблением и оценки их фактического вклада в несимметрию напряжения в условиях недостатка исходных данных для анализа.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1) Анализ существующих методов оценки фактического для оценки возможной области их применения в условиях дефицита исходных данных для анализа. Описание обобщенного подхода оценки фактического вклада в условиях широкого набора исходных данных для анализа.

2) Разработка универсальной математической модели, применимой для описания любой реальной ПС в ЭС.

3) Разработка метода поиска потребителей с несимметричным по фазам потреблением из числа потребителей исследуемой ПС, подключенных к ее точке общего присоединения, позволяющего корректно построить ее эквивалентную электрическую схему замещения. Математическое описание метода и оценка условий его работоспособности.

4) Экспериментальная проверка разработанного метода на масштабной физической модели.

5) Разработка *Matlab*-модели одиночной ПС.

6) Экспериментальная оценка погрешности разработанного метода и подтверждение справедливости принятых положений и допущений при его выводе на *Matlab*-модели одиночной ПС.

7) Разработка метода оценки фактического, который позволяет учесть влияние всех описанных параметров, используемых в обобщенном подходе оценки фактического вклада, но, благодаря известной эквивалентной электрической схеме замещения ПС, требует меньшего набора исходных данных.

8) Формирование на основе разработанных методов единой методики, позволяющей в границах любой реальной ПС в ЭС определить всех несимметричных потребителей, подключенных к точке общего присоединения, и их фактическое влияние на несимметрию напряжения в этом узле.

Методы исследования и среды моделирования. В качестве основного инструмента анализа используется классическая теория электротехники: методы двух узлов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора и симметричных составляющих, теория рядов, принцип суперпозиции в теории электрических цепей, учет распределенных параметров при расчете дальней электропередачи.

В работе представлено 2 среды моделирования: физическая (на основе низковольтной аппаратуры «Учебная техника») и компьютерная с применением программно-вычислительных комплексов (ПВК) *Matlab* и *RastrWin*.

Научная новизна работы.

1) Разработана универсальная математическая модель ПС с постоянно симметричным источником питания, справедливая для любой ПС в ЭС. Доказана справедливость линеаризации функций изменения значений фазных токов всех фидеров ПС при равномерном распределении нагрузки по ним.

2) Предложен критерий разделения потребителей ПС на 2 группы: с симметричным и несимметричным по фазам потреблением. На его основе разработан метод определения несимметричных потребителей ПС при изменяющихся во времени параметрах ЭС, позволяющий сформировать корректную эквивалентную схему замещения ПС обратной и нулевой последовательности.

3) Разработан метод ранжирования потребителей по степени влияния на несимметрию напряжения в точке общего присоединения ПС, применимый в условиях дефицита исходных данных для анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Универсальная линеаризованная математическая модель ПС, точка общего присоединения которой электрически удалена от симметричного источника питания несимметричным сопротивлением внешней сети.

2) Критерий разделения потребителей ПС на симметричных и несимметричных и метод поиска несимметричных потребителей на его основе в системе с постоянно изменяющейся нагрузкой, позволяющий сформировать корректную схему замещения ПС обратной и нулевой последовательности.

3) Метод оценки фактического вклада потребителя ПС на основе оценки мощности искажения в его фидере, работоспособный в условиях неполноты исходных данных для анализа.

Теоретическая значимость работы заключается в разработанных моделях и алгоритмах, позволяющих проводить анализ состояния и установившегося режима работы ПС в ЭС в условиях, когда объем исходных данных ограничен, а наблюдаемость отдельных элементов в ЭС низка. Линеаризованная математическая модель ПС может быть использована при расчете установившегося режима работы ЭС в различных структурах Единой Энергетической Системы (ЕЭС), отвечающих за управление и прогнозирование.

Практическая значимость работы заключается в:

- 1) Разработанной методике поиска несимметричных потребителей ПС и оценки их фактического влияния на уровень несимметрии напряжения в точке общего присоединения в условиях низкой наблюдаемости ЭС, когда набор исходных данных ограничен.
- 2) Линеаризованной модели ПС, дающей возможность считать, что в ее эквивалентной схеме токи во всех ветвях, подключенных к трансформатору, зависят от изменения любого параметра этой схемы линейно, что позволяет существенно упростить эквивалентирование и анализ многоузловых ЭС.
- 3) Инструкции по моделированию отдельной ПС или целой ЭС в ПВК *Matlab* в задачах оценки КЭЭ в различных структурах ЕЭС и вузах для учебных целей.

Степень достоверности результатов и их апробация.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена применением корректных математических методов и моделей, проверка их корректности - сопоставлением с результатами физического моделирования, применением апробированных программно-вычислительных комплексов и проведенными с их применением расчётами.

Результаты исследования отражены в публикациях автора и выступлениях на международных конференциях: Двадцать третья Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (2-3.03.2017); Двадцать четвертая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (15-16.03.2018); IOP Conference Series: Material Science and Engineering (09.2017); IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (12-13.10.2017).

Публикации по теме диссертации: опубликовано шесть (6) работ. Из них две (2) в изданиях, входящих в список рецензируемых научных журналов ВАК; две (2) в изданиях IEEE и IOP, одна (1) из которых – кросс-реферируемая в SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка принятых сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 80 источников литературы (объемом 147 страниц) и трех приложений (объемом 48 страниц), включая 109 рисунков и 61 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель исследования и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, показана научная новизна и практическая ценность работы, описана ее структура и объем.

В первой главе проводится анализ существующих методов поиска источников искажения симметрии напряжения и оценки их ФВ. Представлено подробное описание восьми методов, которые могут быть разделены на два класса:

- класс расчетных методов;
- класс корреляционных методов.

К первому классу относятся 6 методов, в основе которых лежит расчет установившегося режима эквивалентной электрической схемы замещения произвольной ПС (рисунок 1) методом наложения для оценки влияния каждого потребителя ПС на несимметрию напряжения в точке общего присоединения (ТОП) в отдельности. Отличие методов определяется принятыми допущениями, операциями над эквивалентными схемами и способами представления нагрузки. Методы обладают высокой точностью, но требуют большого набора данных для применения.

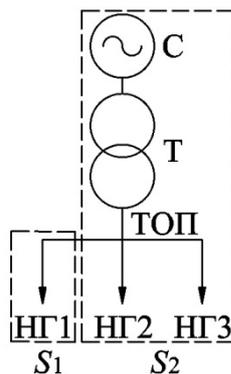


Рисунок 1 – Произвольная ПС, разделенная на 2 подсистемы: S_1 и S_2 – подсистемы 1 и 2 соответственно; НГ1 – нагрузка S_1 ; НГ2 и НГ3 – нагрузки S_2 ; Т – трансформатор; С – внешняя сеть

Схема ПС на основе источников напряжения (рисунок 2) – электродвижущих сил (ЭДС) – в литературе получила название схема Тевенина (СЗТ). Эквивалентная схема ПС на основе источников тока (рисунок 3) в литературе получила название схема Нортона (СЗН).

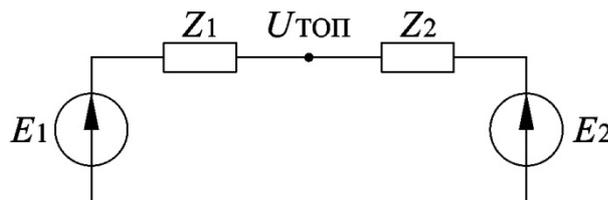


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема замещения Тевенина: $U_{\text{ТОП}}$ – напряжение искажения в ТОП; Z_1 и Z_2 – эквивалентные сопротивления подсистем 1 и 2 соответственно; E_1 и E_2 – эквивалентные ЭДС искажений подсистем 1 и 2 соответственно

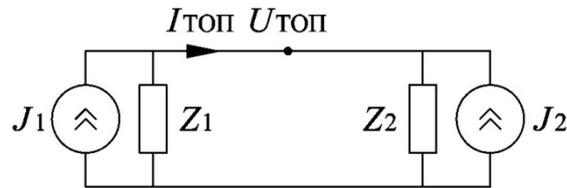


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема замещения Нортон: $U_{\text{ТОП}}$ – напряжение искажения в ТОП; Z_1 и Z_2 – эквивалентные сопротивления подсистем 1 и 2 соответственно; J_1 и J_2 – эквивалентные токи искажений подсистем 1 и 2 соответственно

Представленные схемы справедливы как для основной частоты, так и для обратной и нулевой последовательности, и взаимозаменяемы. В работе использовалась схема Тевенина.

Ко второму классу относятся два метода, в основе которых лежит определение зависимости между значением тока исследуемого потребителя и значением напряжения и/или контролируемого ПКЭ в ТОП (рисунок 4). По измеренным значениям в заданном диапазоне изменения тока нагрузки определяется аппроксимированный «фон системы» – значение напряжения и/или ПКЭ в ТОП при «отключенном» потребителе. Значение фонов системы всех потребителей позволяет ранжировать их по влиянию на несимметрию напряжения в ТОП. Наибольшее влияние оказывает тот потребитель, чей фон системы наименьший. И, наоборот, наименьшее влияние оказывает тот потребитель, чей фон системы наибольший.

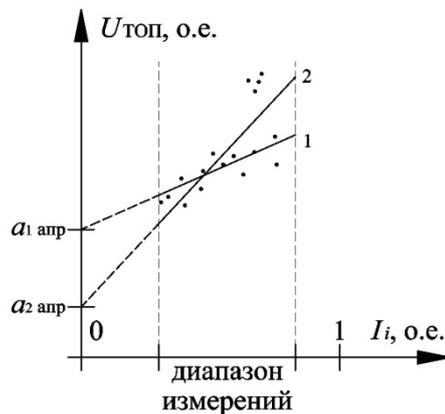


Рисунок 4 – Построение зависимости $U_{\text{ТОП}} = f(I_i)$: 1 – без резонанса напряжения; 2 – с резонансом напряжения; $a_{1 \text{ апр}}$ и $a_{2 \text{ апр}}$ – аппроксимированные фоны системы

Подробный анализ методов показал, что расчетный класс требует значительного набора исходных данных для анализа:

- измеренных значений трехфазного напряжения в ТОП и трехфазных токов фидеров, подключенных к ТОП;
- эквивалентных сопротивлений кабельных линий (КЛ), отходящих от ПС к нагрузке, или ЭДС искажений на шинах, питаемых через эти КЛ потребителей обратной и нулевой последовательности;

- эквивалентного сопротивления внешней сети обратной и нулевой последовательности.

Получить требуемые значения токов и напряжений на ПС не составляет труда, однако точно определить сопротивления КЛ, на практике находясь на территории ПС, практически невозможно. Эти значения можно задать, зная марку кабеля, тип его прокладки, температуру по всей его длине, однако в этом случае точность расчетных методов будет напрямую зависеть от точности определения сопротивлений всех КЛ. При этом учесть влияние изменения сопротивления КЛ при их ремонте и использовании кабельных соединительных муфт (КСМ) практически невозможно. Даже предположив, что сопротивление КЛ было определено идеально точно, и достоверно зная, что КСМ не применялись, определить сопротивление внешней сети на практике невозможно, поскольку его значение зависит от множества факторов, а изменение практически непредсказуемо.

Для применения корреляционных методов достаточно только измерений токов и напряжений в границах ПС, однако точность определения фона системы напрямую зависит от плотности распределения измеренных значений тока нагрузки и резонансных явлений в сети. На рисунке 4 первая характеристика описывает равномерное распределение значений токов нагрузки потребителя и соответствующих им значений напряжения в ТОП. В таком случае аппроксимация узкого диапазона измеренных токов дает некоторое значение фона системы $a_{1\text{аппр}}$. Резонанс напряжений или токов может существенно изменить как плотность распределения измеренных значений, так и сами значения напряжений при одном значении тока. Таким образом, аппроксимация узкого диапазона измеренных токов может дать иное значение фона системы, $a_{2\text{аппр}}$. Разница значений полученных фонов систем для двух случаев определяет абсолютную погрешность методов. Поскольку плотность распределения значений токов и частота резонансных явлений не поддается детерминации, то погрешность применения корреляционных методов на практике не поддается прогнозированию.

Вывод. Обоснована необходимость разработки нового метода оценки ФВ, поскольку все существующие работоспособны либо в благоприятных условиях избытка исходных данных, либо работают с непрогнозируемой погрешностью. К любому новому методу предъявляется два требования:

- использование только гарантированного минимума исходных данных: значений трехфазных токов и напряжений в границах ПС;
- по возможности, применение предлагаемого метода должно дополнять уже существующие методы, т.е. расширять область их применения.

Во второй главе рассмотрена математическая модель условной ПС в ЭС (рисунок 5). Известно, что трехфазное напряжение на шинах генераторов электрических станций симметрично, т.е. для рассматриваемой ПС все электрические станции могут быть представлены единым эквивалентным источником питания с фазной ЭДС E_k , электрически удаленной от ТОП эквивалентным сопротивлением внешней сети ($Z_{экк}$), включающим сопротивление трансформатора ПС ($Z_{Тк}$), сопротивление отходящей от ПС воздушной линии (ВЛ) ($Z_{лэпк}$), и эквивалентного сопротивления всех ВЛ, трансформаторов и нагрузок во внешней сети (Z'_k). Таким образом, это трехфазное сопротивление нельзя принять симметричным, поскольку внешняя сеть также может питать несимметричную нагрузку.

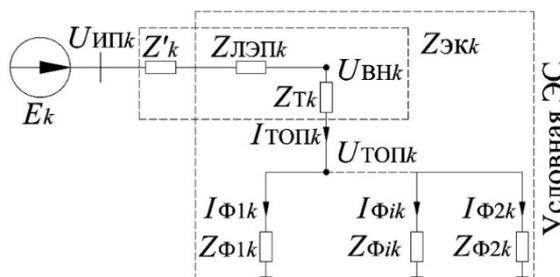


Рисунок 5 – Фаза k эквивалентной схемы Тевенина ПС в ЭС на основной частоте: $Z_{\Phi ik}$ – фазное сопротивление i -го фидера, включающего сопротивление его КЛ и нагрузки

Делается заключение, что любую ПС можно представить ТОП, подключенной к идеальному источнику питания (ИП) через несимметричное сопротивление и снабжающей n потребителей. Предлагаемый далее подход базируется на этой модели и состоит из 2 этапов.

Этап 1. Построение корректной эквивалентной электрической схемы замещения Тевенина последовательности m . Для этого необходимо разделить потребителей ПС на несимметричных (НП) и симметричных (СП). Если фидер питает НП, то в эквивалентной ему ветви в схеме Тевенина последовательности m присутствует ЭДС искажения. Напротив, если фидер питает СП, то его ветвь не имеет активных элементов и представлена только эквивалентным сопротивлением. Для разделения потребителей вводятся следующие коэффициенты:

$$k_{(i,j,\text{ТОП})b} = \left| \frac{\bar{I}_{(i,j,\text{ТОП})b}}{\bar{I}_{(i,j,\text{ТОП})a}} \right|, \quad k_{(i,j,\text{ТОП})c} = \left| \frac{\bar{I}_{(i,j,\text{ТОП})c}}{\bar{I}_{(i,j,\text{ТОП})a}} \right|, \quad (1)$$

где $I_{(i,j,\text{ТОП})k}$ – фазный ток в ветви рассматриваемого i -го потребителя, в ветви остальных j -ых потребителей и ТОП соответственно, а $k_{(i,j,\text{ТОП})b}$ и $k_{(i,j,\text{ТОП})c}$ – фазные коэффициенты соответствующих ветвей схемы Тевенина основной частоты.

Пусть изменилось значение сопротивления фазы b i -го потребителя, тогда при проведении измерений на ПС это отразится на значениях коэффициентов $k_{(i,j,\text{ТОП})b}$ для двух последовательных измерений (рисунок 6).

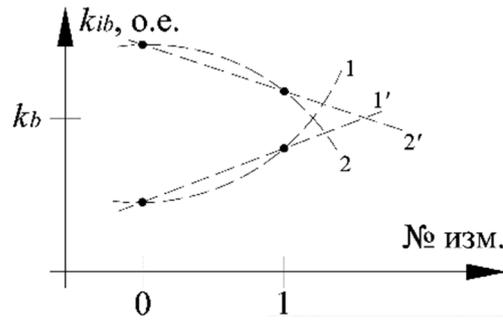


Рисунок 6 – Изменение значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$: 1 и 1' – реальное билинейное и линейно аппроксимированное изменение в ветви -го потребителя; 2 и 2' – реальное билинейное и линейно аппроксимированное изменение в ТОП

При линейной аппроксимации на основе двух последовательных значений коэффициентов k_{ib} и $k_{ТОПb}$ в момент их пересечения справедливо следующее:

$$k_{ТОПb} = k_{ib} \rightarrow \left| \frac{\frac{\bar{E}_b \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ib}}{1 + \bar{Z}_{эkb} \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ib}}}{\frac{\bar{E}_a \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ia}}{1 + \bar{Z}_{эка} \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ia}}} \right| = \left| \frac{\frac{\bar{E}_b}{1 + \bar{Z}_{эkb} \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ib}} \cdot \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi(i,j)b}}}{\frac{\bar{E}_a}{1 + \bar{Z}_{эка} \cdot \sum_i^n 1/\bar{Z}_{\Phi ia}} \cdot \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi(i,j)a}}} \right|, \quad (2)$$

Равенство (2) справедливо рассматривать без отношений фазных ЭДС ИП (эквивалентный ИП идеальный). После всех преобразований (2) принимает вид:

$$\left| \frac{\sum_i^n \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi ib}}}{\sum_i^n \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi ia}}} \right| = \left| \frac{\bar{Z}_{\Phi ia}}{\bar{Z}_{\Phi ib}} \right|, \quad (3)$$

где правая часть содержит отношение фазных сопротивлений i -го фидера, а левая – отношение эквивалентных фазных проводимостей всей нагрузки ПС.

Пусть рассматриваемый i -й потребитель ПС симметричный, т.е.:

$$|\bar{Z}_{\Phi ia}| = |\bar{Z}_{\Phi ib}| = |\bar{Z}_{\Phi ic}|. \quad (4)$$

Из условия (4) становится ясно, что правая часть равенства (2) равна 1, тогда и левая часть тоже должна быть равна 1, что возможно при любом количестве НП, подключенных к ПС (рисунок 7). Наоборот, если j -ый фидер питает НП, т.е. условие (4) не верно, равенство (3) принимает вид

$$\left| \frac{\sum_i^n \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi ib}}}{\sum_i^n \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi ia}}} \right| = \left| \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi jb}} / \frac{1}{\bar{Z}_{\Phi ja}} \right|, \quad (5)$$

а пересечение на рисунке 6 достигается в значении, отличном от 1.

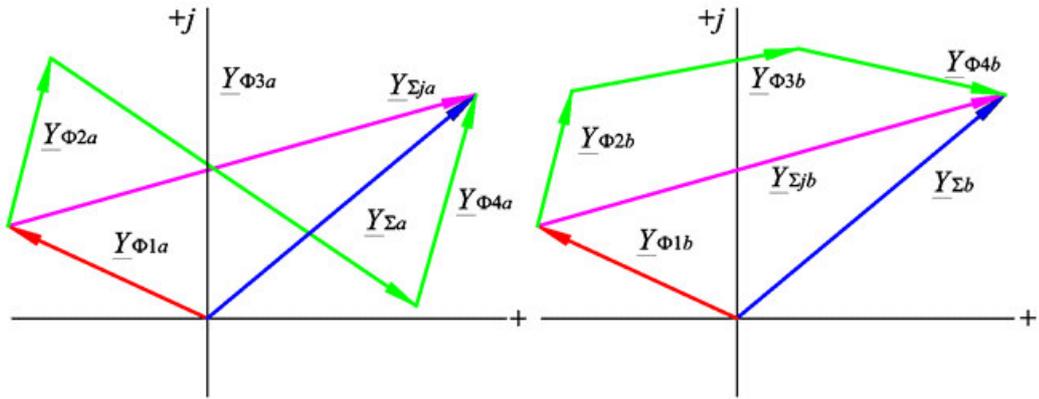


Рисунок 7 – Равенство фазных проводимостей нагрузки ПС при питании НП: $Y_{\Phi 1k}$ – проводимость ветви СП; $Y_{\Sigma jk}$ и $Y_{\Sigma k}$ – эквивалентная проводимость всех НП и ПС

Из равенств (3) и (5) видно, что условие пересечения аппроксимированных прямых не зависит от симметрии сопротивления внешней сети. Для коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)c}$ справедливы аналогичные выводы.

Линейная аппроксимация функций изменения значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ на практике обуславливает некоторое значение погрешности метода. Рассмотрение рядов Тейлора этих функций показало, что для ПС, питающих группу потребителей, погрешность аппроксимации снижается с ростом числа потребителей. На основании двух последовательных измерений фазных токов проводится разделение потребителей ПС на СП и НП и формируется корректная схема Тевенина последовательности m (рисунок 8).

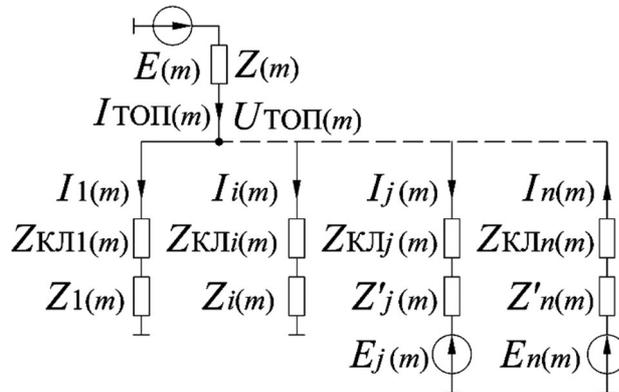


Рисунок 8 – Схема замещения ПС с n потребителями для последовательности m : $Z_{(m)}$ – сопротивление внешней сети; $Z_{КЛi(m)}$ и $Z_{КЛj(m)}$ – сопротивления КЛ i -ых и j -ых фидеров с СП и НП соответственно; $Z_{i(m)}$ – нагрузка i -го СП; $Z'_{j(m)}$ – эквивалентное сопротивление сети j -го; НП $E_j(m)$ – ЭДС искажения j -го НП; $E_{(m)}$ – ЭДС искажения внешней сети

Описанный подход получил название Метод поиска НП, а блок-схема его алгоритма представлена на рисунке 12.

Этап 2. Оценка ФВ потребителей ПС на основе значений полных мощностей в их ветвях корректной схемы Тевенина последовательности m . Схема на рисунке 8 упрощается до схемы трех

подсистем (рисунок 9). Первой подсистеме соответствует эквивалентное сопротивление всех СП. Во 2-ой содержатся эквивалентное сопротивление и ЭДС искажений всех НП, активная мощность которых направлена к ТОП (условно положительное направление), а в 3-ей содержатся эквивалентное сопротивление и ЭДС искажений всех НП, активная мощность которых направлена от ТОП (условно отрицательное направление).

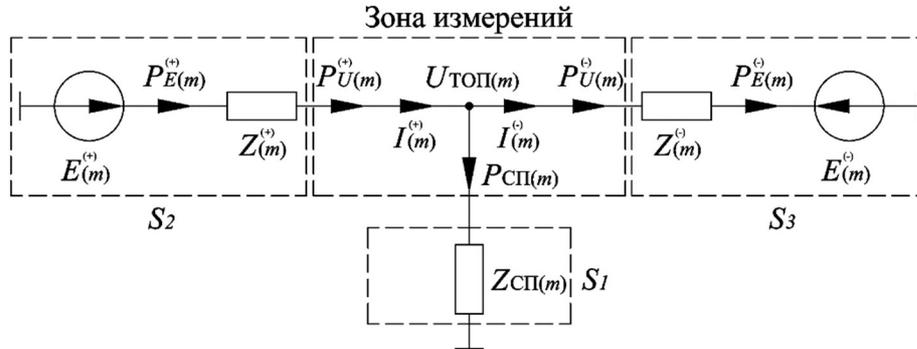


Рисунок 9 – Эквивалентная схема Тевенина ПС для трех подсистем: $Z_{СП(m)}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки подсистемы СП; $E_{(m)}^{(+)}$ и $Z_{(m)}^{(+)}$ – эквивалентные ЭДС и сопротивление подсистемы S_2 ; $E_{(m)}^{(-)}$ и $Z_{(m)}^{(-)}$ – эквивалентные ЭДС и сопротивление подсистемы S_3

По Первому закону Кирхгофа баланс полных мощностей в ТОП:

$$\bar{S}_{U(m)}^{(+)} = \bar{S}_{U(m)}^{(-)} + \bar{S}_{СП(m)}, \quad (6)$$

где положительная и отрицательная составляющие, $S_{U(m)}^{(+)}$ и $S_{U(m)}^{(-)}$, определяются по принципу суперпозиции (рисунок 10).

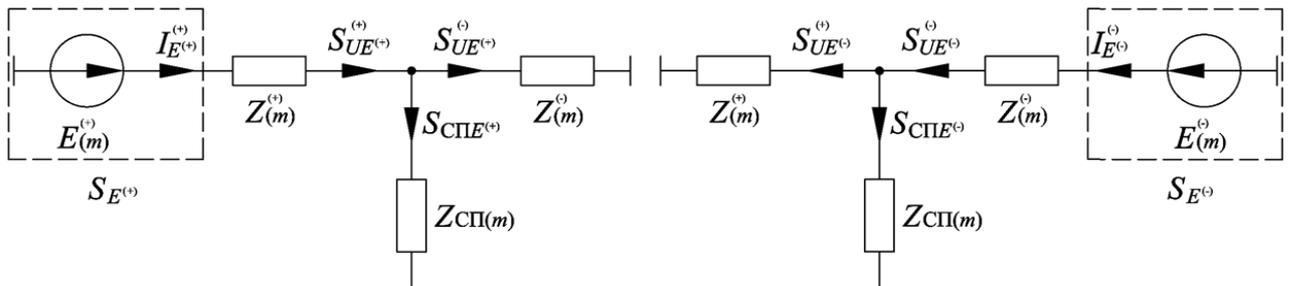


Рисунок 10 – Вклад в положительную и отрицательную составляющую полных мощностей каждой ЭДС по принципу суперпозиции

Из рисунка 10 определяются значения положительных и отрицательных полных мощностей, генерируемые каждой ЭДС в отдельности, и соответствующие им потери на передачу и потребление в нагрузке:

$$\bar{E}_{(m)}^{(+)} \cdot \bar{I}_{E^{(+)}} - \left(\bar{I}_{E^{(+)}} \right)^2 \cdot \left(\bar{Z}_{(m)}^{(+)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(-)} \cdot \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(-)}} \right) = 0, \quad (7)$$

$$\bar{E}_{(m)}^{(-)} \cdot \bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)} - \left(\bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)} \right)^2 \cdot \left(\bar{Z}_{(m)}^{(-)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(+)} \cdot \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(+)}} \right) = 0, \quad (8)$$

где токи в ветвях:

$$\bar{I}_{E^{(+)}}^{(+)} = \bar{E}_{(m)}^{(+)} / \left(\bar{Z}_{(m)}^{(+)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(-)} \cdot \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(-)}} \right), \quad (9)$$

$$\bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)} = \bar{E}_{(m)}^{(-)} / \left(\bar{Z}_{(m)}^{(-)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(+)} \cdot \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(+)}} \right). \quad (10)$$

С помощью (7) и (8) описывается соотношение полных мощностей:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{U(m)}^{(+)} &= \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)} > 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)}, \\ -\bar{S}_{U(m)}^{(-)} &= \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)} < 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)}. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_{U(m)}^{(+)} &= \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)} > 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)}, \\ -\bar{S}_{U(m)}^{(-)} &= \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)} < 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Откуда становится ясно, что наибольший ФВ вносит подсистема с условно положительным направлением протекания полной мощности:

$$\Phi B_{S_2(m)}^S > \Phi B_{S_3(m)}^S. \quad (13)$$

Для определения ФВ каждого НП в отдельности схема Тевенина трех подсистем рассматривается подробнее (рисунок 11).

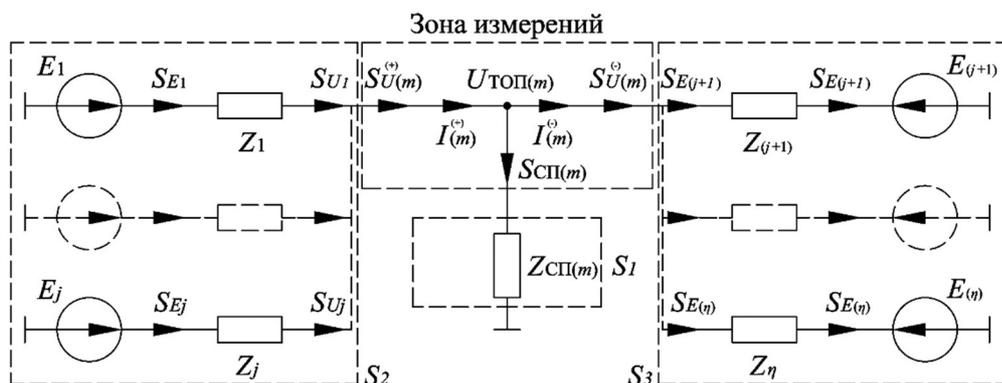


Рисунок 11 – Эквивалентная схема Тевенина ПС с подсистемами S_2 и S_3 в раскрытой форме

Каждая ветвь в подсистемах обуславливает значение мощности в соответствии со своей ЭДС и сопротивлением:

$$\bar{S}_{U_j}^{(S_2)} = \frac{\bar{U}_{ТОП}^2 + \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_j}{\bar{Z}_j}, \quad (14)$$

$$\bar{S}_{U_j}^{(S_3)} = \frac{\bar{U}_{ТОП}^2 - \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_j}{\bar{Z}_j}. \quad (15)$$

Из (14) становится ясно, что если соотношение полых мощностей во второй подсистеме (условно положительной):

$$\left| \bar{S}_{Uj}^{(S_2)} \right| / \left| \bar{S}_{Uj+1}^{(S_2)} \right| > 1,$$

то ФВ этих подсистем соотносится как

$$\Phi B_{j(m)}^{S_2} > \Phi B_{j+1(m)}^{S_2}.$$

Напротив, из (15) ясно, что если соотношение полых мощностей во второй подсистеме (условно отрицательной):

$$\left| \bar{S}_{Uj}^{(S_3)} \right| / \left| \bar{S}_{Uj+1}^{(S_3)} \right| > 1,$$

то ФВ этих подсистем соотносится как

$$\Phi B_{j(m)}^{S_3} < \Phi B_{j+1(m)}^{S_3}.$$

Блок-схема алгоритма второго этапа представлена на рисунке 12.

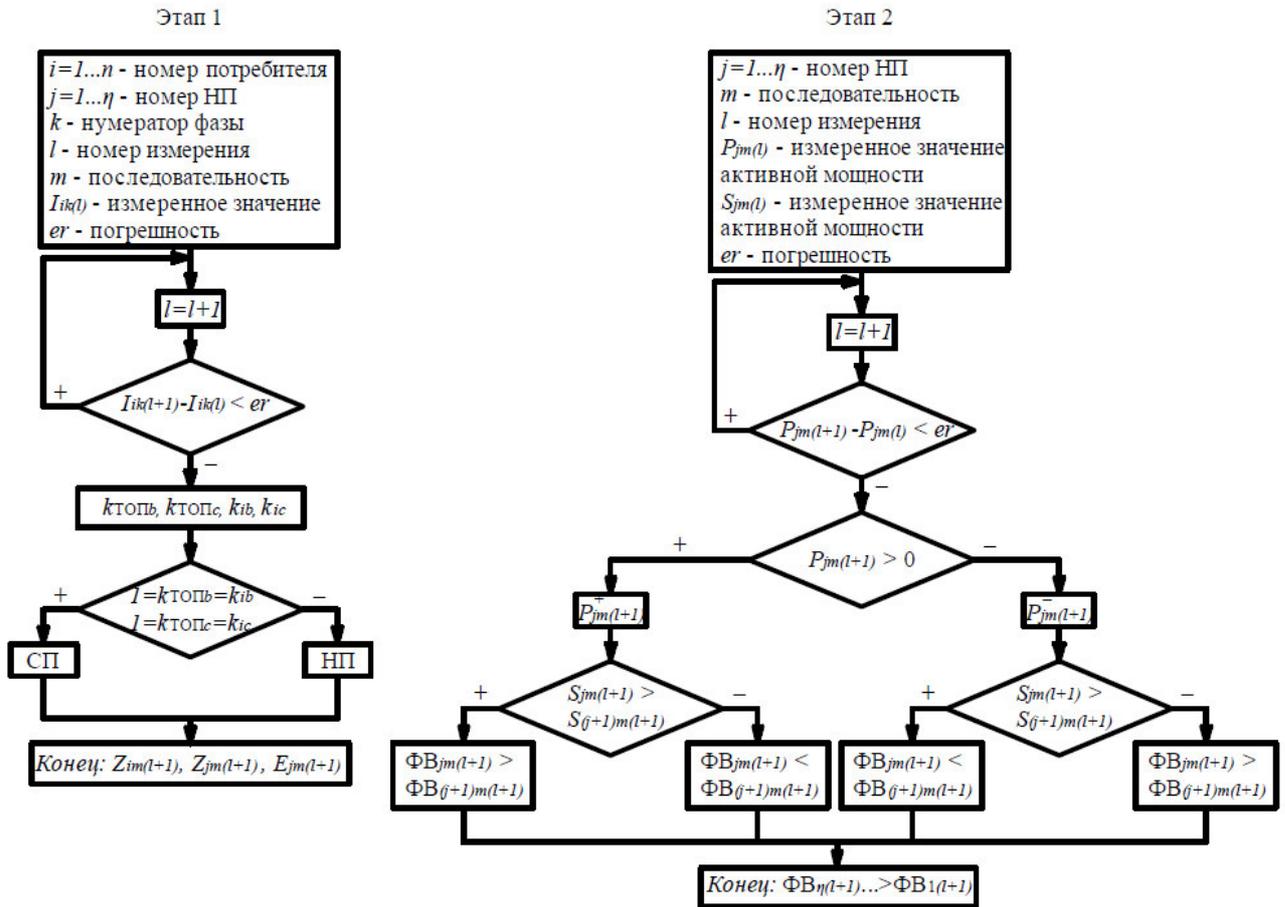


Рисунок 12 – Алгоритмы методов двух этапов

Выводы по главе:

1) Представлена математическая модель, позволяющая оценивать установившийся режим любой ПС в ЭС. На модели показано, что ТОП ПС электрически удалена от

эквивалентного идеального ИП несимметричным сопротивлением внешней сети. Таким образом, обоснована симметричность ИП для любой ПС в ЭС.

2) Рассмотрен метод разделения потребителей подстанции на симметричных и несимметричных, основанный на анализе последовательных измерений фазных токов фидеров ПС. Показано, что применение метода позволяет объективно разделить потребителей на СП и НП и корректно составить электрическую схему замещения Тевенина ПС последовательности m .

3) Определены причины возможного возникновения погрешности при применении метода на практике: линейная аппроксимация билинейной функции изменения значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$.

4) Разложение функций в ряд Тейлора показало, что погрешностью аппроксимации можно пренебречь при рассмотрении ПС с большим числом потребителей.

5) На корректно составленной электрической схеме замещения Тевенина ПС последовательности m рассмотрен метод оценки ФВ потребителя в искажения симметрии напряжения в ТОП. Показано, что значение полных мощностей последовательности m , измеренных на территории ПС, определяется мощностью источника ЭДС в этой ветви и его электрической удаленностью от ТОП. Таким образом, показана возможность ранжирования потребителей ПС по степени влияния на значение напряжения в ТОП:

- в ветвях с условно положительным направлением протекания активной мощности наибольший ФВ вносит потребитель с наибольшим значением полной мощности;
- в ветвях с условно отрицательным направлением протекания активной мощности наибольший ФВ вносит потребитель с наименьшим значением полной мощности.

Третья глава посвящена рассмотрению среды моделирования *Matlab*, описанию его возможностей в части контроля КЭЭ и формированию необходимой библиотеки моделей, достаточной для проверки ранее предложенных алгоритмов. Были рассмотрены модели:

- силовых и измерительных трансформаторов, устройства регулирования под нагрузкой (РПН) и автоматики регулирования коэффициента трансформации (АРКТ);
- ВЛ и КЛ с сосредоточенными параметрами и ВЛ с распределенными;
- источников питания с различными системами возбуждения;
- узлов потребления с различными видами статических характеристик нагрузок (СХН), нелинейных и несинусоидальных нагрузок.

Для проверки адекватности и справедливости разработанной библиотеки моделей использовались традиционные средства анализа режимов работы ЭС: *RastrWin*, *MathCad*, а также различные эмпирические формулы оценки параметров режима ЭС, рекомендуемые ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 54149-2010.

На базе разработанной библиотеки была создана инструкция по использованию *Matlab* и собрана модель ПС (рисунок 13), идентичная представленной на рисунке 5, на которой в дальнейшем проводится серия экспериментов для оценки погрешности предложенных во второй главе подходов.

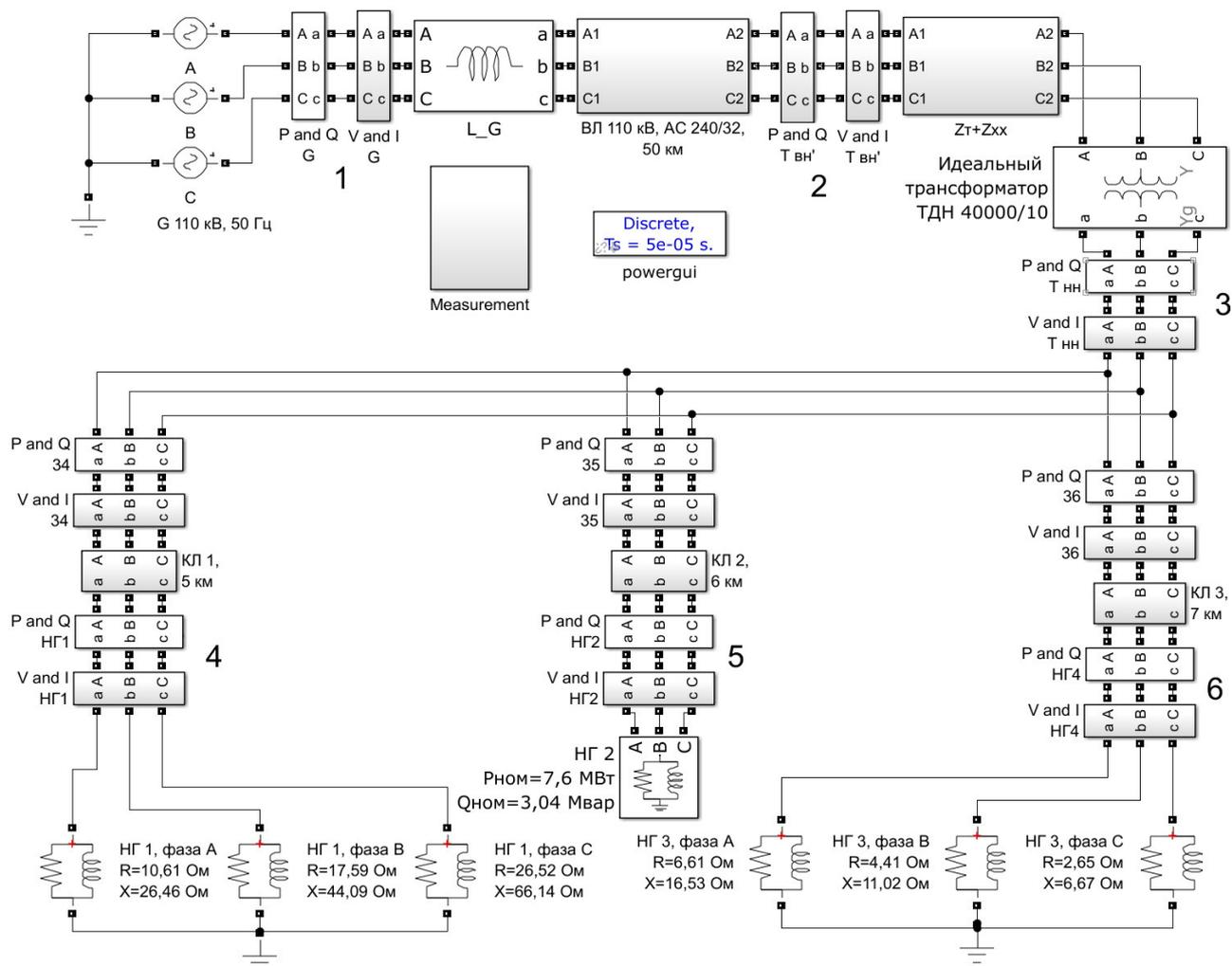


Рисунок 13 – *Matlab*-модель условной ПС с НП

Выводы по главе:

1) Описаны *Matlab*-модели отдельных силовых элементов реальных ЭС, представленные в виде типовых решений, с указанием конкретных подходов к расчету их параметров. Представлены модели несимметричных и нелинейных нагрузок, влияющих на КЭЭ в части несимметрии и несинусоидальности напряжения. Показаны типовые системы измерения для оценки режима работы энергосистемы в зависимости от типа потребителя и его влияние на параметры установившегося режима (УР).

2) Проведены расчеты УР работы энергосистем, снабжающих различные типы потребителей. Каждый расчет подтвержден альтернативными расчетами с оценкой погрешностей. В наихудшем случае значение абсолютной погрешности при расчете параметров установившегося

режима ЭС не превышало 5%, на основании чего сделано заключение о корректной работе предложенных моделей.

3) Описанная корректная модель ПС с несимметричными потребителями позволяет использовать ее в дальнейшем для проведения математических экспериментов с целью оценки предложенного Метода поиска НП.

В четвертой главе проведен ряд экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенного Метода поиска НП в двух средах моделирования.

Первая из них - физическое моделирование в лаборатории КЭЭ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» с применением стендов «Учебная техника». Данная среда использовалась для решения двух задач:

- Концептуальной оценки предложенного подхода, позволившей убедиться, что в процессе разработки метода и его математического описания учтены все влияющие на работоспособность метода факторы.
- Показать его ключевое преимущество – возможность точно определить «скрытого» НП. На рисунке 14 показана векторная диаграмма токов всех потребителей, подключенных к трансформатору.

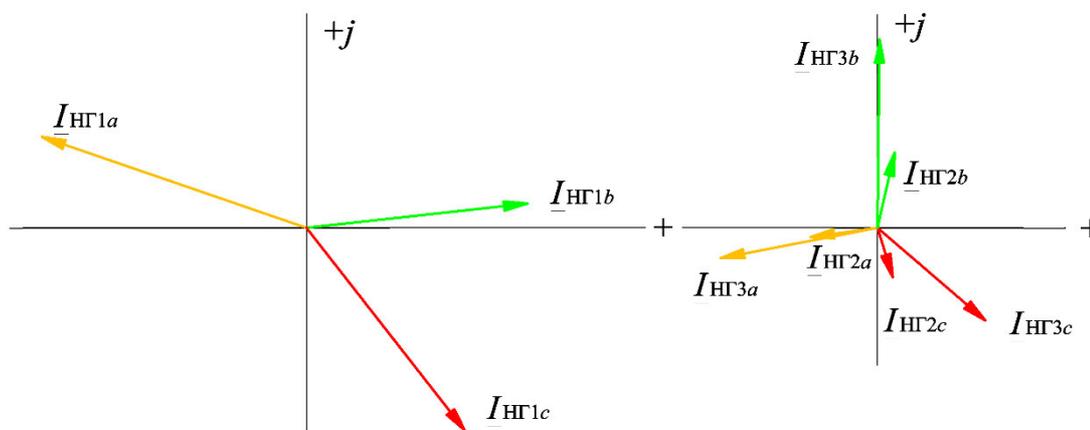


Рисунок 14 – Поиск «скрытого» НП

Из векторной диаграммы на рисунке 14 видна резкая несимметрия трехфазного тока НГ1 и по углу, и по модулю, что позволяет сделать заключение, что это НП. Необходимо сделать вывод о характере потребителей НГ2 и НГ3. Исходя из диаграммы, можно сделать 2 вывода о характере потребителей НГ2 и НГ3:

- это 2 НП;
- это 2 СП, которые потребляют несимметричный ток при несимметрии напряжения в ТОП.

Как следует из данных модели, эти 2 вывода не верны. Изменив активную мощность потребления НГ1 на 60%, получив 2 последовательных измерения трехфазных токов всех присоединений и в ТОП, строятся графики изменения значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ (рисунок 15).

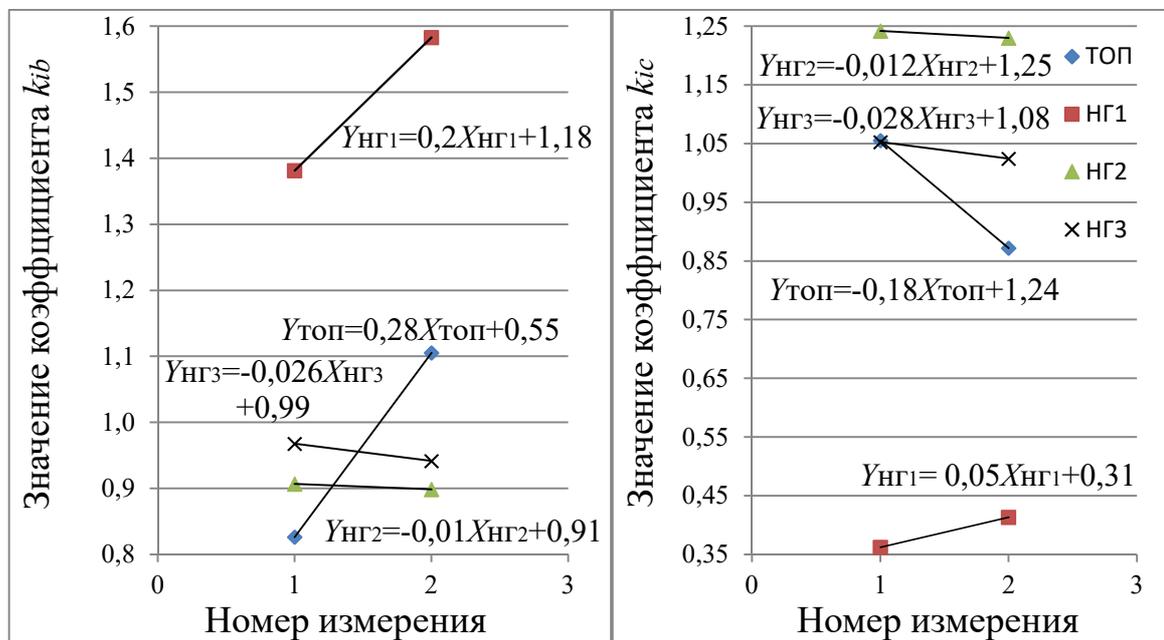


Рисунок 15 – Изменение значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$

Из графиков на рисунке 15 видно, что пересечение аппроксимированных прямых ТОП и НГ3 достигается при значениях $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ 0,96 и 1,05 соответственно. Т.е. СП НГ3 был определен в этом случае с погрешностью 5%. В тоже время НП НГ2 не «скрылся» на фоне более мощного НП НГ1.

Данная серия экспериментов проводилась для 2 наиболее распространенных типов трансформаторов в странах бывшего СССР и Европы – $Y/\Delta - 11 Y/Y - 0$ соответственно.

Характерно, что ИП модели являлась трехфазная розетка 400В, а значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности ИП достигали в отдельных экспериментах 2%. Т.е. работоспособность метода проверялась при неидеальном ИП – в более жестких условиях, чем описанные для модели на рисунке 5.

Вторая среда - математическое моделирование на базе ранее разработанной модели на рисунке 13. Данная среда использовалась для оценки значений всех составляющих абсолютной погрешности Метода поиска НП, зависящей от следующих факторов:

- работы АРКТ, $\delta_{аркт}$ (Эксперимент 1);
- несимметрии напряжения ИП, $\delta_{ип}$ (Эксперимент 2);
- несимметрии сопротивления внешней сети, $\delta_{внш}$ (Эксперимент 3);
- работы резкопеременной нагрузки, $\delta_{ап}$ (Эксперимент 4).

Эксперимент 1 (рисунок 16) показал, что АРКТ не оказывает никакого влияния на работоспособность метода, значения коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ и, следовательно, методическую погрешность. Поскольку значение коэффициента трансформации трансформатора изменяется трехфазно и симметрично, то при рассмотрении отношений фазных токов – коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ – на стороне низкого напряжения НН работа АРКТ не оказывает влияния на их значения, т.е. $\delta_{аркт} = 0$.

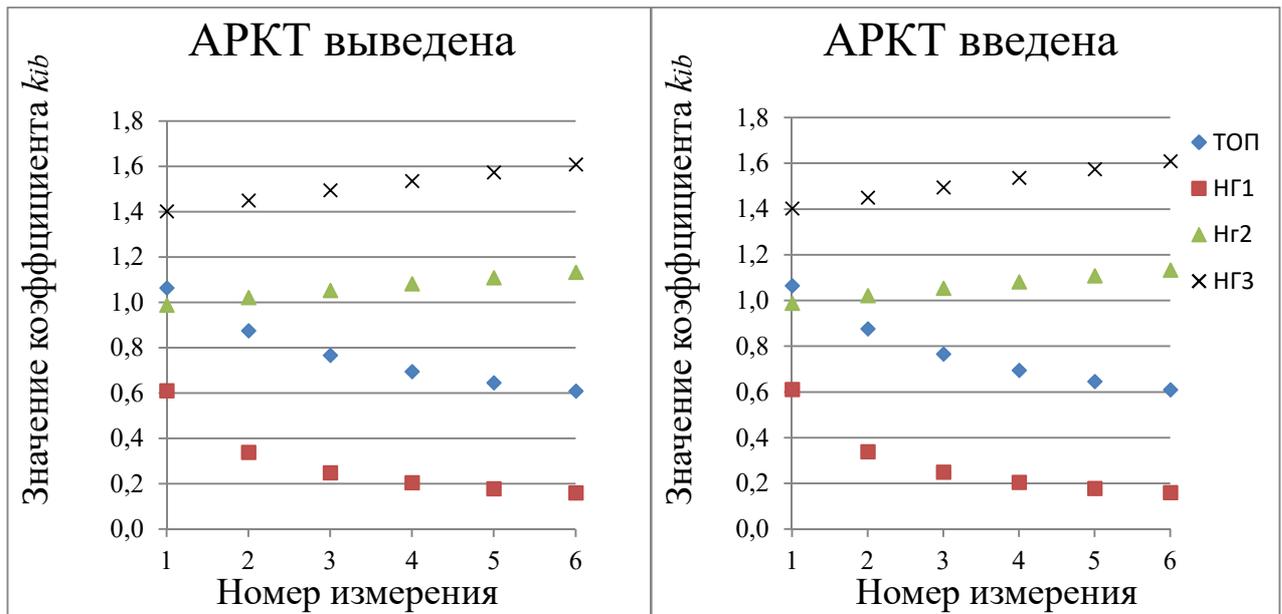


Рисунок 16 – Изменение значений коэффициента $k_{(i,j,ТОП)b}$ в эксперименте 1

Эксперимент 2 показал, что несимметрия ИП оказывает существенное влияние на погрешность метода. Ранее при проведении физических экспериментов значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности не превышали 2%, поэтому погрешность в этих экспериментах была сравнительно низка (5% и менее). При дальнейшем увеличении значений этих коэффициентов в зависимости от соотношения потребления различных фаз нагрузок ПС погрешность метода в математических экспериментах достигала 20%. Однако было обосновано, что в реальности всегда можно принимать напряжение ИП симметричным, т.е. $\delta_{ип} = 0$.

Эксперимент 3 (рисунок 17) показал, что несимметрия сопротивлений внешней сети не вносит дополнительной методической погрешности. Это было доказано и ранее, поскольку условия пересечения функций изменения значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ для СП и НП – уравнения (3) и (5) соответственно – не зависят от значений фазных сопротивлений внешней сети, а, значит, справедливы и при их несимметрии, т.е. $\delta_{вш} = 0$.

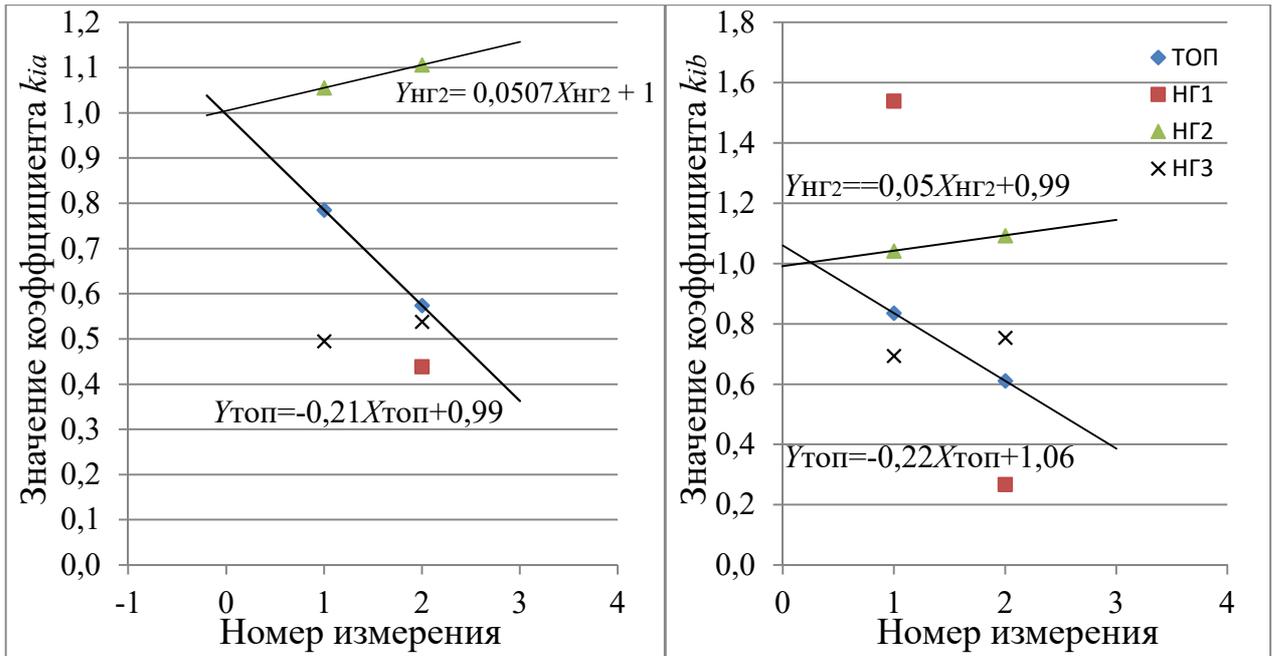


Рисунок 17 – Изменение значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ в эксперименте 3

В 4-ом эксперименте проверялась справедливость линейной аппроксимации двух последовательных значений коэффициентов $k_{(i,j,ТОП)b}$ и $k_{(i,j,ТОП)c}$ в наиболее неблагоприятном случае – неравномерном распределении нагрузки ПС по ее фидерам – когда изменяемая нагрузка потребляет мощность значительно большую, чем любая из остальных нагрузок ПС, и работает по резкопеременному графику. При проведении эксперимента отслеживалось значение коэффициента участия рассматриваемой нагрузки:

$$d = \left| \bar{Z}_{\Phi ik} / \bar{Z}_{\text{э}kj k} \right|, \quad (16)$$

где $Z_{\text{э}jk}$ – это эквивалентное сопротивление всех фидеров ПС, кроме питающего изменяющуюся -ю нагрузку. В эксперименте значение коэффициента изменялось с 1,6 до 12 (доминирующая по мощности нагрузка отключалась).

В завершающей серии экспериментов проверялась работоспособность метода с учетом особенности трансформации несимметричных токов через трансформатор типа $Y/\Delta - 11$, когда токи нулевой последовательности на стороне низкого напряжения (НН) не трансформируются на сторону высокого напряжения (ВН):

$$\begin{aligned} \bar{I}_{iA} &= 1/k_T \cdot (1\angle 30 \cdot \bar{I}_{i2} - 1\angle 150 \cdot \bar{I}_{i1}), \\ \bar{I}_{iB} &= 1/k_T \cdot (1\angle 210 \cdot \bar{I}_{i1} + 1\angle 150 \cdot \bar{I}_{i2}), \\ \bar{I}_{iC} &= 1/k_T \cdot (1\angle 90 \cdot \bar{I}_{i1} + 1\angle 270 \cdot \bar{I}_{i2}), \end{aligned} \quad (17)$$

где I_{iA} , I_{iB} , I_{iC} – значения фазных токов трансформатора на стороне ВН, а \bar{I}_{i1} и \bar{I}_{i2} – значения симметричных составляющих фазных токов трансформатора на стороне НН. В зависимости от возможных соотношений значений токов прямой и обратной последовательности СП,

определяется ширина доверительного диапазона, в границах которого могут изменяться значения коэффициентов по 1, определяемые по выражению:

$$A_{max} = \left| \frac{\bar{Z}_{2 \text{ СП } max}}{\bar{Z}_{2 \text{ СП } min}} \cdot \frac{\bar{I}_2 min}{\bar{I}_1} \right|, \quad (18)$$

где A_{max} – размах плеча доверительного диапазона, $Z_{2 \text{ СП } max}/Z_{2 \text{ СП } min}$ – соотношение максимального и минимального значения сопротивления СП обратной последовательности в долях от сопротивления прямой. Расчеты показывают, что в самом неблагоприятном случае, когда значение напряжения обратной последовательности достигает 10-12% значения напряжения прямой последовательности в ТОП, а сопротивление комплексной нагрузки обратной последовательности минимально, значение по (18) не превышает 0,2, что подтверждено экспериментально на *Matlab*-модели. Т.е., погрешность метода, $\delta_{м(Y/\Delta)}$, в этом случае составляет:

$$\delta_{м(Y/\Delta)} = \frac{A_{max}}{1} \cdot 100\% = \frac{0,2}{1} \cdot 100\% = 20\%, \quad (19)$$

Таким образом, в схеме с трансформатором типа $Y/Y-0$ значение составляющей методической погрешности не превышает 8%, а с трансформатором типа $Y/\Delta-11$ – 20%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработана методика поиска несимметричных потребителей ПС и оценки их фактического вклада в искажение симметрии напряжения в точке общего присоединения ПС, для чего были решены следующие задачи:

1) Проведен подробный анализ существующих подходов оценки фактического вклада, позволивший определить границы их применимости на практике в современных условиях неполноты исходных данных для анализа. Было показано, что дефицит исходных данных существенно ограничивает практическое применение существующих методов, что оправдывает усилия на разработку методики, работоспособной в описанных условиях. Для этого на первом этапе было рассмотрено два варианта установки средств измерений: в границах рассматриваемой ПС и за ее пределами. При равном количестве средств измерений для обоих случаев их установка в границах ПС технически проще, поскольку требует обеспечения синхронности измерений на сравнительно малых расстояниях (сотни метров). При подобной установке в наихудшем случае известны лишь токи во всех ветвях схемы замещения Тевенина ПС и напряжение в точке общего присоединения. Обосновано, что значения сопротивлений и ЭДС в схеме в худшем случае неизвестны, т.е. обоснована низкая наблюдаемость рассматриваемой ЭС и ПС в самом общем случае.

2) Разработана математическая модель, описывающая одиночную ПС в ЭС, электрически удаленную несимметричным сопротивлением внешней сети от симметричного источника питания. Доказана возможность применения этой модели для любой ПС в доказана

справедливость линеаризации функций фазных токов во всех ветвях эквивалентной электрической схемы замещения ПС, позволяющей повысить наблюдаемость ЭС в части оценки ее режимов работы.

3) Разработан Метод поиска несимметричных потребителей ПС, использующий в качестве исходных данных измеренные значения трехфазных токов фидеров ПС и тока в точке общего присоединения, а в качестве инструмента – ранее обоснованную возможность линейной аппроксимации их значений. Приведено математическое доказательство разработанного метода и определены условия его работоспособности. Применение метода позволило составить схему замещения Тевенина ПС обратной и нулевой последовательности, которая в дальнейшем используется для оценки фактических вкладов всех несимметричных потребителей в искажение симметрии напряжения в точке общего присоединения.

4) Описан набор параметров несимметричного потребителя, влияющих на значение его фактического вклада в несимметрию напряжения в точке общего присоединения при условии избытка исходных данных – избыточной наблюдаемости ЭС. Разработан метод оценки фактического вклада, учитывающий описанные параметры, но требующий меньше исходных данных.

5) Для возможности проверки предложенных в работе подходов была разработана библиотека математических моделей в среде *Matlab*, позволяющая смоделировать ПС или ЭС произвольной конфигурации.

6) Поскольку разработка Метода поиска несимметричного потребителя потребовала внесения допущений, возникла необходимость его оценки. На физической модели был проведен ряд экспериментов, подтверждающий его концептуальную работоспособность. На математической модели была проведена оценка погрешности метода в широком диапазоне изменения параметров схемы замещения Тевенина ПС с двумя наиболее распространенными типами трансформаторов в РФ (СНГ) и странах Европы (Y/Y и Y/Δ соответственно). Показано, что в типовых отечественных сетях методологическая погрешность не превышает 20%, а в странах Европы – 8%, что в условиях низкой наблюдаемости ЭС является допустимой ошибкой.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК

- 1) Дворкин Д.В., Силаев М.А., Тульский В.Н., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электрической энергии – Электричество. Москва – 2017. – №7. – С. 12-19.
- 2) Дворкин Д.В., Тульский В.Н., Палис Ш. Ранжирование потребителей по степени влияния на несимметрию напряжения в условиях дефицита исходных данных – Электричество. Москва – 2018. – №8. – С. 18-23.

Публикации во всероссийских конференциях, международных конференциях IEEE и IOP, в базах данных Scopus и Web of Science:

- 1) Дворкин Д.В., Тульский В.Н. Наблюдаемость энергосистемы // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва): Тез. д., Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017, с. 312.
- 2) I.S. Metelev, D.V. Dvorkin, R.G. Isakov. “Different load types modelling using MatLab”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering – IOP Publishing, Vol. 240, 2017.
- 3) D. Dvorkin, S. Palis, M. Silaev, V. Tulsy. “Balanced Load Identification Based On The Correlation Of The Phase Currents” – IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) – Riga Technical University, 12-13 Oct., 2017.
- 4) D. Dvorkin, V. Tulsy. Practical useless of methods of consumer actual impact estimation into power quality distortions at the point of common coupling // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать четвертая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов 15-16 марта 2018 г., М.: Тез. докл. – М.: ООО «Центр полигр. услуг “Радуга”», 2018. — с. 1017.

Подписано в печать _____ 2018 г. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в копировальном центре «Реглет копи-центр», 111116, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.19.