

На правах рукописи



Белов Евгений Игоревич

**ПРИМЕНЕНИЕ СИНГУЛЯРНОГО АНАЛИЗА МАТРИЦЫ
ЯКОБИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Специальность: 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2020

Работа выполнена в АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ЕЭС»)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Сорокин Евгений Владимирович

Официальные оппоненты: Фишов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматизированных электроэнергетических
систем факультета энергетики ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный техниче-
ский университет»

Беляев Николай Александрович,
кандидат технических наук, начальник от-
дела анализа схем и программ перспектив-
ного развития электроэнергетики службы
мониторинга и анализа схем и программ пер-
спективного развития электроэнергетики
акционерного общества «Инспекция по кон-
тролю технического состояния объектов
электроэнергетики» (АО «Техническая ин-
спекция ЕЭС»)

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-техниче-
ский центр Федеральной сетевой компании
Единой энергетической системы» (АО «НТЦ
ФСК ЕЭС»)

Защита состоится 22 декабря 2020 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.05.14.02 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29., Главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « 13 » ноября 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета У.05.14.02
кандидат технических наук, доцент

Чудный В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Электроэнергетические системы (ЭЭС) представляют собой совокупность большого количества сложных технических устройств, предназначенных для выполнения следующих функций: производство, передача и распределение электрической энергии. Основным требованием, которое предъявляется к ЭЭС, является надёжность электроснабжения. Одной из важнейших задач, которые стоят перед специалистами, обеспечивающими стабильное функционирование электрических сетей, является выявление и ликвидация нештатных ситуаций в ЭЭС и минимизация их отрицательных последствий.

Идеальной, но не реальной ситуацией с точки зрения работы электрической сети является потребление всеми существующими электроприёмниками мощности постоянной величины без изменения во времени. В этой ситуации режим работы электрической сети всегда бы оставался постоянным. Но в реальности существует множество причин, по которым режим работы электрической сети всё время меняется. К таким причинам относятся:

- ввод в эксплуатацию новых потребителей, вывод из эксплуатации существующих потребителей, непредсказуемые включения и отключения существующих потребителей, обусловленные их личными обстоятельствами;
- изменения состояний коммутационных аппаратов;
- изменения состава генерации на электростанциях;
- суточные и сезонные колебания потребления энергосистем;
- возникновение нештатных ситуаций (аварий) и связанная с их ликвидацией работа релейной защиты и противоаварийной автоматики и т.д.

Ввиду сложности топологии электрических сетей и большим разбросом параметров их элементов (линий электропередачи, (авто)трансформаторов и т.д.) ЭЭС являются неоднородными. Это приводит к тому, что при возникновении возмущений разные элементы ЭЭС реагируют на это по-разному. При

этом оказывается, что в некоторые элементы показывают более сильную реакцию на возмущения, чем другие элементы, независимо от величины возмущения и места его возникновения. Кроме того, опыт расчётов установившихся режимов реальных ЭЭС показывает, что изменение параметров одних элементов сильнее влияет на изменение величины реакции системы на возмущения, чем других. Таким образом, имея информацию о том, как эффективнее всего изменить (снизить) реакцию ЭЭС на возмущения, можно выработать пути снижения неоднородности ЭЭС и, как следствие, улучшения её поведенческих свойств и повышения надёжности электроснабжения потребителей за счёт снижения вероятности выхода режимных параметров за допустимые пределы.

Необходимым условием стабильной работы электрических сетей является наличие определённого запаса статической устойчивости (способности системы возвращаться к первоначальному состоянию после малых возмущений). Нарушение статической устойчивости приводит к серьёзным последствиям для энергосистемы вплоть до необходимости временного отключения части потребителей. Вопросы обеспечения требуемых запасов статической устойчивости со временем не теряют своей актуальности и являются предметом исследования учёных по всему миру. На сегодняшний день наиболее распространённым способом оценки запасов статической устойчивости ЭЭС является расчёт большого числа возможных режимов работы ЭЭС и выбор на основании результатов расчётов максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях, при которых обеспечиваются требуемые запасы статической устойчивости. В настоящей работе, учитывая результаты исследований чувствительности и неоднородности ЭЭС, предлагается менее трудоёмкий способ оценки запаса статической устойчивости ЭЭС.

Кроме того, важным этапом в проведении расчётов максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях является выбор траектории утяжеления. От него во многом зависят результаты, получаемые в процессе расчётов. На сегодняшний день задача выбора траектории утяжеления не имеет однозначного решения ввиду отсутствия чётких критериев определения

узлов, включаемых в траекторию утяжеления. Предложенная в настоящей работе методика позволяет выбрать именно ту траекторию, при использовании которой при утяжелении режима будет реализовываться самый тяжёлый сценарий.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является исследование возможности применения сингулярного анализа матрицы Якоби системы уравнений установившегося режима работы ЭЭС для определения неоднородностей ЭЭС и последующего их устранения, а также практической применимости полученных результатов для решения задач в сфере электроэнергетики.

Задачи, решаемые в ходе выполнения настоящей работы:

1. Поиск элементов ЭЭС, режимные параметры которых (модуль и фаза напряжения в узле) сильнее всего реагируют на случайные возмущения.
2. Поиск элементов ЭЭС, изменение параметров которых (сопротивления ветвей, мощность СКРМ в узлах и т.д.) наибольшим образом влияет на изменение реакции ЭЭС на возмущения.
3. Экспериментальная проверка полученных результатов с помощью проведения расчётов установившихся режимов в ПК «RastrWin».
4. Определение влияния различных сценариев изменения схемно-режимной ситуации на результаты применения рассмотренной методики.
5. Определение возможности применения рассмотренной методики для решения конкретных задач при управлении и проектировании развития ЭЭС.
6. Рассмотрение конкретных примеров применения рассмотренной методики с целью повышения эффективности функционирования ЭЭС.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработан новый подход к определению предельных по статической аperiodической устойчивости перетоков активной мощности в контролируемых сечениях, заключающийся в выборе траекторий утяжеления на ос-

нове результатов сингулярного анализа матрицы Якоби. Данный подход позволяет формализовать процедуру выбора траектории утяжеления и даёт возможность получить наименьшие значения предельных перетоков.

2. Выполнены исследования, посвящённые влиянию изменения схемно-режимной ситуации на результаты применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби. Выявлены основные закономерности изменения картины сенсорных и определяющих элементов схемы, а также изменения запаса статической устойчивости схемы при различных сценариях изменения схемно-режимной ситуации. Предложен способ снижения числа ремонтных схем, которые требуется рассмотреть в ходе анализа свойств ЭЭС с точки зрения чувствительности и неоднородности, используя информацию об определяющих узлах и ветвях схемы.

3. С помощью ПК «RastrWin» проведено исследование зависимости реакции ЭЭС от способа утяжеления режима работы ЭЭС (увеличение только активной составляющей мощности нагрузки/ только реактивной составляющей/полной мощности/утяжеление во всех узлах на одинаковую абсолютную величину/утяжеление пропорционально исходной нагрузке в узлах на одинаковую пропорциональную величину (одинаковый процент) и т.д.). По результатам сделан вывод о том, что наибольшее совпадение реакции ЭЭС по модулю напряжения (полученной расчётами режима в ПК «RastrWin») с результатами сингулярного анализа матрицы Якоби (вычисление сенсорности узлов) наблюдается в случае утяжеления всех узлов в ПК «RastrWin» по полной мощности на одинаковую величину.

4. Сделан вывод о том, что результаты вычисления производных минимального сингулярного значения матрицы Якоби по проводимостям шунтов в узлах являются справедливыми даже для случая установки средств компенсации реактивной мощности (СКРМ; к примеру, батареи статических конденсаторов (БСК) и шунтирующие реакторы (ШР)) в том узле, за которым ведётся наблюдение: если это не определяющий узел, то на его сенсорность будет больше влиять установка СКРМ в определяющем узле, чем в нём самом.

5. Сделан вывод о том, что как для отдельных узлов, так и для всей ЭЭС в целом справедлив тот факт, что изменение параметров определяющих элементов больше влияет на изменение сенсорности, чем изменение параметров не определяющих элементов.

Практическая ценность работы

По результатам проведённых исследований в работе предложены и подробнее рассмотрены 6 (шесть) направлений (сфер электроэнергетики) возможного применения предложенной методики. Приведены конкретные примеры применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби для повышения эффективности работы электроэнергетических систем.

В качестве одного из примеров возможных способов практического применения результатов исследования свойств ЭЭС с помощью метода сингулярного анализа матрицы Якоби приведён пример определения наиболее эффективного места реализации управляющего воздействия (УВ) автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН) на отключение нагрузки (ОН) в узле. Увеличение эффективности реализации УВ АОСН на ОН в предложенном с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби узле составило 21,3% по сравнению с отключением нагрузки в том узле, в котором происходит снижение напряжения.

Проиллюстрировано применение метода сингулярного анализа матрицы Якоби для исследования статической устойчивости ЭЭС и определения наиболее эффективных способов повышения предельных по статической апериодической устойчивости перетоков активной мощности в контролируемых сечениях. Приведён пример, в котором установка БСК в определяющем узле позволила увеличить предельный переток в контролируемом сечении на 20% больше, чем установка БСК в узле, в котором происходило увеличение нагрузки при утяжелении режима работы электрической сети. Приведён пример, в котором снижение сопротивления определяющей ветви с помощью установки УПК (или введения в схему параллельной ветви) позволило повы-

сдать предельную нагрузку узла по условию сохранения статической устойчивости на 38,4% – 42,3% больше, чем при аналогичном снижении сопротивления других рассмотренных ветвей.

В работе для выбранного примера с помощью разработанного нового подхода к определению предельных перетоков активной мощности в контролируемых сечениях определена траектория утяжеления, дающая минимальный предельный переток из всех возможных траекторий утяжеления (минимальный переток, полученный по остальным траекториям, оказался на 53% больше, чем найденный с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби).

Выявлено преимущество метода сингулярного анализа матрицы Якоби, заключающееся в том, что для поиска мест расположения сенсорных и определяющих элементов в ЭЭС не требуется производить многократных расчётов режимов работы электрической сети (в общем случае места расположения сенсорных и определяющих элементов не поддаются нахождению с помощью «инженерного подхода»).

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано пять научных статей в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки (журнал «Известия НТЦ Единой энергетической системы» (до 2012 г. «Известия НИИ постоянного тока») и журнал «Электроэнергия. Передача и распределение»).

Научная работа «Применение сингулярного анализа матрицы Якоби при оценке статической устойчивости электроэнергетических систем», связанная с темой диссертации, в 2019 году стала победителем конкурса грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (организован Комитетом по науке и высшей школе

Правительства Санкт-Петербурга) по направлению «Технические науки (энергетика)»).

Научная работа «Применение сингулярного анализа матрицы Якоби для повышения надёжности функционирования электроэнергетических систем», связанная с темой диссертации, в 2020 году была награждена дипломом лауреата второй премии Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли (проводится ООО «ТЕХНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ» ежегодно при поддержке Минэнерго России в рамках работы по инновационному развитию топливно-энергетической и добывающей отрасли и развитию кадрового потенциала).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 108 наименований. Основная часть работы изложена на 165 страницах и включает в себя 144 рисунка и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено общее описание рассматриваемых в работе вопросов, отражена актуальность работы, цель и задачи, решаемые в ходе исследований, и общая характеристика основной применяемой методики.

В первой главе представлены теоретические положения, использованные в качестве основы при разработке применяемой при исследованиях методики. Из уравнений, описывающих режим работы ЭЭС, может быть получена матрица Якоби, элементы которой в общем случае представляют собой частные производные баланса мощности по параметрам режима. Матрица Якоби может быть представлена разными способами. В настоящей работе использовано представление матрицы Якоби для системы уравнений установившегося режима в форме баланса мощностей в полярных координатах:

$$J_{pS} = \begin{pmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial \delta} & \frac{\partial W_P}{\partial U} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} & \frac{\partial W_Q}{\partial U} \end{pmatrix},$$

где $\frac{\partial W_P}{\partial \delta}$, $\frac{\partial W_P}{\partial U}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$, $\frac{\partial W_Q}{\partial U}$ – квадратные блоки-подматрицы матрицы J_{pS} , являющиеся частными производными от мнимой и действительной частей уравнений установившегося режима в форме баланса мощностей по модулю и фазе узловых напряжений.

Элементы обратной матрицы Якоби $J_{pS}^{-1} \left(\frac{\partial \delta_i}{\partial P_j}, \frac{\partial \delta_i}{\partial Q_j}, \frac{\partial U_i}{\partial P_j}, \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \right)$ характеризуют степень влияния изменения небалансов активной и реактивной мощности в узле j , возникающих вследствие возмущений в ЭЭС, на изменения фаз и модулей напряжений в узле i .

Сингулярным разложением матрицы Якоби называется представление её в виде произведения трёх матриц:

$$J = W \Sigma V^T = \sum_{i=1}^k w_i \sigma_i v_i^T,$$

где $W = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ и $V = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ – ортогональные матрицы размером $(k \times k)$, их i -е столбцы являются, соответственно, i -м левым и i -м правым сингулярными векторами;

$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k)$ – диагональная матрица сингулярных значений.

Сингулярные числа σ_i матрицы A численно равны квадратным корням из общих собственных значений λ_i матриц $A^T A$ и AA^T :

$$\sigma_i(A) = \sqrt{\lambda_i(A^T A)} = \sqrt{\lambda_i(AA^T)}.$$

Расположим сингулярные значения по возрастанию: $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_k$. Значение (число), оказавшееся на первом месте, называют минимальным сингулярным значением (минимальным сингулярным числом).

Левый и правый сингулярные векторы, связанные с минимальным сингулярным числом, называются первым левым и первым правым сингулярными векторами (w_1 и v_1). Наибольшие изменения модулей и фаз напряжений, связанные с изменением небалансов активной и реактивной мощности в узлах,

можно ожидать в узлах, соответствующих максимальным компонентам первого правого сингулярного вектора. Величины компонент первого левого сингулярного вектора определяют узлы, изменение небалансов активной и реактивной мощности в которых вызывает наибольшую реакцию системы.

Элементы ЭЭС (узлы и ветви), параметры режима которых (фазы и модули напряжения, токи) в большей степени изменяются при случайных возмущениях, называются «сенсорные» (чувствительные) элементы или «сенсоры».

В работе показано, что реакция системы на возмущения тем больше, чем меньше минимальное сингулярное значение матрицы Якоби. В связи с этим, чтобы оценить влияние параметров схемы и параметров режима на сенсорность сети, необходимо оценить производную

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial f} = w_1^T \left(\frac{\partial J}{\partial f} \right) v_1.$$

Если в качестве параметра f выбрать напряжение в узлах электрической сети, то можно определить узел (узлы), изменение напряжения в котором (например, с помощью источника реактивной мощности) в наибольшей степени отразится на изменении сенсорности сети. Такие узлы называются «дефинирующими» или «определяющими». В этом случае матрица $\frac{\partial J}{\partial U}$ будет иметь следующую структуру:

$$\frac{\partial J}{\partial U_i} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 P}{\partial \delta \partial U_i} & \frac{\partial^2 P}{\partial U \partial U_i} \\ \frac{\partial^2 Q}{\partial \delta \partial U_i} & \frac{\partial^2 Q}{\partial U \partial U_i} \end{pmatrix}.$$

Аналогично, если в качестве параметра f выбрать проводимость ветви u_b или проводимость шунта в узле $u_{ш}$, то результат вычисления производных покажет ветви и узлы, изменение проводимости которых (шунта в которых) больше всего будет изменять величину реакции сети на возмущения (дефинирующие (определяющие) узлы и ветви).

Снижение чувствительности сенсорных узлов происходит с ростом минимального сингулярного значения матрицы Якоби σ_1 . При этом максимальное увеличение σ_1 происходит при изменении проводимости определяющей

ветви или при введении новой ветви между определяющим узлом и узлом, в котором напряжение фиксировано (поддерживается постоянным). Минимальное сингулярное значение матрицы Якоби увеличивается с увеличением проводимости ёмкостного шунта в узлах сети. Наибольшее увеличение следует ожидать при установке шунта в определяющем узле. Аналогичный эффект может быть достигнут при помощи фиксации напряжения в определяющем узле с помощью источника реактивной мощности.

Во второй главе рассмотрено использование сингулярного анализа матрицы Якоби для определения сенсорных и дефинирующих элементов в ЭЭС на примере тестовой схемы, приведённой на рис. 1.

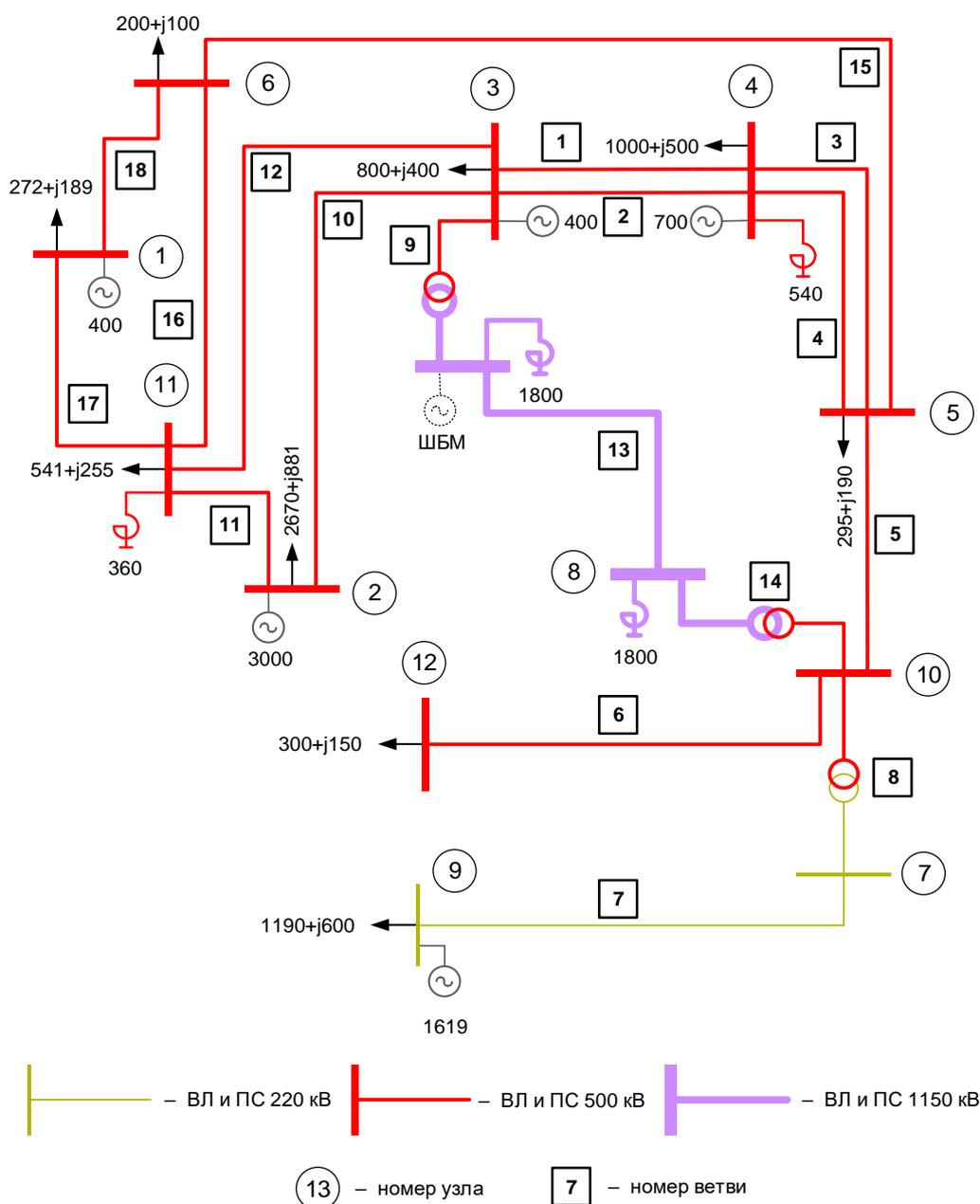


Рис. 1. Схема исследуемой сети

Для данной сети определены сенсорные узлы тремя способами:

- 1) методом визуализации обратной матрицы Якоби (рис. 2 и 3);
- 2) с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби (рис. 4 и 5);
- 3) с помощью расчётов режимов работы электрической сети в ПК «RastrWin» (рис. 6 и 7).

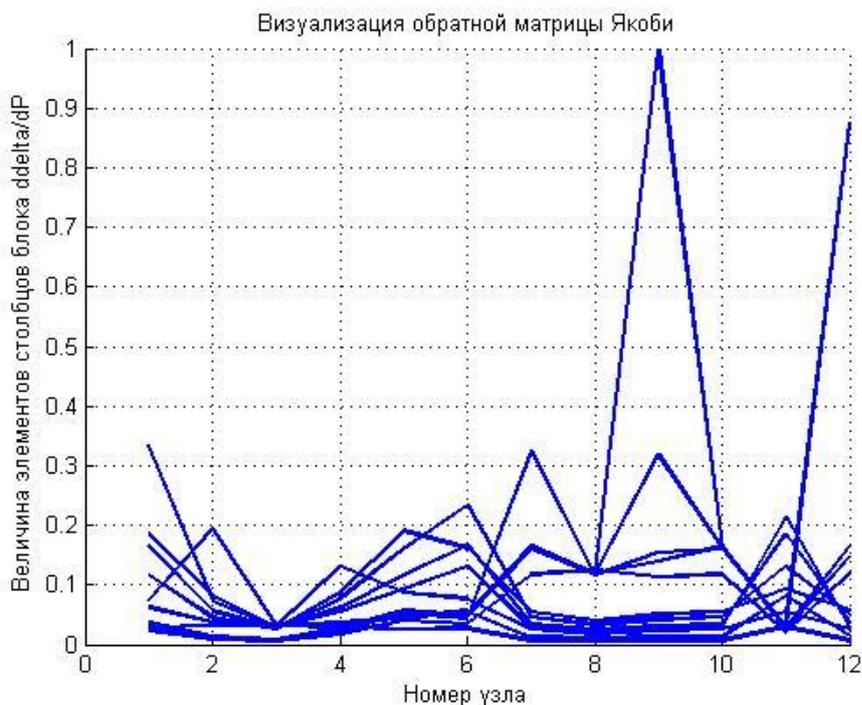


Рис. 2. Визуализация элементов блока $d\delta/dP$

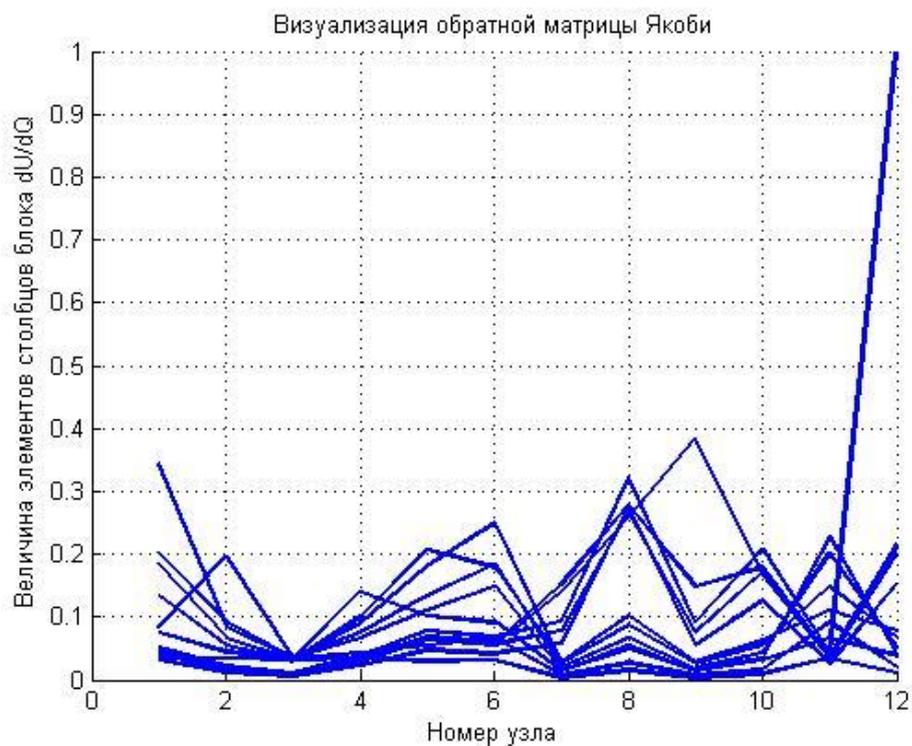


Рис. 3. Визуализация элементов блока dU/dQ

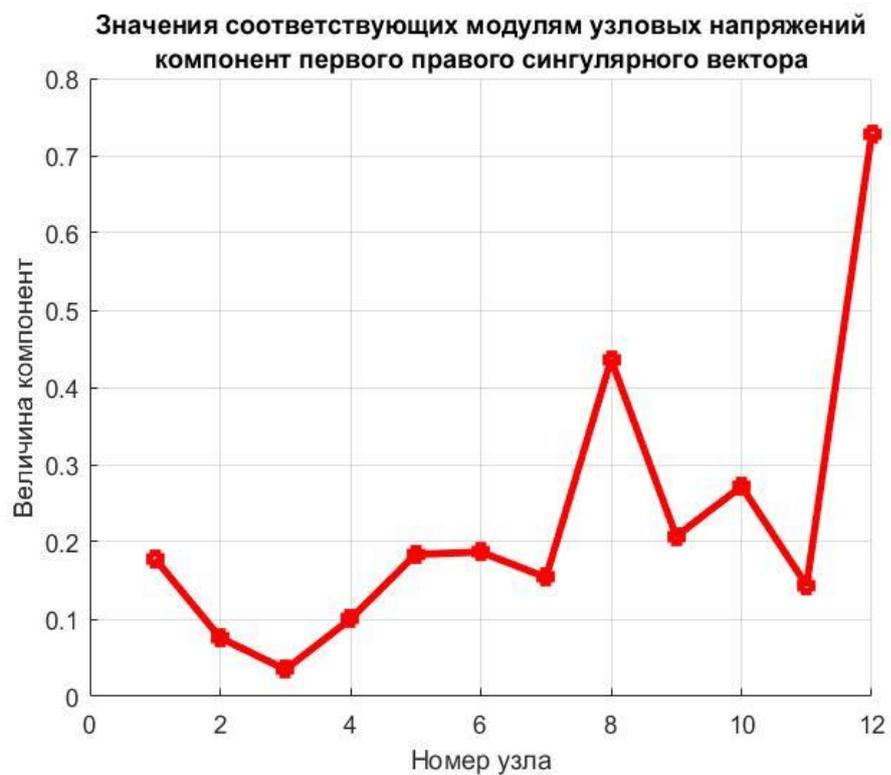


Рис. 4. Значения соответствующих модулям узловых напряжений компонент первого правого сингулярного вектора

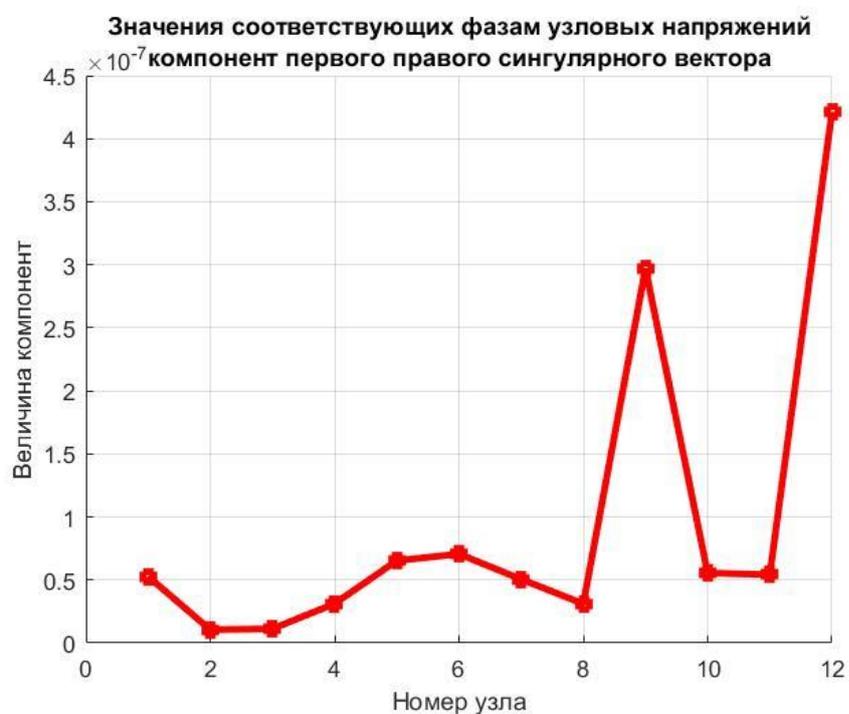


Рис. 5. Значения соответствующих фазам узловых напряжений компонент первого правого сингулярного вектора

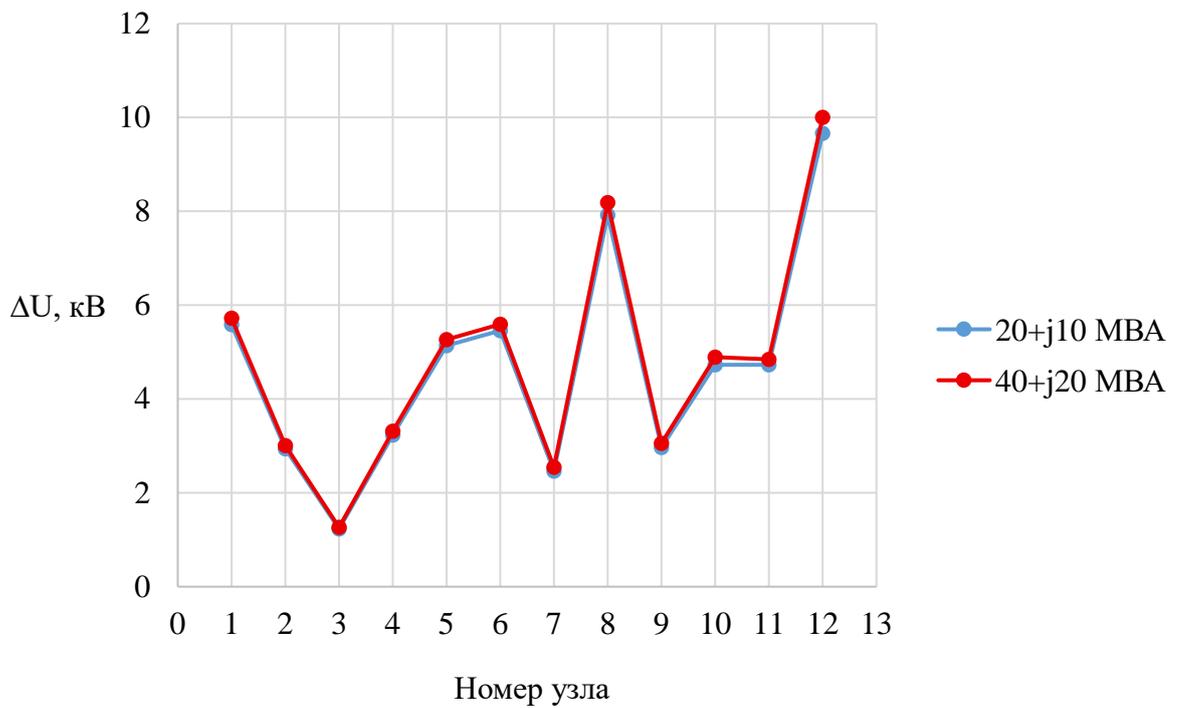


Рис. 6. Изменение модуля напряжения в узлах при увеличении мощности нагрузки в каждом узле на 20+j10 МВА и 40+j20 МВА (расчёт в ПК «RastrWin»)

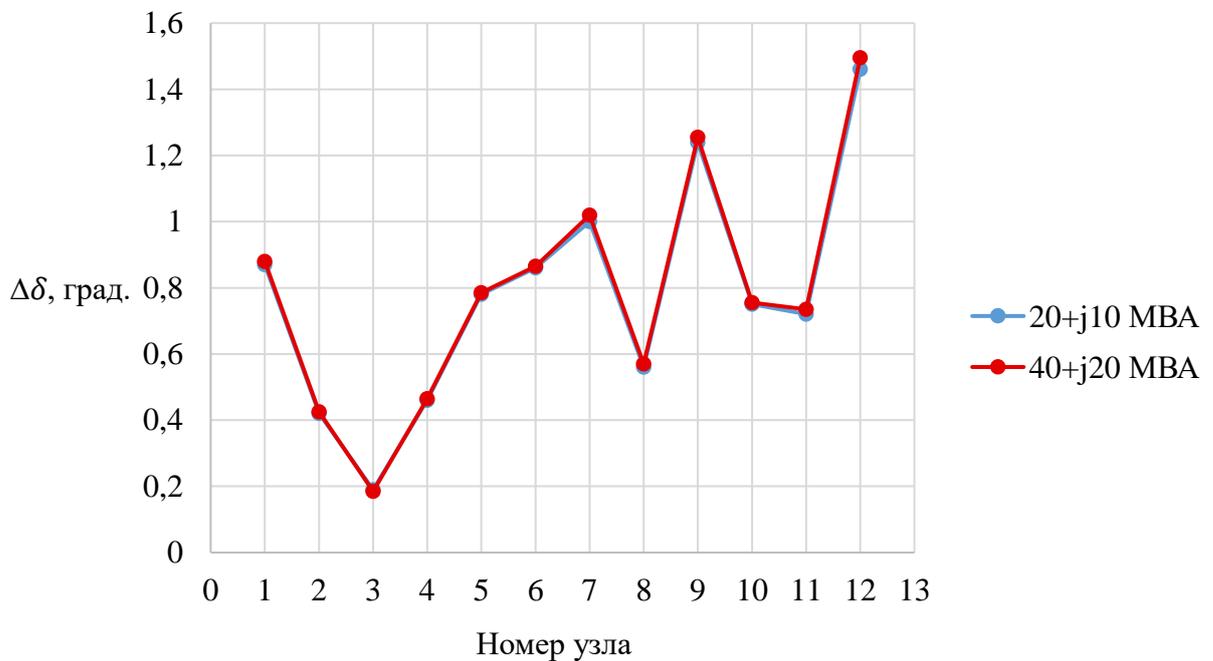


Рис. 7. Изменение фазы напряжения в узлах при увеличении мощности нагрузки в каждом узле на 20+j10 МВА и 40+j20 МВА (расчёт в ПК «RastrWin»)

Результаты определения чувствительных узлов, полученные с помощью трёх разных методов, сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Параметр	Метод		
	Визуализация обратной матрицы Якоби	Сингулярный анализ матрицы Якоби	Эксперимент в ПК «RastrWin»
Модуль напряжения в узле	8, 12	8, 12	8, 12
Фаза напряжения в узле	9, 12	9, 12	9, 12

Как видно из таблицы 1, все три метода дали один и тот же результат определения сенсорных узлов по каждому из параметров.

С помощью вычисления производной минимального сингулярного значения по проводимостям ветвей и шунтов в узлах сети найдены дефинирующие узлы и ветви (рис. 8 и 9).

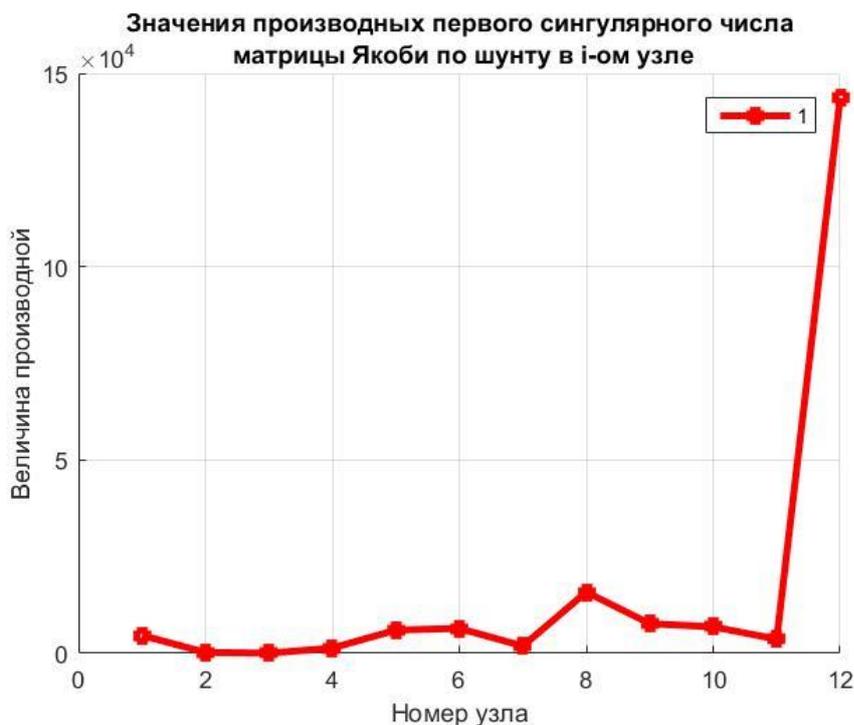


Рис. 8. Производные минимального сингулярного значения матрицы Якоби по проводимости шунта в каждом из узлов

После этого проведена проверка полученных результатов с помощью экспериментальных расчётов режимов в ПК «RastrWin», которая подтвердила

правильность определения дефинирующих элементов с помощью вычисления производной минимального сингулярного значения.

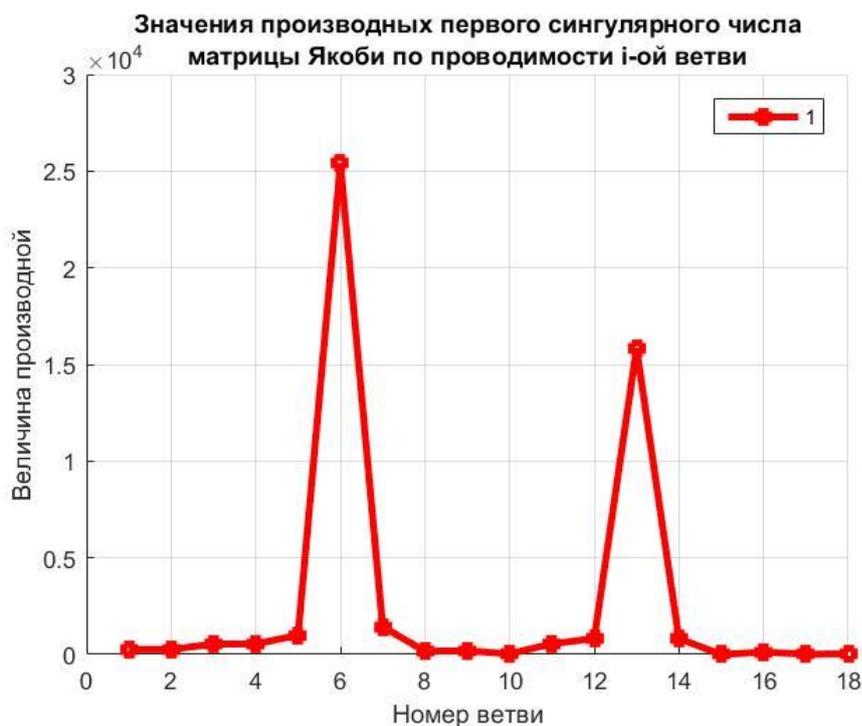


Рис. 9. Производные минимального сингулярного значения матрицы Якоби по проводимости каждой ветви

В главе также проведены исследования, аналогичные изложенным выше, но применительно к реальной энергосистеме (эквивалентной схеме энергосистемы Калининградской области, рис. 10).

В третьей главе проиллюстрировано исследование статической устойчивости с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби.

Для тестовой энергосистемы проанализировано поведение минимального сингулярного значения матрицы Якоби при утяжелении режима. Установлено, что при приближении к границе статической устойчивости ЭЭС минимальное сингулярное значение матрицы Якоби снижается до нуля (рис. 11). Таким образом, оно может быть использовано в качестве индикатора статической устойчивости.

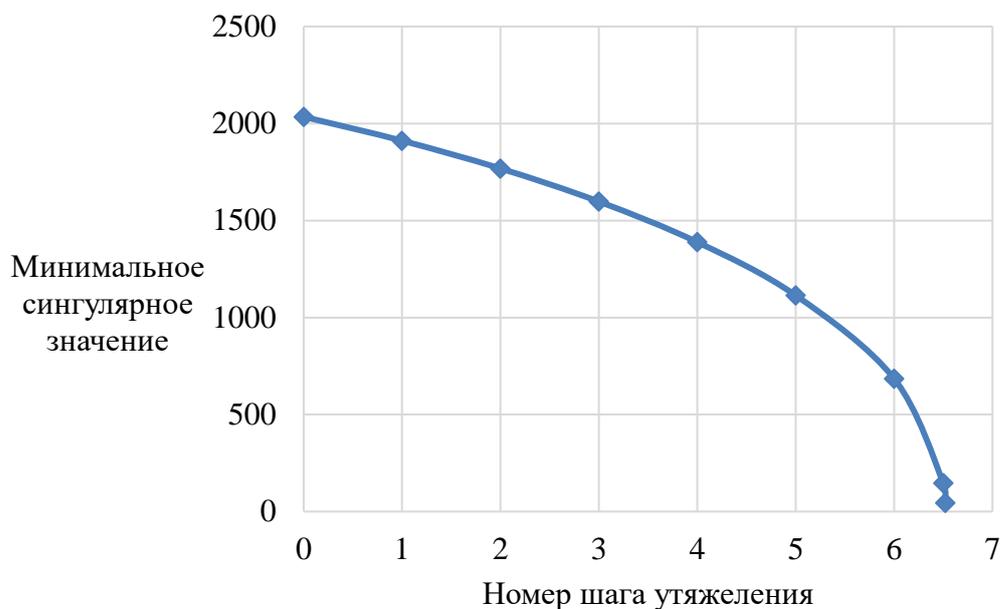


Рис. 11. Зависимость минимального сингулярного значения матрицы Якоби от номера шага утяжеления

Определённые в главе 2 сенсорные по модулю напряжения узлы (рис. 4) оказываются критическими с точки зрения статической устойчивости: в них наиболее вероятен коллапс напряжения при одновременном одинаковом утяжелении всех узлов (рис.12), а при поочередном утяжелении каждого узла им требуется минимальное приращение мощности нагрузки до достижения предела статической устойчивости (рис. 13).

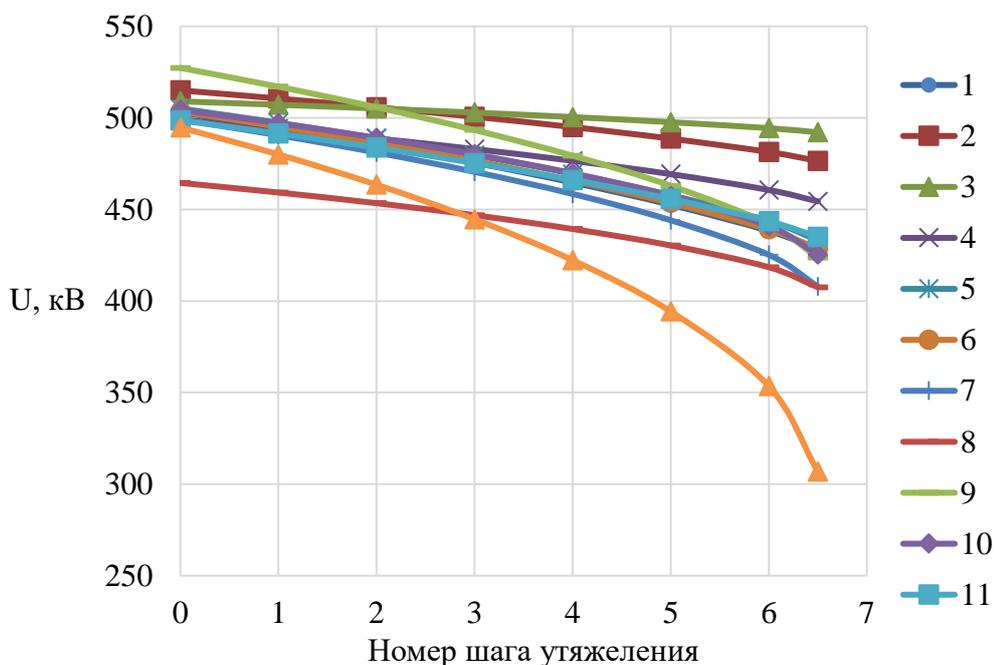


Рис. 12. Напряжение в узлах рассматриваемой схемы сети при одновременном пошаговом утяжелении узлов

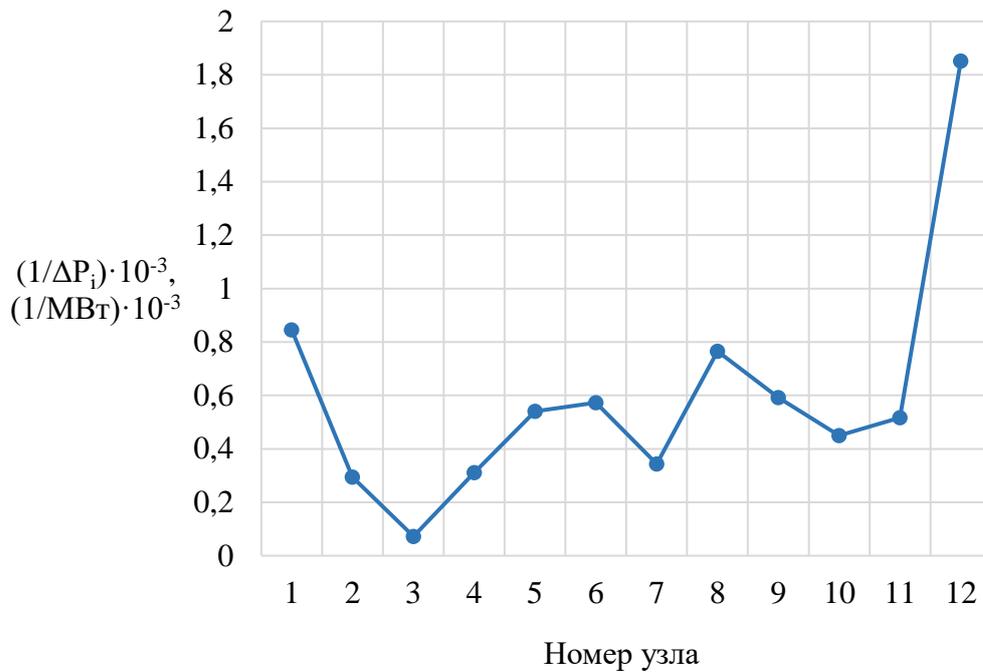


Рис. 13. Величины, обратные приращениям мощности до потери статической устойчивости, для каждого узла

Также установлено, что изменение параметров найденных с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби определяющих узлов и ветвей является более эффективным способом повышения запаса статической устойчивости, чем изменение параметров остальных узлов и ветвей (рис. 14 и 15).

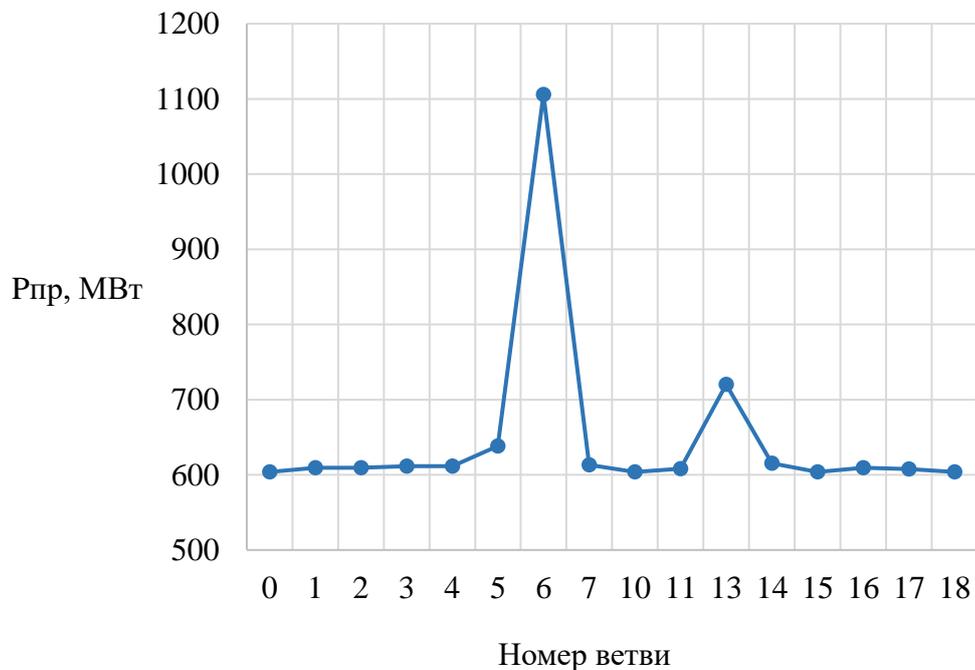


Рис. 14. Зависимость предельной мощности в узле номер 12 от номера ветви, у которой изменялось сопротивление

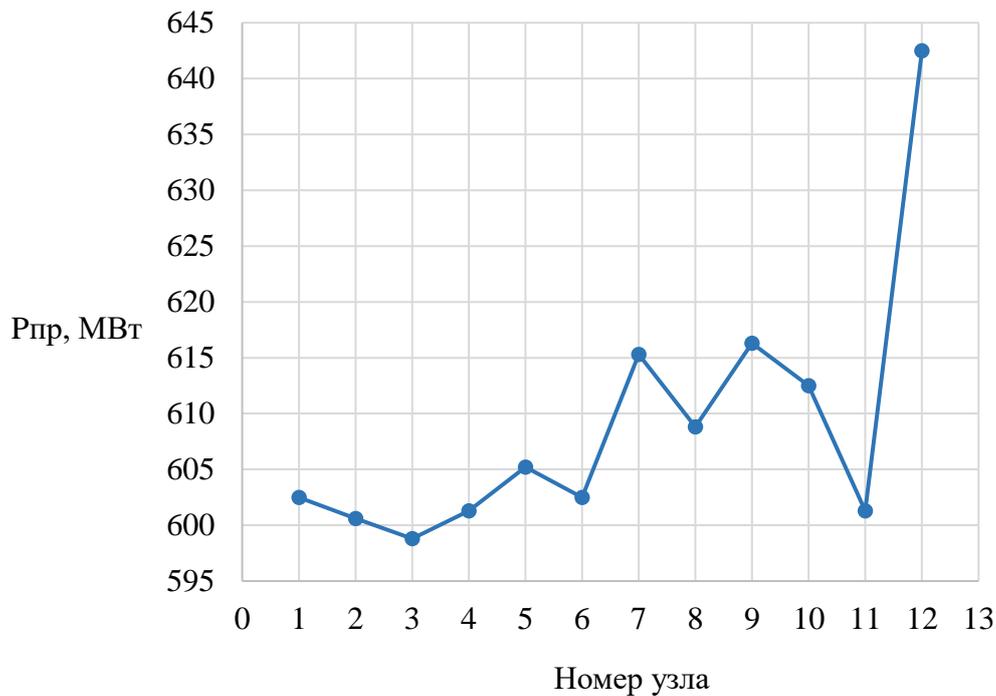


Рис. 15. Зависимость предельной мощности в узле номер 12 от номера узла, в котором устанавливался шунт

Аналогичные исследования проведены применительно к реальной энергосистеме, приведённой на рис. 10.

В четвёртой главе исследовано изменение сенсорных и дефинирующих элементов, минимального сингулярного значения матрицы Якоби и пределов статической устойчивости в ремонтных схемах и при разных сценариях изменения исходного режима для двух рассмотренных выше энергосистем. Сделан вывод о том, что сильнее всего на изменения в сенсорных и дефинирующих элементах влияет отключение ветвей (особенно дефинирующих ветвей и ветвей, соединяющих дефинирующие элементы). Данное обстоятельство позволяет существенно сократить число ремонтных схем, которые требуется рассмотреть в ходе анализа свойств ЭЭС с точки зрения чувствительности и неоднородности.

В пятой главе рассмотрены возможные способы практического применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби. К ним относятся:

1. Определение критических по напряжению узлов и выбор оптимальной траектории утяжеления.

2. Оценка запаса статической устойчивости электроэнергетической системы.

3. Определение наиболее эффективных вариантов сетевого строительства и расстановки средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) и устройств продольной компенсации (УПК), в том числе FACTS, с точки зрения снижения чувствительности схемы.

4. Определение наиболее эффективных способов повышения предельных по статической апериодической устойчивости перетоков активной мощности в контролируемых сечениях в нормальной и ремонтных схемах сети.

5. Разработка адаптивных систем противоаварийной автоматики.

6. Выбор оптимальных вариантов перспективного развития электрических сетей.

Приведены конкретные примеры применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби:

- 1) выбор оптимальной траектории утяжеления (получена траектория, дающая предельный по статической апериодической устойчивости переток активной мощности в контролируемом сечении, который на 53% меньше, чем предельный переток по остальным рассмотренным траекториям);
- 2) наиболее эффективное повышение предельных перетоков с помощью установки СКРМ (найден узел, установка БСК в котором даёт увеличение предельного перетока в рассматриваемом сечении на 20% большее, чем установка БСК в узле, в котором происходило увеличение нагрузки при утяжелении режима работы электрической сети);
- 3) наиболее эффективное повышение предельных перетоков с помощью установки УПК или введения параллельных ветвей в схему (найдена ветвь, снижение сопротивления которой позволило повысить предельную нагрузку узла по условию сохранения статической устойчивости на 38,4% – 42,3% больше, чем при аналогичном снижении сопротивления других рассмотренных ветвей);

- 4) определение наиболее эффективных мест реализации управляющих воздействий противоаварийной автоматики (увеличение эффективности реализации управляющего воздействия автоматики ограничения снижения напряжения на отключение нагрузки в предложенном с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби узле составило 21,3% по сравнению с отключением нагрузки в том узле, в котором происходит снижение напряжения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена вопросу определения в электроэнергетической системе элементов, которые больше других реагируют на случайные возмущения режима работы (сенсорных элементов), а также элементов, изменение параметров которых наибольшим образом сказывается на изменении величины реакции всей ЭЭС и её отдельных элементов на такие возмущения.

В начале работы приведено теоретическое обоснование предлагаемого метода анализа ЭЭС. Далее с помощью разработанного на его основании программного кода в среде «Matlab» произведено определение сенсорных и дефинирующих элементов для двух разных схем (для произвольной тестовой схемы и для эквивалентной схемы энергосистемы Калининградской области).

По результатам нахождения сенсорных и дефинирующих элементов были предложены способы наиболее эффективного снижения чувствительности ЭСС:

- компенсация индуктивного сопротивления ветвей схемы с помощью установки УПК на дефинирующих ветвях;
- установка источников реактивной мощности (например, конденсаторных батарей) в дефинирующих узлах;
- фиксация модуля напряжения в дефинирующих узлах с помощью источника реактивной мощности;
- ввод в схему новых ветвей между дефинирующим узлом и узлом, в котором напряжение фиксировано.

Также произведено исследование соотношения результатов, полученных с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби, и закономерностей, наблюдающихся в части статической устойчивости рассматриваемых схем.

Экспериментальные исследования с помощью расчётов электрических режимов в ПК «RastrWin» показали, что результаты, полученные с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби и вычисления производных минимального сингулярного значения матрицы Якоби, совпадают с результатами расчётов режимов работы ЭЭС.

Для определения влияния изменений схемно-режимной ситуации в ЭЭС на результаты применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби проведены пять серий опытов с различными характерами изменения схемно-режимной ситуации. Сделан вывод о том, что наибольшее влияние на изменение сенсорных и дефинирующих элементов оказывает отключение ветвей между дефинирующими узлами (когда они расположены по обоим концам ветви) и дефинирующих ветвей. Данное обстоятельство позволяет существенно сократить число ремонтных схем, которые требуется рассмотреть в ходе анализа свойств ЭЭС с точки зрения чувствительности и неоднородности.

В работе предложены и обоснованы следующие задачи в сфере электроэнергетики, для решения которых могут быть использованы результаты, полученные с помощью сингулярного анализа матрицы Якоби и вычисления производных минимального сингулярного значения матрицы Якоби:

1. Определение критических по напряжению узлов и выбор оптимальной траектории утяжеления.
2. Оценка запаса статической устойчивости электроэнергетической системы.
3. Определение наиболее эффективных вариантов сетевого строительства и расстановки средств компенсации реактивной мощности (СКРМ) и устройств продольной компенсации (УПК), в том числе FACTS, с точки зрения снижения чувствительности схемы.

4. Определение наиболее эффективных способов повышения предельных по статической апериодической устойчивости перетоков активной мощности в контролируемых сечениях в нормальной и ремонтных схемах сети.

5. Разработка адаптивных систем противоаварийной автоматики.

6. Выбор оптимальных вариантов перспективного развития электрических сетей.

По ходу выполнения исследований сделаны важные выводы и найдены закономерности, которые будут полезны при дальнейшем использовании метода сингулярного анализа матрицы Якоби при изучении свойств энергосистем.

В работе приведены конкретные примеры применения рассматриваемого метода:

- 1) выбор оптимальной траектории утяжеления, дающей наименьший предельный по статической апериодической устойчивости переток активной мощности в контролируемом сечении;
- 2) наиболее эффективное повышение предельных перетоков с помощью установки СКРМ;
- 3) наиболее эффективное повышение предельных перетоков с помощью установки УПК или введения параллельных ветвей в схему;
- 4) определение наиболее эффективных мест реализации управляющих воздействий противоаварийной автоматики.

Основным преимуществом рассмотренной методики является то, что сингулярный анализ матрицы Якоби позволяет на основе структуризации исходной схемы ЭЭС и ее параметров выявить характерные свойства энергосистемы без проведения большого объема традиционных расчетов режимов. Таким образом, применение анализа структуры ЭЭС позволяет значительно снизить объем вычислительной работы при исследовании ЭЭС.

Результаты, полученные с помощью рассмотренной методики, могут быть использованы во многих областях электроэнергетики и позволяют повысить надёжность и эффективность функционирования энергосистем.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Белов Е. И., Латманнизова Ю. Н., Сорокин Е. В. Применение визуализации обратной матрицы Якоби и сингулярного анализа для определения сенсорных узлов в электроэнергетических системах // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2017, № 2 (77). – С. 87–94.

2. Белов Е. И., Латманнизова Ю. Н., Сорокин Е. В. Применение сингулярного анализа для определения сенсорных по току ветвей в электроэнергетических системах // Электроэнергия. Передача и распределение, 2018, № 4 (49). – С. 48–52.

3. Белов Е. И. Исследование влияния параметров узлов и ветвей на сенсорность элементов электроэнергетической системы // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2018, № 2 (79). – С. 88–95.

4. Белов Е. И., Сорокин Е. В. Применение сингулярного анализа матрицы Якоби при оценке статической устойчивости ЭЭС // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2019, № 1 (80). – С. 117–121.

5. Белов Е. И., Сорокин Е. В. Области практического применения метода сингулярного анализа матрицы Якоби в электроэнергетике // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2019, № 2 (81). – С. 84–90.