

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Гаврилова Альбина Евгеньевна

**РАСЧЕТ НАИМЕНЬШЕГО ПРЕДЕЛЬНОГО ПЕРЕТОКА ПО
СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЗАДАННОМ СЕЧЕНИИ
НА ОСНОВЕ ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ**

2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Уральского энергетического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры электроэнергетики транспорта;

Сацук Евгений Иванович, доктор технических наук, доцент, АО «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Москва, начальник Службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики;

Неуймин Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы», г. Санкт-Петербург, начальник центра моделирования и автоматизации управления энергосистемами.

Защита состоится 11 декабря 2024 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.10.26 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=6497>

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Самойленко Владислав Олегович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для надежного функционирования электроэнергетической системы необходимо обеспечение статической и динамической устойчивости. Согласно действующим нормативным документам, для обеспечения устойчивости энергосистемы должны использоваться значения перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (КС). Под сечением понимается совокупность сетевых элементов одной или нескольких связей, соединяющих две части энергосистемы. Для КС максимально допустимые (МДП) и аварийно допустимые перетоки (АДП) активной мощности определяются на основании расчетов установившихся электроэнергетических режимов, статической устойчивости и динамической устойчивости. Если перетоки активной мощности в КС не превышают допустимых значений при соблюдении требований к другим параметрам режима (к частоте, токам, напряжениям), то может быть сделан вывод об устойчивом состоянии энергосистемы.

Для определения допустимых перетоков производится расчет предельного перетока по различным критериям: по критерию статической аperiodической устойчивости, динамической устойчивости, по критерию допустимых токовых нагрузок, а также по другим нормативным условиям. Минимальная из величин, полученных по разным критериям с учетом нормативного запаса, является допустимым перетоком в КС.

Согласно действующей нормативно-технической документации (НТД), для определения допустимого перетока по критерию статической аperiodической устойчивости необходимо рассчитывать предельный переток в КС методом последовательного утяжеления режима в направлении траектории утяжеления, т.е. в направлении вектора изменения режима (ВИР). Траектория утяжеления (или ВИР) – это множество узлов, в которых осуществляется изменение параметров режима (нагрузки, генерации), приводящее к увеличению перетока активной мощности в КС. Основная методическая сложность определения предельного перетока в КС связана с тем, что его значение может существенно зависеть от траектории утяжеления. Для того, чтобы гарантировать обеспечение статической устойчивости в рассматриваемом КС, необходимо выбрать такую траекторию утяжеления, которая приведет к получению наименьшего предельного перетока в КС. В соответствии с Правилами определения МДП и АДП в контролируемых сечениях, необходимо рассматривать не менее трех различных траекторий утяжеления для определения наименьшего предельного перетока.

Процесс выбора ВИР является эмпирическим поиском, вследствие чего для абсолютно достоверного определения требуемой траектории утяжеления необходимо перебрать все возможные варианты. Учитывая размеры существующих объединенных энергосистем, оптимальность ВИР (т. е. гарантия того, что режим, найденный с помощью ВИР, является режимом с наименьшим предельным перетоком активной мощности в КС) зависит от опыта и профессионализма технолога, выполняющего расчет. Стоит также учитывать, что в ремонтных схемах выбранный ВИР может отличаться от найденного для нормальной схемы, что дополнительно увеличивает количество расчетов. Таким образом, возникает необходимость в оптимизации процесса поиска наименьшего предельного перетока активной мощности в КС по критерию статической аperiodической устойчивости без эмпирического поиска ВИР.

Степень научной разработанности темы исследования. Большой вклад в исследование проблемы поиска предельных режимов внесли отечественные ученые Веников В.А., Идельчик В.И., Конторович А.М., Крюков А.В., Давыдов В.В., Неуймин В.Г. и др.

На сегодняшний день наравне с практическими методами определения предельных перетоков с помощью изменения параметров электрического режима с помощью ВИР существуют и другие: методы поиска предельного режима на основе аналитических уравнений предельного режима и на основе нелинейного программирования. Авторы этих исследований фокусируются на поиске ближайшего предельного режима энергосистемы без привязки к конкретным контролируемым сечениям. Методы глубоко теоретически проработаны и имеют большую научную значимость. При этом, на сегодняшний день их сложно интегрировать в современное оперативно-диспетчерское управление из-за разницы

подходов к управлению режимами, так как в практической деятельности основное внимание уделяется диспетчеризации заранее определенных контролируемых сечений. В связи с этим становится актуальной разработка метода, который позволяет найти наименьший переток в заданном контролируемом сечении без использования ВИР.

В зарубежной практике основным методом поиска предельных режимов является Continuation Power Flow (CPF), который является модификацией метода утяжеления режима на основе ВИР. Основным отличием CPF является видоизменённая вычислительная процедура, состоящая из нескольких этапов (предиктора и корректора), которые направлены на улучшение вычислительных характеристик. Основные направления исследования в области CPF связаны с увеличением быстродействия и численной устойчивости метода. При этом игнорируется, как и на какую величину необходимо изменять параметры режима (аналог ВИР). Подобный подход развивался в рамках простых конфигураций энергосистем и плохо подходит для отечественных сложно-замкнутых сетей высокого напряжения.

Одно из наиболее интересных направлений исследований кафедры Автоматизированных электрических систем УрФУ связано с применением потоковой модели, которая обладает повышенной устойчивостью к проблеме плохой обусловленности уравнений установившегося режима. По этой причине именно потоковая модель расчета установившегося режима была взята за основу проводимых исследований.

Целью работы является разработка метода поиска предельного режима в заданном сечении с применением потоковой модели установившегося режима.

Задачи исследования:

- анализ существующих методов поиска предельного режима;
- разработка метода поиска наименьшего предельного перетока в заданном сечении;
- оценка возможности применения потоковой модели в задаче поиска предельного перетока;
- анализ вычислительных характеристик предложенного метода и доработка алгоритма для повышения скорости вычисления и улучшения численной сходимости.

Объектами исследования являются методы поиска предельного режима в контролируемых сечениях для сложноразветвленных высоковольтных электрических сетей.

Научная новизна работы:

- разработан метод поиска предельного режима в заданном сечении с наименьшим значением перетока активной мощности без задания траектории утяжеления режима;
- показаны возможность и эффективность применения потоковой модели для задачи поиска предельного режима;
- предложен подход прямого использования критерия равенства нулю определителя матрицы Якоби уравнений установившегося режима потоковой модели в предельном режиме;
- разработаны способы ускорения метода поиска предельного режима в заданном сечении на основе потоковой модели установившегося режима.

Теоретическая значимость работы. Работа направлена на развитие потоковой модели для поиска предельного режима в энергосистеме.

Практическая значимость работы. Метод поиска предельного режима, разработанный в ходе исследования, может быть использован технологами в процессе расчета МДП и АДП для оперативно диспетчерского управления, что позволяет формализовать расчет и не требует выбора траектории утяжеления режима, которая задается на основе опыта специалиста.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались с помощью методов математического моделирования электроэнергетических систем, методов нелинейного программирования. Метод поиска предельного режима разработан в программной среде MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение потоковой модели установившегося режима электрической сети для поиска предельного режима;
2. Постановка задачи для поиска предельного режима в заданном сечении на основе нелинейного программирования;
3. Явное применение критерия равенства нулю определителя матрицы Якоби в постановке задачи нелинейного программирования с использованием формулы производной от определителя;
4. Модифицированный численный метод поиска предельного режима с улучшенными вычислительными характеристиками.

Личный вклад автора заключается в применении потоковой модели для алгоритма поиска предельного режима в заданном сечении, в выполнении программной реализации предлагаемого метода и в адаптации метода для схем большой размерности.

Достоверность результатов подтверждается сопоставлением результатов расчета наименьшего предельного перетока в заданном сечении с помощью предлагаемого метода и с помощью традиционного метода последовательного утяжеления.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

- Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – Красноярск-2023;
- Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC) – Екатеринбург 2023;
- 96-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики».

Основные положения работы рассматривались на ежегодных научных семинарах кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИН УрФУ, г. Екатеринбург, в период с 2020 года по 2024 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 1 статья в зарубежном издании, входящем в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографического списка из 107 наименований. Содержит 113 страниц, 25 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и основные задачи исследования, приведены научная новизна и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор отечественных и зарубежных работ по поиску предельных режимов. Рассматривая методы поиска предельных режимов, можно выделить 3 основные группы методов:

- 1) методы последовательного утяжеления;
- 2) аналитический метод поиска на основе уравнений предельных режимов;
- 3) методы поиска на основе нелинейного программирования.

Методы последовательного утяжеления

Метод последовательного утяжеления режима является традиционным способом поиска предельного режима в заданном сечении. Утяжеление производится по заранее заданной траектории утяжеления. Критерием нахождения предельного режима является сходимость расчета режима.

В НТД Системного Оператора ЕЭС даны рекомендации по определению параметров и траектории утяжеления. При проведении утяжеления электроэнергетического режима необходимо рассматривать не менее трех разных траекторий утяжеления для рассматриваемого КС и различающихся перераспределением активной (реактивной) мощности между узлами расчетной модели, находящимися по разные стороны от рассматриваемого КС. В качестве расчетной траектории утяжеления должна приниматься траектория утяжеления, которой соответствует наименьший предельный по статической устойчивости переток активной мощности в контролируемом сечении.

Аналогом последовательного утяжеления режима в заданном направлении утяжеления в зарубежной практике является метод Continuation Power Flow. В данном методе в отличие от принятого в отечественной практике метода шаг утяжеления не является постоянной величиной, а само утяжеление производится путем последовательного выполнения так называемых шагов «predictor» и «corrector».

Аналитический метод поиска на основе уравнений предельных режимов

В отечественной литературе существует аналитический метод поиска на основе уравнений предельных режимов. В данном подходе на основании аналитически непредставимого выражения условия наступления предельного по устойчивости режима (1) и уравнений установившегося режима выводятся аналитически представимые уравнения предельных режимов (УПР) (2):

$$\det \frac{\partial W}{\partial X} = 0, \quad (1)$$

где $\frac{\partial W}{\partial X}$ – матрица Якоби, отвечающая правым частям системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в ЭС при малых возмущениях. Здесь и далее \det – функция взятия определителя матрицы.

$$\begin{cases} F[X, T(t)] = 0, \\ V[X, S, Y(t)] = \frac{\partial W}{\partial X} S = 0, \\ U(S) = S^T S - 1 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $Y(t) = Y_0 + T \cdot \Delta Y$, Y_0 – соответствует исходному режиму, ΔY – направление утяжеления, T – величина утяжеления. Здесь и далее Δ – обозначение приращения переменной.

Новая форма записи УПР использует собственный вектор S матрицы $\frac{\partial W}{\partial X}$. Для решения системы уравнений (2) предлагается использовать метод Ньютона, на каждом шаге итерации которого решается следующая система линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X} & 0 & \frac{\partial F}{\partial T} \\ \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial S} & \frac{\partial V}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta S \\ \Delta T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta V \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица Якоби такой системы уравнений в точке решения невырождена, что является важной особенностью УПР.

В связи с тем, что традиционный метод контроля перетоков в контролируемых сечениях имеет недостатки, аналитические уравнения предельных режимов применяются к теоретическому подходу, заключающемуся в поиске ближайшего предельного режима в целом в ЭС. В этом случае понятие запаса рассматривается как наименьшее расстояние в масштабированном пространстве Y от точки анализируемого режима до предельной поверхности. Выводится критерий близости текущего режима к предельному, которым является геометрическая длина вектора коэффициентов запаса между текущим и предельным режимами.

Аналитический метод, аналогичный уравнениям предельного режима (2) также представлен и в зарубежной литературе. Данный метод относится к прямым методам, к классу Saddle-Node Bifurcation.

Методы поиска на основе нелинейного программирования

Говоря об отечественной литературе, можно отметить методы, основанные на нелинейном программировании для поиска предельного режима (НЛПР). Данная группа методов представляет собой развитие традиционного метода последовательного утяжеления режима. Отличительной особенностью является то, что поиск осуществляется не с помощью утяжеления, а с помощью применения нелинейного программирования. При этом искомой минимизируемой величиной выступает шаг утяжеления, на который необходимо изменить текущий режим, чтобы найти предельный.

Необходимо найти минимум целевой функции

$$\min -t, \quad (4)$$

при условии

$$F(X, Y + t \cdot \Delta Y) = 0, \quad (5)$$

где F – вектор невязок уравнений узловых напряжений;

X – вектор параметров режима, состоящий из углов напряжений всех узлов сети (кроме базисного узла) и модулей напряжений PQ -узлов;

Y – вектор параметров режима, состоящий из активных и реактивных мощностей в каждом узле нагрузки и активных мощностей в генераторных узлах;

t – коэффициент, характеризующий расстояние от исходного установившегося режима до предельного в направлении вектора утяжеления ΔY режима,

Δ – обозначение приращения переменной.

Таким образом, выполняется поиск такого максимального шага t , при котором режим будет существовать, т. е. невязки уравнений узловых напряжений равны нулю.

Достоинством метода является лучшая точность определения границы области существования режима и меньшее число итераций при поиске предельного режима. Среди недостатков можно отметить зависимость полученного предельного режима от заданной траектории утяжеления ΔY . Для устранения данного недостатка был разработан НЛПР-Бр метод нелинейного программирования в L_p -нормах, в котором исключается необходимость задания в качестве исходных данных определенного ВИР.

Аналог НЛПР метода также имеется в зарубежной литературе. Данный метод в иностранной классификации относится к группе простых методов, к классу методов на основе нелинейного программирования.

Можно также отметить, что существует большое разнообразие методов поиска предельного режима на основе нелинейного программирования, которое применяется для различных целей: для увеличения пропускной способности сети, для увеличения границы устойчивости с помощью перераспределения загрузки генераторов, для поиска предельного режима, ближайшего к текущему, для ввода режима в допустимую область.

Обобщая различные существующие методы поиска предельных режимов, можно отметить, что предлагаемые методы концентрируются на поиске ближайшего предельного режима в целом в энергосистеме, не рассматривая при этом конкретные КС.

Учитывая тот факт, что основным принципом управления электроэнергетическим режимом является контроль перетоков активной мощности в основных КС, актуальность предлагаемого метода заключается в поиске предельного режима именно в заданном КС, а не в целом в энергосистеме. Кроме того, предлагаемый метод дает возможность автоматического определения наименьшего предельного перетока для дальнейшего поиска МДП и АДП.

Во второй главе представлено описание разработанного метода. Предлагаемый метод основан на решении задачи нелинейного программирования с минимизацией целевой функции при наличии ограничений типа равенств и типа неравенств. В качестве целевой функции выступает сумма перетоков активной мощности по линиям, входящим в КС:

$$OF = \min(\sum P_{ij}), \quad i \in \alpha_1, j \in \alpha_2, \quad (6)$$

где $\alpha_1(\alpha_2)$ – множество узлов, которые являются узлами начала (конца) ветвей, входящих в КС, под α_1 понимаются узлы, входящие в избыточную часть энергосистемы, под α_2 понимаются узлы, входящие в приемную часть энергосистемы, P_{ij} – переток активной мощности по ветви $i-j$, входящей в КС.

Ограничения в форме равенства:

- все переменные X должны соответствовать уравнениям установившегося режима (УУР):

$$F(X) = 0, \quad (7)$$

где $F(X)$ – вектор невязок УУР, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – вектор переменных режима, состав которых зависит от формы записи уравнений установившихся режимов.

- определитель матрицы Якоби $\det J(X)$ системы УУР (7)(7), описывающих режим, равен нулю, что соответствует предельному режиму ЭЭС:

$$\det J(X) = 0. \quad (8)$$

Ограничения в форме неравенства:

- мощности узлов генерации имеют верхнюю и нижнюю границы. Верхняя граница обусловлена установленной мощностью генерирующего оборудования. Нижняя граница – 0. В качестве допущения на текущем этапе исследований принимается, что генераторы в узле могут работать при мощности в диапазоне от 0 до установленной:

$$0 \leq P_{gen i} \leq P_{gen i max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PV}, \quad (9)$$

- мощности узлов нагрузки имеют верхний и нижний пределы, обусловленные графиком потребления или иными технологическими ограничениями, определяемыми технологом, выполняющим расчет:

$$P_{ni min} \leq P_{ni} \leq P_{ni max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ}, \quad (10)$$

- предельный режим в КС между энергосистемой №1 и энергосистемой №2 может быть достигнут как в направлении от ЭС1 к ЭС2, так и от ЭС2 к ЭС1, поэтому необходимо задать дополнительное ограничение на направление перетока мощности в каждой линии, входящей в КС:

$$P_{ij} \geq 0, \quad i \in \alpha_1, j \in \alpha_2. \quad (11)$$

Задачу предлагается решать методами нелинейного программирования. Ограничения в форме равенства учитываются с помощью метода Лагранжа. Ограничения в форме неравенства учитываются с помощью метода внутренней точки.

Исходными известными данными для работы алгоритма являются:

- параметры схемы замещения электрической сети;
- наличие в сети балансирующего узла;
- диапазоны по активной и реактивной мощности генерации и нагрузки в узлах электрической сети.

Кроме того, исходной информацией является также и тот факт, что рассматриваемое КС может являться критическим сечением, т.е. в нем может происходить нарушение статической устойчивости. Под критическим сечением понимается такое сечение в ЭС, по которому наступает нарушение статической аperiodической устойчивости ЭС при переходе через предельный режим. Применение алгоритма возможно только для сечений, которые могут быть критическими в данной схеме.

Особенности потоковой модели уравнений установившегося режима

На сегодняшний день наибольшее распространение для расчета установившихся режимов получили уравнения узловых напряжений (УУН) в форме баланса мощностей в полярных координатах:

$$P_k(P_k, V, \delta) = P_k - V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in A_k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) = 0, \quad (12)$$

$$k \in A_{PV} \cup A_{PQ},$$

$$Q_k(Q_k, V, \delta) = Q_k + V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{\substack{m \in A_k \\ k \in A_{PQ}}} V_m (B_{km} \cos \delta_{km} - G_{km} \sin \delta_{km}) = 0, \quad (13)$$

где неизвестными являются V и δ – модули и углы напряжений узлов, A_k – множество узлов, смежных с узлом k , A_{PQ} , A_{PV} – множества узлов соответственно типа PQ и PV .

При решении такой системы УУН методом Ньютона применяется линеаризация, в ходе которой функция синуса и косинуса заменяется линейной аппроксимацией. Известно, что вблизи предельных режимов линейная система уравнений на шаге итерации метода Ньютона плохо обусловлена, и наблюдается численная неустойчивость.

Существуют альтернативные системы уравнений, описывающие установившийся режим. На кафедре «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ УрФУ предложена потоковая модель установившегося режима. В качестве неизвестных принимаются потоки активной и реактивной мощности в ветвях, а также модули узловых напряжений. Для потоковой модели система уравнений установившегося режима состоит из трех групп: уравнения балансов узлов по активной и реактивной мощности (14), (15), уравнения падения напряжения для каждой линии (18), (19) и дополнительных контурных уравнений (20).

Уравнения баланса узлов по активной и реактивной мощности:

$$P(P^H, Q^H, V) = \sum_{i=1,2,\dots,N_{PQ}+N_{PV}} (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^H - \Delta P_{ki}) + P_i + V_i^2 G_i = 0, \quad (14)$$

$$Q(P^H, Q^H, V) = \sum_{i=1,2,\dots,N_{PQ}} (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}) + Q_i + V_i^2 B_i = 0, \quad (15)$$

где N_{PQ} – число PQ узлов в схеме; N_{PV} – число PV узлов в схеме;

$\sum(P_{ij}^H)$ и $\sum(Q_{ij}^H)$ ($\sum(P_{ij}^K)$ и $\sum(Q_{ij}^K)$) – сумма активных и реактивных мощностей, которые вытекают из узла i (втекают в узел i) по ветвям;

P_i и Q_i – активная и реактивная мощность узла i ;

ΔP_{ki} и ΔQ_{ki} – потери активной и реактивной мощности в ветвях:

$$\Delta P_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} R_{ki}, \quad (16)$$

$$\Delta Q_{ki} = \frac{P_{ki}^H{}^2 + Q_{ki}^H{}^2}{V_k^2} X_{ki}. \quad (17)$$

Уравнения падения напряжения для каждой из M линии:

$$\sqrt{(V_k - \Delta V_{ki}')^2 + (\Delta V_{ki}'')^2} - V_i = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, M, \quad (18)$$

где продольная $\Delta V_{ki}'$ и поперечная $\Delta V_{ki}''$ составляющие падения:

$$\Delta V_{ki}' = \frac{P_{ki}^H \cdot R_{ki} + Q_{ki}^H \cdot X_{ki}}{V_k}, \quad \Delta V_{ki}'' = \frac{P_{ki}^H \cdot X_{ki} - Q_{ki}^H \cdot R_{ki}}{V_k}. \quad (19)$$

Дополнительные уравнения для системы для всех L независимых замкнутых контуров:

$$\sum \arctan\left(\frac{\Delta V_{ki}''}{V_k - \Delta V_{ki}'}\right) = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, L. \quad (20)$$

Исходные данные как для УУН, так и для потоковой модели, одинаковы. Несмотря на то, что неизвестные переменные в УУН и для системы уравнений потоковой модели (14)–(20) отличаются, результатом расчета является один и тот же режим.

Главным отличием потоковой модели режима от УУН является исключение из числа переменных углов напряжений, что делает линеаризованную систему на шаге итерации Методом Ньютона гораздо лучше обусловленной.

В связи с этим в статье для поиска предельного режима использованы уравнения режима в форме потоковой модели.

Необходимость дополнительного ограничения на перегружаемое сечение

При применении алгоритма в вышеуказанной формулировке было выявлено, что данных ограничений недостаточно: не всегда минимальный переток в сечении является гарантией того, что предельный режим был найден в заданном сечении. Для примера рассмотрим следующую ситуацию (рисунок 1).

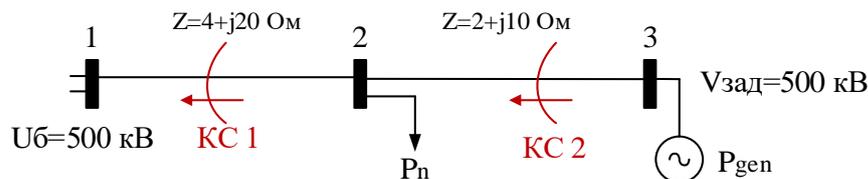


Рисунок 1 – Схема сети

Предположим, что требуется найти предельный переток в КС 1. При вышеописанной математической постановке задачи алгоритм найдет предельный режим при максимальной нагрузке генератора в узле 3 и максимальной нагрузке потребителя в узле 2. При этом переток в КС 1 будет нулевым (минимально возможным по условию (8)). Данный режим представлен на рисунке 2.

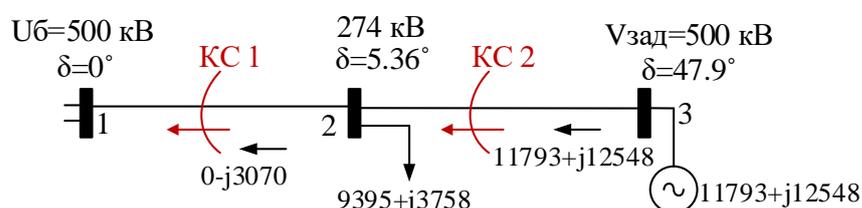


Рисунок 2 – Результат работы алгоритма при отсутствии ограничения на опасное сечение

В найденном режиме предел по статической устойчивости был достигнут в КС 2, а не в КС 1, как этого требовала постановка задачи. В связи с этим требуется применение дополнительного критерия, который должен учитывать, в каком именно сечении был достигнут предельный режим, иначе говоря, является ли рассматриваемое сечение критическим.

В литературе существуют методы определения критического сечения. Среди наиболее распространенных можно отметить следующие: метод, основанный на анализе фазовых углов напряжений, метод на основе анализа правого собственного вектора матрицы Якоби и метод на основе точки минимального напряжения.

Одним из стандартных методов определения критического сечения является метод, основанный на анализе углов напряжений. В данном методе анализируются разности углов напряжений по всем линиям. В качестве критического сечения принимается то, у ветвей которого разность углов напряжений по концам максимальна.

С учетом ограничения на разность углов по линиям алгоритм, примененный для вышеприведенного примера, дает результат, показанный на рисунке 3 (ограничение на разность углов предполагает, что разность углов напряжений по линии 1–2 должна быть больше, чем по линии 2–3).

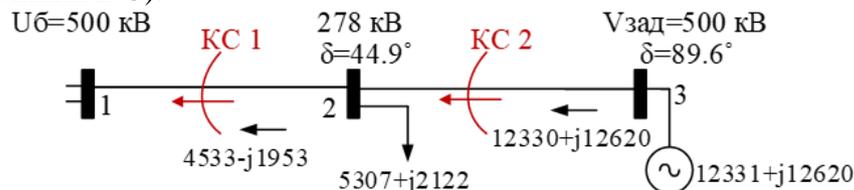


Рисунок 3 – Результат работы алгоритма при наличии ограничения на разность углов

В данном случае найденный предельный режим действительно достигается в рассматриваемом КС1. Следовательно, в качестве ограничения в форме неравенства необходимо добавлять также ограничение на перегружаемое сечение, включающее попарное сравнение разностей углов по линиям:

$$\begin{aligned}
 \delta_i - \delta_j &> \delta_k - \delta_m, \\
 i \in \beta_1, \quad j \in \beta_2, \quad k \in \beta_3, \quad m \in \beta_4,
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

где β_1 (β_2) – множество узлов, которые являются узлами начала (конца) ветвей, *входящих в КС*, β_3 (β_4) – множество узлов, которые являются узлами начала (конца) ветвей, *не входящих в КС*, $\delta_i - \delta_j$ – разности углов по линиям, входящим в сечение, $\delta_k - \delta_m$ – разности углов по линиям, не входящим в сечение.

Метод на основе анализа матрицы Якоби заключается в том, что критическим сечением является совокупность линий с наибольшими разностями компонент правого собственного вектора матрицы коэффициентов системы малых колебаний. В связи с необходимостью поиска такого вектора, данный метод не может быть использован в предлагаемом алгоритме на основе нелинейного программирования.

Метод на основе точки минимального напряжения (ТМН) заключается в том, что на линиях, входящих в критическое сечение, располагается точка минимального напряжения, которая стремится к электрическому центру качаний по мере развития асинхронного хода при развороте напряжений по концам линий критического сечения. Для линий можно определить коэффициент опасного сечения (мера удаления ТМН от начала линии) и напряжение в ТМН. Данный метод, по сравнению с методом на основе разности углов по линиям, требует введения в предлагаемый алгоритм поиска предельного режима большего числа ограничений, кроме того, дает неоднозначные результаты в крайних точках ветви (когда ТМН находится в узле).

Таким образом, для применения в разработанном алгоритме поиска предельного режима с наименьшим перетоком мощности в заданном сечении был выбран метод на основе разности углов напряжений, т.к. его возможно применить в процедуре нелинейного программирования в качестве ограничения в виде неравенства.

В результате применения потоковой модели к целевой функции (6) активные мощности по линиям сечения представляется в виде активных мощностей начала и конца ветвей. Перетоки активной мощности в конце ветви выражаются через перетоки активной мощности в начале ветви с учетом потерь (16).

Таким образом, итоговое математическое представление разработанного алгоритма выглядит следующим образом:

$$OF = \sum_{a \in \gamma_1, b \in \gamma_2} P_{ab}^H + \sum_{c \in \gamma_3, d \in \gamma_4} \left(P_{cd}^H - \frac{P_{cd}^{H^2} + Q_{cd}^{H^2}}{V_c^2} R_{cd} \right), \quad (22)$$

где γ_1 (γ_2) – множество узлов, которые являются узлами начала (конца) ветвей, входящих в КС, учитываемые в целевой функции перетоком активной мощности в условном *начале* ветви; γ_3 (γ_4) – множество узлов, которые являются узлами начала (конца) ветвей, входящих в КС, учитываемые в целевой функции перетоком активной мощности в условном *конце* ветви; P_{ab}^H (P_{cd}^H) – активная мощность начала ветви, входящей в контролируемое сечение и учитываемой с перетоком в начале (конце) ветви, Q_{cd}^H – реактивная мощность начала ветви, входящая в контролируемое сечение и учитываемая с перетоком в конце ветви, R_{cd} – активное сопротивление ветви, входящей в сечение, V_c – напряжение в начале ветви cd . Каждая ветвь, входящая в заданное сечение, для которого осуществляется поиск наименьшего предельного перетока, учитывается в целевой функции один раз – или с помощью перетоков начала ветви, или с помощью перетоков конца ветви.

При ограничениях в форме равенства:

– на уравнения установившегося режима:

$$\sum (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^H - \Delta P_{ki}) + P_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} + N_{PV}; \quad (23)$$

$$\sum (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}) + Q_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ}; \quad (24)$$

$$\sqrt{(V_k - \Delta V_{ki}')^2 + (\Delta V_{ki}'')^2} - V_i = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, M; \quad (25)$$

$$\sum \arctan \left(\frac{\Delta V_{ki}''}{V_k - \Delta V_{ki}'} \right) = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, G; \quad (26)$$

– на равенство нулю определителя матрицы Якоби:

$$\det J(X) = 0. \quad (27)$$

При ограничениях в форме неравенства:

– по генерации и нагрузке в узлах:

$$0 \leq P_{gen\ i} \leq P_{gen\ i\ max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PV}, \quad (28)$$

$$P_{n\ i\ min} \leq P_{n\ i} \leq P_{n\ i\ max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ}, \quad (29)$$

– на направление перетока мощности в каждой линии, входящей в КС:

$$P_{ij}^H \geq 0, \quad i \in \alpha_1, \quad j \in \alpha_2, \quad (30)$$

– на то, чтобы перегружаемым сечением было заданное сечение:

$$\delta_i - \delta_j > \delta_k - \delta_m, \quad (31)$$

$$i \in \beta_1, \quad j \in \beta_2, \quad k \in \beta_3, \quad m \in \beta_4.$$

Формулировка задачи поиска наименьшего предельного перетока в терминах нелинейного программирования

В процедуре нелинейного программирования неизвестными переменными являются активная мощность генераторов и нагрузок. Ограничения в форме равенства учитываются с использованием метода Лагранжа. Ограничения в форме неравенства учитываются с использованием метода внутренней точки. Целевая функция с добавлением ограничений равенства и неравенства:

$$OF_c = OF + \sum_{i=1}^N \lambda_i^h \Delta F_i(X) + \sum_{j=1}^M \lambda_j^g (g_j(X) + s_j) - \mu \sum_{j=1}^M \ln s_j + \lambda_{N+1}^h \det J(X), \quad (32)$$

где λ_i^h, λ_j^g – множители Лагранжа, соответствующие ограничениям в форме равенства и неравенства, s_j – вспомогательные переменные, связывающие ограничения в форме неравенств непосредственно с целевой функцией, μ – барьерный параметр, пересчитываемый на каждой итерации, $g(X)$ – ограничения в форме неравенства, λ_{N+1}^h – множитель Лагранжа, соответствующий ограничению в форме равенства на определитель матрицы Якоби.

В ходе поиска экстремума (32) на каждой итерации решаются следующие линейные алгебраические уравнения:

$$\left(\begin{array}{ccccc} \frac{d\nabla_x OF_c}{dX} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda^h} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda^g} & \frac{d\nabla_x OF_c}{ds} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda_{N+1}^h} \\ \frac{dF(X)}{dX} & \frac{dF(X)}{d\lambda^h} & \frac{dF(X)}{d\lambda^g} & \frac{dF(X)}{ds} & \frac{dF(X)}{d\lambda_{N+1}^h} \\ \frac{d(g(X)+s)}{dX} & \frac{d(g(X)+s)}{d\lambda^h} & \frac{d(g(X)+s)}{d\lambda^g} & \frac{d(g(X)+s)}{ds} & \frac{d(g(X)+s)_c}{d\lambda_{N+1}^h} \\ \frac{d\nabla_s OF_c}{dX} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda^h} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda^g} & \frac{d\nabla_s OF_c}{ds} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda_{N+1}^h} \\ \frac{d(\det J(X))}{dX} & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda^h} & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda^g} & \frac{d(\det J(X))}{ds} & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda_{N+1}^h} \end{array} \right) \begin{pmatrix} X^{(k+1)} - X^{(k)} \\ \lambda^{h(k+1)} - \lambda^{h(k)} \\ \lambda^{g(k+1)} - \lambda^{g(k)} \\ s^{(k+1)} - s^{(k)} \\ \lambda_{N+1}^{h(k+1)} - \lambda_{N+1}^{h(k)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla_x OF_c \\ F(X) \\ g(X) + s \\ \nabla_s OF_c \\ \det J(X) \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где справа — вектор первых производных целевой функции по всем переменным, а слева — матрица вторых производных целевой функции по всем переменным (матрица Гессе).

В третьей главе описывается применение метода на 3-узловой и 12-узловой тестовых схемах, и анализируются вычислительные аспекты предлагаемого алгоритма.

Применение метода на 3-узловой тестовой схеме

Предлагаемый метод поиска предельного режима с наименьшим перетоком мощности в заданном контролируемом сечении был применен к простейшей схеме, изображенной на рисунке 4 и состоящей из трех узлов: шин бесконечной мощности и двух PV-узлов генерации.

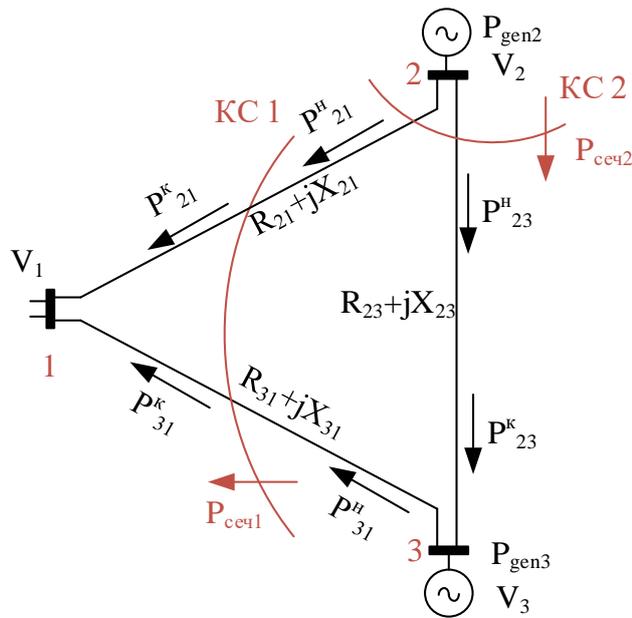


Рисунок 4 – Схема 3-узловой сети

Для KC1 наименьший предельный переток, полученный с помощью алгоритма, составил 23673 МВт. Загрузка генератора №2 составила 23775 МВт, загрузка генератора №3 – 177 МВт. Полученный предельный режим приведен на рисунке 5. В данном случае в результате работы алгоритма стало активно ограничение на разность углов по линиям (в найденном режиме разность углов напряжений по линиям 1–2 и 2–3 равны). При отсутствии ограничения на разность углов алгоритм бы нашел режим, при нулевой загрузке генератора №3 и максимальной загрузке генератора №2 (составляющей 23866 МВт). Схема симметрична, поэтому существует и вторая точка решения с зеркальными нагрузками генераторов: №2 177 МВт и №3 23775 МВт.

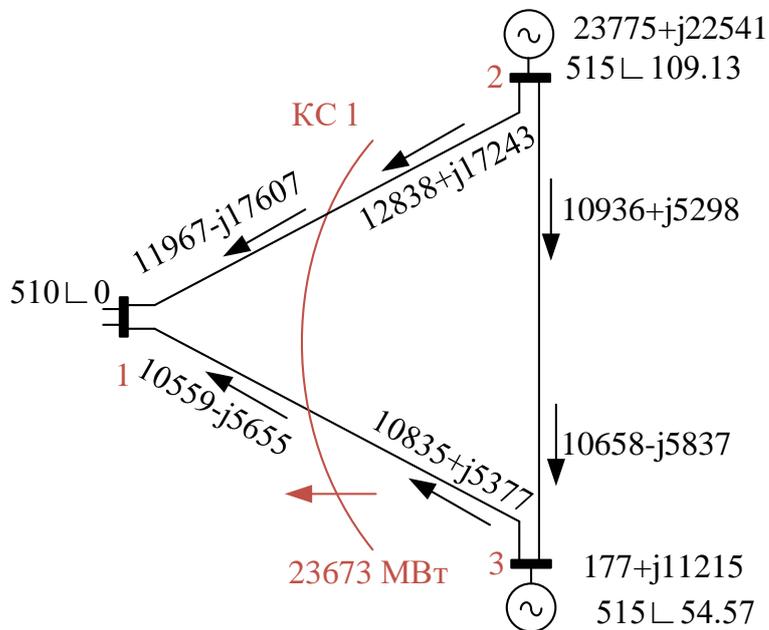


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма для 3-узловой схемы для KC1

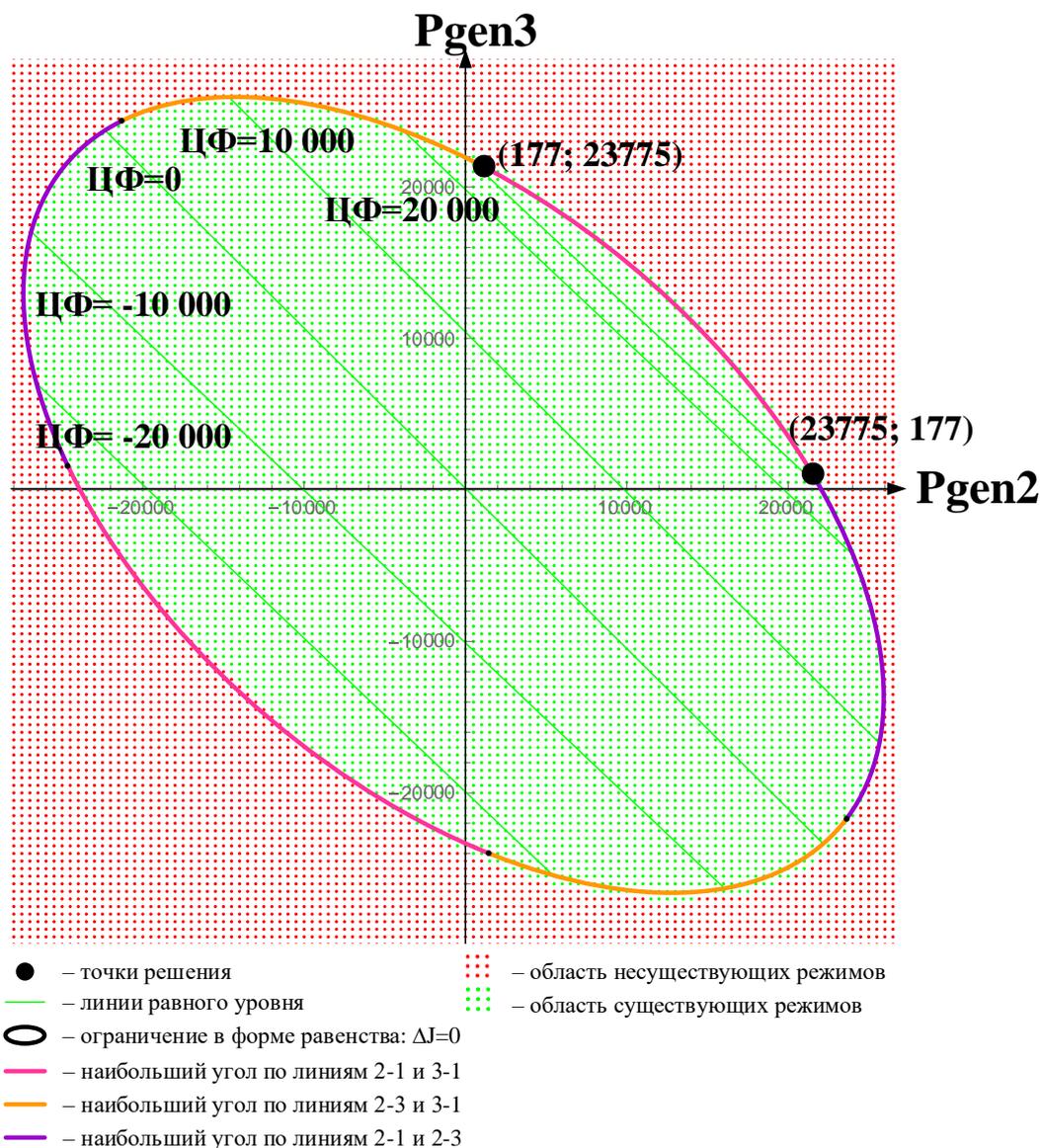


Рисунок 6 – Геометрическое представление задачи минимизации для КС1

На рисунке 6 приводится графическое представление задачи минимизации при различных величинах генерации в узлах 2 и 3 для КС1. При этом существующие режимы обозначены зелеными точками, несуществующие – красными. Видно, что граница существования режима представляет из себя эллипс. Части эллипса отмечены разными цветами, обозначающими то, какое сечение перегружается (является критическим). Загрузки генераторов, при которых перегружаемым является рассматриваемое сечение, проходящее по линиям 2–1 и 3–1, обозначены на эллипсе розовым цветом. Зелеными линиями показаны линии равного уровня при указанных величинах целевой функции. Для процедуры нелинейного программирования важным является тот факт, что область поиска решения выпуклая, а следовательно, применяемый метод должен сходиться в точку минимума целевой функции. С учетом ограничений на активную мощность генерации в узлах (должна быть больше нуля) отмечены точки решения, которые были получены алгоритмом. В зависимости от начальных условий алгоритм находит одну из этих точек.

Стоит также заметить, что найденные алгоритмом решения находятся на границе того, какое сечение является перегружаемым (критическим). В данных точках погрешность определения предельного режима и перегружаемого (критического) сечения максимальна. Можно сказать, что в данных точках выделяется сразу два критических сечения.

В результате запуска процедуры минимизации для КС2 получается режим, такой же, как и для КС1. Переток в КС2 составил 23774 МВт. Данный режим является граничным, то

есть в нем перегружаются оба сечения – и КС1, и КС2. Разности углов напряжений по линиям 2–3 и 3–1 равны.

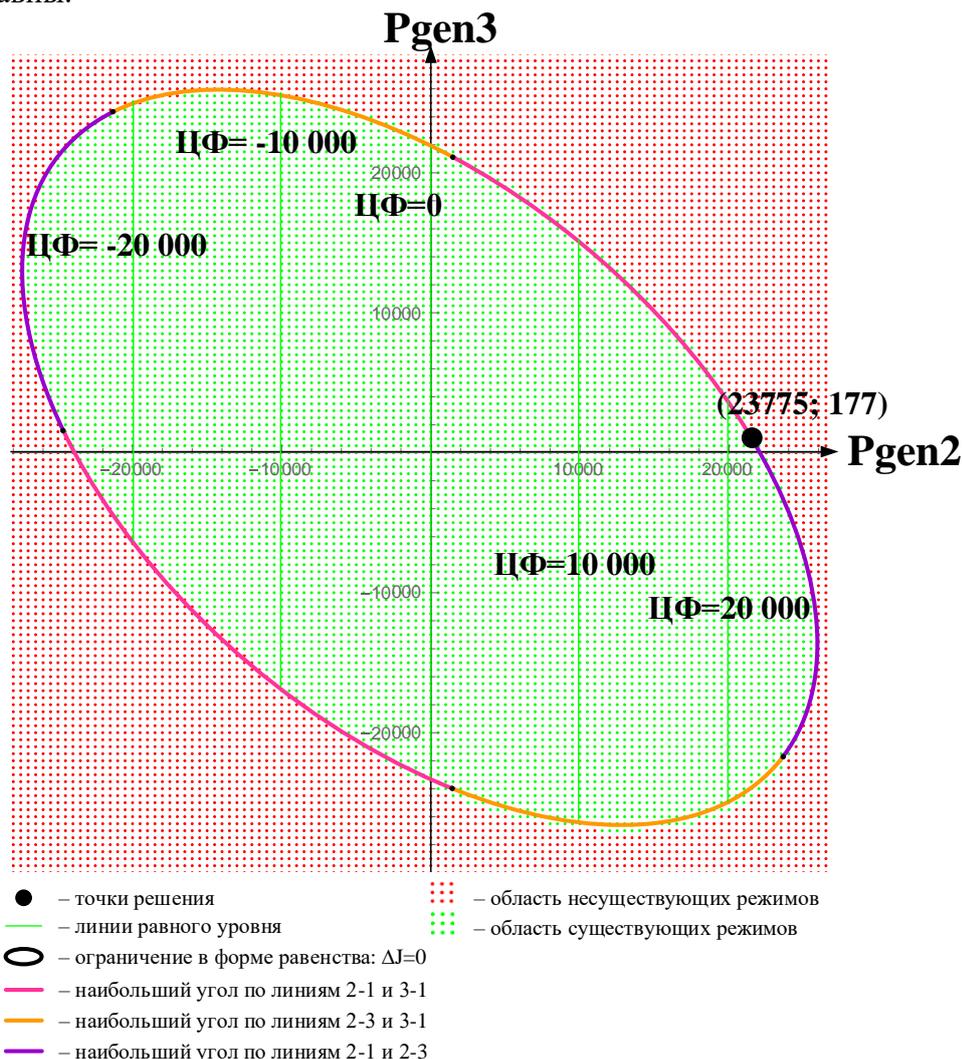


Рисунок 7 – Геометрическое представление задачи минимизации для КС2

На рисунке 7 приведено геометрическое представление задачи минимизации для КС2. Обозначения аналогичны рисунку 6. С точки зрения разности углов напряжений часть эллипса, для которой перегружающееся сечение является рассматриваемым сечением, обозначена фиолетовым цветом. Линии равного уровня для нового сечения изменили свое направление. В данном случае видно, что полученная точка решения практически находится на границе двух ограничений – ограничения на генерацию узлов 2, 3 (больше нуля) и ограничения на разность углов напряжений по линиям.

Применение метода на 12-узловой тестовой схеме

Для применения метода на 12-узловой схемы требуется повышение эффективности его работы и решение вычислительных трудностей, рассмотренных далее.

Особенности ограничения на определитель матрицы Якоби

Для небольших (до 4 узлов) тестовых схем определитель матрицы Якоби вычислялся в аналитическом виде. Это позволяет избежать программирования выражений первой и второй производных, которые необходимы в методе Ньютона. Для небольших тестовых систем это простой и удобный способ проверить правильность предложенной теории. Дальнейшие исследования показали, что ограничение равенства нулю определителя матрицы Якоби (8) вызывает наибольшую вычислительную сложность. Невозможно в аналитическом виде выполнить даже одну итерацию для схем с более 4 узлами.

Было установлено, что для крупной энергосистемы сложно получить общее выражение для определителя матрицы Якоби (8). Не менее сложно получить общее выражение для первой и второй производных выражения (8). Для решения этой задачи предлагается вычислять производные определителя, используя правило взятия производной от определителя:

$$\left(\det \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \right)' = \det \begin{pmatrix} a_{11}' & \cdots & a_{1n}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} + \dots + \det \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}' & \cdots & a_{nn}' \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Применение формулы (34) позволяет избежать прямого использования выражения (8), таким образом, необходимость в аналитическом вычислении определителя и его производных пропадает.

С другой стороны, такая численная процедура требует расчета большого количества определителей, что является вычислительно затратным. Чтобы снизить вычислительную сложность, предлагается использовать свойство равенства нулю определителя вырожденной матрицы. Применение формулы (34) к выражению (8) для вычисления первой и особенно второй производной создает много матриц, в которых присутствуют нулевые строки или столбцы. Определитель матрицы с нулевой строкой (столбцом) равен нулю, а значит, не требует вычислений. Таким образом, пропадает необходимость расчета большого количества определителей матриц, получившихся из разложения по формуле (34), что снижает вычислительную сложность алгоритма.

Плохая обусловленность системы уравнений на шаге итерации

Особенностью описанной системы уравнений (33) является наличие ограничений в виде равенств (для УУР и определителя матрицы Якоби), имеющих разные размерности. В единицах СИ размерность определителя для 12-узловой схемы на 10^{26} больше, чем размерность невязок УУР. Система линейных уравнений на шаге итерационной процедуры является плохо обусловленной.

В этом случае плохая обусловленность связана с тем фактом, что значения различаются больше, чем может быть учтено числом двойной точности с плавающей запятой. Решение системы линейных уравнений содержит существенную ошибку, что приводит к расходимости итерационной процедуры.

Чтобы решить эту проблему, все переменные были преобразованы в относительные единицы. Благодаря такому преобразованию все невязки, кроме определителя, стали иметь одинаковую размерность. Значение определителя уменьшилось с 10^{26} до 10^{-14} . Разница между определителем и невязками УУР уменьшилась с 26 до 14 порядков. При этом выросла вычислительная устойчивость метода, и итерационный метод стал лучше сходиться.

Далее была проанализирована матрица Гессе, выполняющая роль матрицы коэффициентов в итерационном методе нелинейного программирования. Анализ показал, что существенный вклад в плохую обусловленность матрицы вносит строка, соответствующая производным от определителя матрицы Якоби по всем переменным. Эти элементы в матрице Гессе имеют размерности, сравнимые с определителем матрицы Якоби, и отличаются от остальных элементов на 14 порядков в относительных единицах. В результате почти нулевая строка в матрице коэффициентов приводит к плохой обусловленности. Аналогичная проблема связана со столбцом, соответствующим производной по множителю Лагранжа для определителя матрицы Якоби элементов вектора первых производных. Для решения этой проблемы указанные строки и столбцы были нормированы путем умножения их на коэффициент L . Система уравнений (33) с коэффициентом L имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\nabla_x OF_c}{dX} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda^h} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda^g} & \frac{d\nabla_x OF_c}{ds} & \frac{d\nabla_x OF_c}{d\lambda_{N+1}^h} \cdot L \\ \frac{dF(X)}{dX} & \frac{dF(X)}{d\lambda^h} & \frac{dF(X)}{d\lambda^g} & \frac{dF(X)}{ds} & \frac{dF(X)}{d\lambda_{N+1}^h} \cdot L \\ \frac{d(g(X)+s)}{dX} & \frac{d(g(X)+s)}{d\lambda^h} & \frac{d(g(X)+s)}{d\lambda^g} & \frac{d(g(X)+s)}{ds} & \frac{d(g(X)+s)}{d\lambda_{N+1}^h} \cdot L \\ \frac{d\nabla_s OF_c}{dX} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda^h} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda^g} & \frac{d\nabla_s OF_c}{ds} & \frac{d\nabla_s OF_c}{d\lambda_{N+1}^h} \cdot L \\ \frac{d(\det J(X))}{dX} \cdot L & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda^h} \cdot L & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda^g} \cdot L & \frac{d(\det J(X))}{ds} \cdot L & \frac{d(\det J(X))}{d\lambda_{N+1}^h} \cdot L^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^{(k+1)} - X^{(k)} \\ \lambda^{h(k+1)} - \lambda^{h(k)} \\ \lambda^{g(k+1)} - \lambda^{g(k)} \\ s^{(k+1)} - s^{(k)} \\ (\lambda_{N+1}^{h(k+1)} - \lambda_{N+1}^{h(k)}) \cdot \frac{L}{L} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla_x OF_c \\ F(X) \\ g(X)+s \\ \nabla_s OF_c \\ \det J(X) \cdot L \end{pmatrix}. \quad (35)$$

В результате матрица коэффициентов стала хорошо обусловленной. На рисунке 8 представлена визуализация матрицы Гессе до и после перевода в относительные единицы измерения и нормализации путем умножения на коэффициент. Видно, что в результате матрица Гессе стала более однородной, последний столбец и строка перестали численно существенно отличаться от остальных элементов.

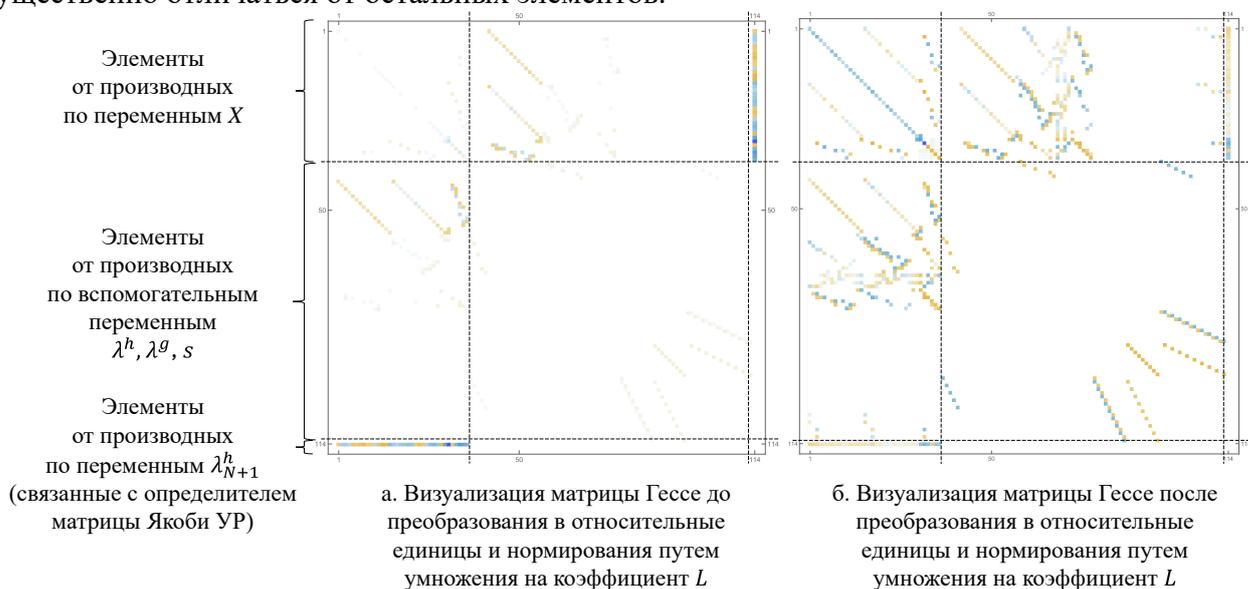


Рисунок 8 – Визуализация матрицы Гессе

Ускорение процедуры нелинейного программирования

Помимо плохой обусловленности матрицы коэффициентов на шаге итерации, была выявлена еще одна вычислительная проблема – длительное вычисление производных от определителя матрицы Якоби по формуле (34). Такая вычислительная сложность при переходе от тестовых случаев к реальным схемам будет существенным ограничением для практического применения даже на современном уровне развития вычислительных технологий.

При анализе вторых производных определителя матрицы Якоби были обнаружены нулевые строки и столбцы. Как известно, определитель матрицы, у которой одна строка или столбец равен нулю, также равен нулю. При вычислении производной определителя по формуле (34) возникает множество производных матриц с нулевыми строками. При взятии производных по отсутствующей в строке переменной строка становится нулевой (производная константы равна нулю). Таким образом, для матриц с нулевыми строками или столбцами определитель не рассчитывается, что позволяет ускорить расчет.

Кроме того, использование формы записи УУР в виде потоковой модели, а не в форме узловых напряжений, также позволяет ускорить расчет. Дело в том, что в уравнениях узловых напряжений присутствуют синус угла напряжения, который сохраняется в векторе первых производных и матрице вторых производных после дифференцирования. Важно отметить преимущество потоковой модели по сравнению с узловыми уравнениями. Отличительной особенностью уравнений потоковой модели является отсутствие углов фазного напряжения (синусов углов фазного напряжения). Они отсутствуют как в векторе первых производных, так и в матрице вторых производных, что приводит к появлению нулевых строк. Таким образом, при выявлении нулевых строк или столбцов нет необходимости вычислять определитель таких матриц при вычислении производной определителя. Этот фактор существенно снижает вычислительную сложность алгоритма.

На следующем этапе вычислительной оптимизации была проанализирована матрица коэффициентов. Вклад производных определителя матрицы Якоби по основным неизвестным переменным пренебрежимо мал по сравнению с другими производными. Поэтому его можно принять равным нулю и не вычислять. На текущем этапе исследований это обеспечивает значительное ускорение вычислительной процедуры, но для оценки справедливости этого предположения необходимы дальнейшие исследования.

Представленные выше методы решения вычислительных задач позволяют успешно инициировать вычисления для 12-узловой тестовой схемы, чего не удалось достичь с помощью исходной версии алгоритма.

Результаты применения ускоренного алгоритма для 12-узловой схемы

Алгоритм был применен для 12-узловой тестовой схемы. Рассматривалось три сечения (рисунок 9). В качестве изменяющихся параметров используются только загрузки всех генераторов. Таким образом, имитируется ВИР состоящий только из узлов генерации.

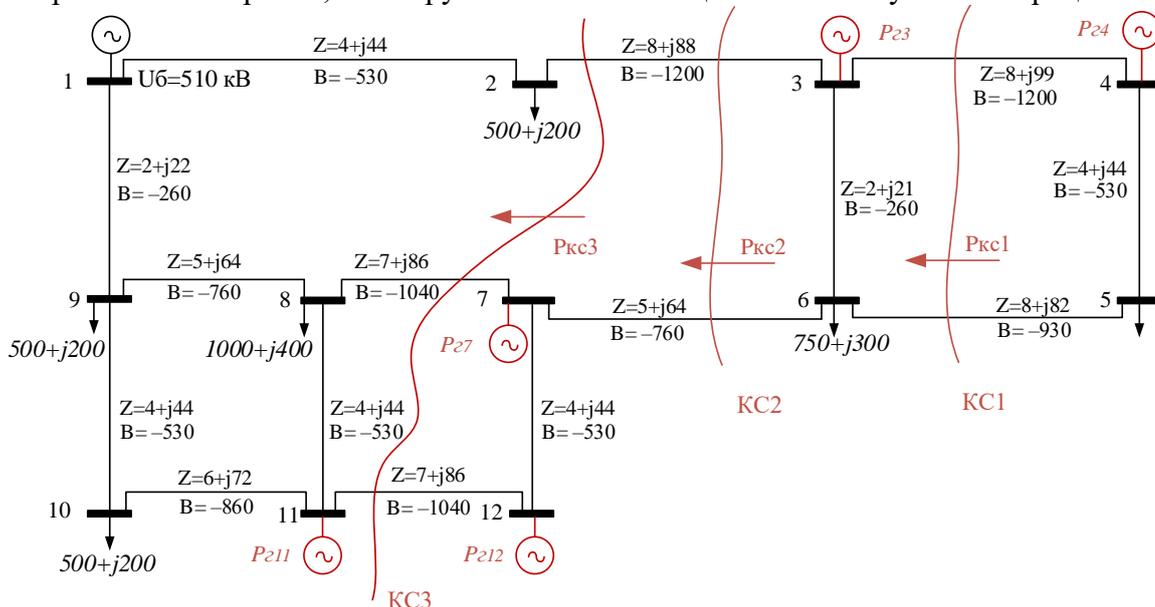


Рисунок 9 – 12-узловая тестовая схемы

В таблице 2 показано сравнение результатов, полученных традиционным методом последовательного утяжеления и предлагаемым алгоритмом для всех трех рассматриваемых сечений.

Таблица 2 – Сравнение традиционного и предлагаемого методов для 12-узловой схемы

МВт	КС1		КС2		КС3	
	Традиционный метод	Предлагаемый метод	Традиционный метод	Предлагаемый метод	Традиционный метод	Предлагаемый метод
P _{Г3}	0	0	6182	6182	2372	4350
P _{Г4}	5074	5074	0	0	2372	783
P _{Г7}	0	0	0	0	2372	0
P _{Г11}	0	0	0	0	0	1063
P _{Г12}	0	0	0	0	0	1317
P _{сеч}	4297	4297	4688	4688	5696	4977

Из таблицы 2 видно, что предлагаемый алгоритм успешно находит наименьший предельный режим. При этом для сечений КС № 1 (линии 3-4 и 5-6) и КС №2 (линии 2-3 и 6-7), для которых однозначно можно получить результат методом последовательного утяжеления, найденный предельный режим совпадает для двух сравниваемых методов. Рассматривая КС №3 (линии 2-3, 7-8, 11-12), более сложном сечении, можно заметить, что полученный предельный переток даже ниже, чем при методе последовательного утяжеления. Предельный режим, полученный с помощью предлагаемого метода для КС №3 приведен на рисунке 10. Таким образом, алгоритм способен искать наименьший предельный переток по сечению.

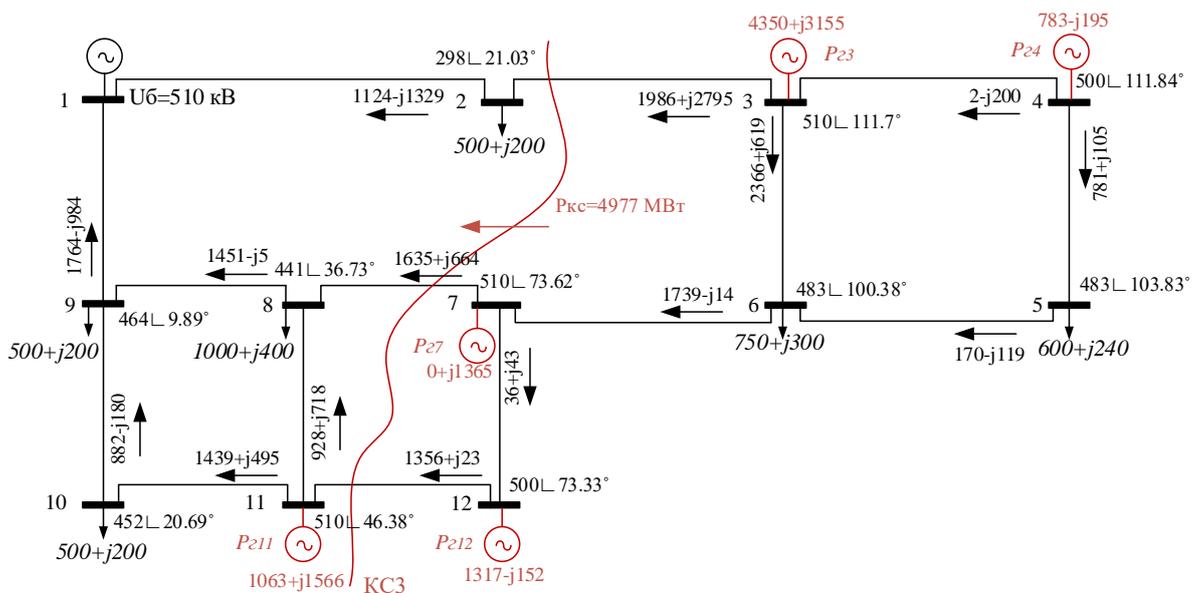


Рисунок 10 – Предельный режим, полученный для КСЗ предлагаемым методом

Перспективы развития данной работы связаны с дальнейшими улучшениями вычислительных свойств алгоритма в части снижения зависимости результата работы от начальных условий, а также с программной реализацией предложенного метода для возможности расчёта предельных режимов на схемах большой размерности и решением задач, возникающих при увеличении числа уравнений и неизвестных. Для схем большой размерности требуются дополнительные исследования, направленные на ускорение алгоритма (уменьшение вычислительной сложности одной итерации), на улучшение сходимости к решению при различных начальных условиях и на снижение числа итераций в ходе процедуры минимизации. Промышленная программная реализация предложенного алгоритма, с одной стороны, позволит уменьшить трудозатраты технологов на расчёты предельных режимов, с другой стороны, может быть использована в системе мониторинга запаса статической устойчивости для расчета максимально (аварийно) допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях.

В заключении приведены выводы, обобщены основные результаты, представлены перспективные направления исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Рассмотрены основные методы поиска предельных режимов электрических сетей: метод на основе уравнений предельного режима, метод на основе нелинейного программирования и метод последовательного утяжеления. Отмечены недостатки рассмотренных методов с точки зрения существующей практики диспетчеризации перетоков в контролируемых сечениях.
2. Предложен подход на основе нелинейного программирования для поиска предельного режима с наименьшим перетоком активной мощности в заданном сечении с использованием уравнений потоковой модели. Новый подход позволяет находить предельные режимы в контролируемых сечениях, при этом отсутствует необходимость эмпирического поиска траектории утяжеления режима.
3. Представлен подход прямого использования критерия предельного режима, а именно равенство нулю определителя матрицы Якоби уравнений, описывающих установившийся режим. В качестве уравнений, описывающих установившийся режим, использованы уравнения потоковой модели, которые обеспечивают лучшие вычислительные характеристики по сравнению с классическими уравнениями узловых напряжений.

4. Для использования в процедуре нелинейного программирования критерия равенства нулю определителя матрицы Якоби предложено использовать формулу производной от определителя. Для реальных электрических схем большой размерности получение определителя в форме многочлена практически невозможно. Формула производной от определителя позволяет исключить получение выражение определителя в явном виде. Это позволяет непосредственно использовать критерий равенства нулю определителя в численном методе нелинейного программирования.
5. Разработаны методы повышения вычислительной устойчивости и быстродействия разработанной процедуры нелинейного программирования: расчёт производится в относительных единицах, и при решении системы линейных уравнений, составляемой на шаге процедуры минимизации, нормируются элементы, связанные с вкладом от определителя матрицы Якоби уравнений режима.
6. Разработанный метод позволяет значительно сократить время, требующееся на поиск траектории утяжеления (избежать трудозатратной процедуры перебора различных ВИР), а также может быть применен для автоматического поиска МДП (АДП) в системе мониторинга запасов устойчивости.
7. Перспективы развития данной работы связаны с дальнейшими улучшениями вычислительных свойств алгоритма в части снижения зависимости результата работы от начальных условий, а также с программной реализацией предложенного метода для возможности расчёта предельных режимов на схемах большой размерности и решении задач, возникающих при увеличении числа уравнений и неизвестных.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Банных П. Ю. Метод поиска предельного режима в заданном контролируемом сечении / П. Ю. Банных, **А. Е. Гаврилова**, А. В. Паздерин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2022. № 2 (87), С. 11-20 (0,625 п.л. / 0,325 п.л.).
2. **Gavrilova A.** Voltage Stability Limit Calculation for Power Transfer Capability Between Two Area / **A. Gavrilova**, P. Bannykh, and A. Pazderin // Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference, 2023, С. 100-103 (0,5п.л./0,25п.л). Scopus, WoS
3. Гаврилова А.Е. Обзор методов поиска предельных режимов в энергосистеме / **А.Е. Гаврилова**, П.Ю. Банных, А.В. Паздерин, Г.С. Шабалин // Электротехнические системы и комплексы, 2024. № 3 (64), с.4-11 (0,6 п.л. / 0,4 п.л.)

Другие публикации:

4. Гаврилова А.Е. Применение критерия опасного сечения в алгоритме поиска предельного режима в заданном сечении / **А.Е. Гаврилова**, П.Ю. Банных, А.В. Паздерин // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XIII Международной научно-технической конференции, – Т. 1. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. С 40-44, (0,47 п.л./0,3 п.л.)