

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Жуйков Александр Константинович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ  
СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ  
ПРИ ПАССИВНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.4.3 – Электроэнергетика

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Бацева Наталья Ленмировна**

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Инженерной школы энергетики, г. Томск

**Официальные оппоненты:**

**Семькина Ирина Юрьевна**

доктор технических наук, доцент, ФГБНУ «Институт природно-технических систем», главный научный сотрудник, г. Севастополь

**Ковалев Владимир Захарович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», профессор Политехнической школы, г. Ханты-Мансийск

Защита состоится 16 декабря 2025г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.17  
кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники  
Инженерной школы энергетики



А.А. Суворов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Проблема и ее актуальность.** В расчётных моделях энергосистем зависимость мощности от изменения напряжения в узлах нагрузки отражается с помощью линейных или полиномиальных моделей статических характеристик нагрузки по напряжению (СХН). Изменение количественного и качественного состава электроприёмников в узлах нагрузки привело к использованию некорректных СХН, что вносит погрешность в результаты расчётов как установившихся, так и предельных режимов работы энергорайонов энергосистем.

Наиболее точным способом получения моделей СХН является активный эксперимент, но он сопряжен с трудностями и издержками при реализации, связанными с принудительным изменением параметров режима в узле нагрузки и в прилегающей электрической сети. Поэтому в работе рассматривается получение моделей СХН по результатам пассивного эксперимента, реализация которого не требует изменений режима работы электрических сетей энергосистем.

Идентификация корректных моделей СХН при пассивном эксперименте – это отдельная задача, которая включает способы получения измерений параметров режима в узле нагрузки и способы обработки измерений. Для её решения необходимо разработать методику обработки измерений режимных параметров, измеренных в пассивном эксперименте, с учётом факторов, влияющих на корректность обработки измерений для идентификации моделей СХН в режиме реального времени.

Идея диссертационной работы заключается в автоматическом определении числа состояний нагрузки (кластеров), последующей кластеризации измерений параметров режима *EM*-алгоритмом, учёте влияния «реакции сети» при обработке массивов с помощью преобразований параметров распределения выделенных состояний нагрузки, отборе наиболее значимых состояний, применении оптимизационного расчёта для идентификации полиномиальных моделей СХН.

Автоматическое определение числа кластеров выполнено модифицированным алгоритмом Сьюгер-Джеймса. Учёт «реакции сети» обеспечивается за счёт предварительной кластеризации экспериментальных данных, применения алгоритма преобразования параметров распределения кластеров для исключения влияния «реакции сети» и выбора подходящих кластеров для анализа. Отбор кластеров выполнен на основе количественной оценки весов и значений определителя ковариационной матрицы. Кластеризация позволяет выполнить дополнительную фильтрацию исходных массивов измерений. Оптимизационный расчёт, выполненный на основе метода множителей Лагранжа и итерационного расчёта по методу Ньютона, позволяет из измерений параметров режима, полученных в пассивном эксперименте при ограниченном диапазоне изменения напряжения, получить корректную модель СХН, которая будет точно отражать зависимость мощности нагрузки от напряжения при значениях напряжений, близких к критическим значениям.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в развитие способов идентификации СХН внесли Российские исследователи: Бураков И.Ф., Бушуева О.А., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Гуревич Ю.Е., Дзюба М.А., Золоев Б.П., Коновалов Ю.С., Коржов А.В., Кравченко В.Ф., Кугелевичус И.Б., Кулешов А.И., Либова Л.Е., Мурзин А.Ю., Нагай В.И., Панкратов А.В., Тавлинцев А.С., Тарасенко В.В., Хачатрян Э.А., Шульпин А.А., и др. Среди работ, посвящённых обработке массивов параметров режима, полученных в пассивном эксперименте, стоит отдельно отметить работы Ю.Е. Гуревича, в которых введено понятие «реакция сети», приведён способ её учёта при идентификации моделей СХН с использованием расчётной модели.

За рубежом развитием тематики занимаются исследователи: A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, D. Zhao, I. F. Visconti, D. A. Lima, J. M. C. d. S. Costa, N. R. d. B. C. Sobrinho, Z.Y. Dong, A. Borghetti, K. Yamashita, A. Gaikwad, P. Pourbeik, J. V. Milanović, F. S. Chassin, E. T. Mayhorn, M. Elizondo, Shuai Lu, J. Керка и др.

**Целью работы** является разработка методики определения моделей СХН по напряжению на основе экспериментально измеренных параметров режима при проведении пассивного эксперимента, с учётом влияния внешней электрической сети.

**Объектом исследования** являются модели СХН по напряжению узлов нагрузки, для которых проводятся пассивные эксперименты.

**Предметом исследования** являются: влияние «реакции сети» на параметры режима в узле нагрузки; состояния нагрузки, выделяемые из массивов параметров режима при кластеризации; процесс идентификации полиномиальных моделей СХН на интервале изменения напряжения, характерном при проведении пассивного эксперимента.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих способов идентификации моделей СХН, выявление недостатков подходов к учёту «реакции сети» и к выделению состояний исследуемой нагрузки в измерениях параметров режима при проведении пассивного эксперимента.
2. Разработка способа автоматического определения числа состояний нагрузки (кластеров) с учётом особенностей измерений параметров режима в пассивном эксперименте.
3. Разработка методики применения *EM*-алгоритма кластеризации измерений параметров режима для определения линейных моделей СХН.
4. Определение критериев отбора наиболее значимых кластеров, параметры которых можно использовать для идентификации моделей СХН.
5. Разработка методики учёта влияния «реакции сети» на параметры режима в узле нагрузки.
6. Объединение методик кластеризации измерений и учёта влияния «реакции сети» на измерения параметров режима для получения итоговых линейных моделей СХН.

7. Разработка методики идентификации полиномиальных моделей СХН по линейным моделям на интервале изменения напряжения, превышающем диапазон изменения напряжения в пассивном эксперименте.

8. Разработка алгоритма и программного обеспечения для реализации предложенных методик.

9. Проведение исследований, подтверждающих корректность разработанных методик.

#### **Научная новизна работы:**

При решении поставленных задач были получены следующие результаты, определяющие научную новизну работы:

1. Модифицирован алгоритм Сьюгер-Джеймса определения числа кластеров, что позволяет корректно выделить состояния нагрузки в измерениях параметров режима, имеющих визуально различные подмножества, в условиях некорректной работы существующих методов определения числа кластеров.

2. Разработана методика аналитического расчёта степени влияния «реакции сети» – коэффициентов «реакции сети» по активной и реактивной мощностям, позволяющая проанализировать зависимости коэффициентов от параметров электрического режима и от параметров электрической сети.

3. Разработана методика, позволяющая учесть влияние «реакции сети» на экспериментально измеренные параметры режима путём трёхмерной кластеризации измерений параметров режима, преобразования параметров распределения выделенных кластеров и отбора наиболее значимых кластеров.

4. Разработана и апробирована методика идентификации полиномиальных моделей СХН по напряжению с использованием оптимизационного расчёта по методу множителей Лагранжа по известному значению коэффициента наклона линейной СХН по напряжению, которая позволяет получить полиномиальную модель СХН в диапазоне изменения напряжения, как и при активном эксперименте, но без вмешательства в режим работы энергосистемы.

#### **Теоретическую значимость работы определяют:**

1. Модификация алгоритма Сьюгер-Джеймса определения числа кластеров, с помощью которой корректно определяются число состояний нагрузки в измерениях параметров режима, полученных в пассивном эксперименте, в соответствии с технологическими процессами, происходящими в узлах нагрузки.

2. Учет и анализ факторов, способствующих уменьшению степени влияния «реакции сети» на измерения параметров режима.

3. Решение задачи по учёту влияния «реакции сети» на основе трёхмерной кластеризации измерений параметров режима, преобразования параметров распределения выделенных кластеров и отбора наиболее значимых из них при идентификации моделей СХН.

4. Учёт влияния «реакции сети» при определении полиномиальных моделей СХН за счёт оптимизационного расчёта с ограничениями типа равенств по известным линейным моделям СХН.

**Практическая значимость работы заключается в следующем:**

1. Разработано программное обеспечение для идентификации линейных и полиномиальных моделей СХН по напряжению с возможностью учёта влияния «реакции сети» и трёхмерной кластеризации массивов измерений параметров режима в узле нагрузки;
2. Предложены мероприятия, позволяющие снизить влияние «реакции сети» при проведении пассивного эксперимента, что позволяет получить СХН по напряжению, использование которых увеличивает точность расчёта установившихся режимов.
3. Произведена оценка влияния коэффициентов СХН на величины предельных перетоков активной мощности по статической апериодической устойчивости в контролируемых сечениях относительно существующих значений, показывающая, что использование корректных моделей СХН крайне важно, так как отклонения предельных перетоков по межсистемным связям при использовании существующих типовых СХН и СХН, полученных с помощью разработанных методик, достигают 18%, а в абсолютных величинах могут составлять до 125 МВт, что оказывает значительное влияние на работу автоматических регуляторов и ограничителей перетоков мощности в контролируемых сечениях.

Разработанная методика идентификации позволяет получить полиномиальные модели СХН, точнее отражающие поведение нагрузки по сравнению с линейными моделями, без проведения активных экспериментов.

Элементы методики идентификации моделей СХН в части кластеризации и учёта влияния «реакции сети» использованы при выполнении научно-исследовательских работ № 14.07-66/2020У «Определение статических характеристик нагрузки по напряжению для Иркутского алюминиевого завода» и № 14.07-191/2020У «Определение статических характеристик нагрузки по напряжению для промышленных потребителей, присоединённых к ПС 220 кВ Якурим».

**Методология и методы исследования.** При выполнении работы использованы: теория расчёта электрических режимов, методы математического моделирования, математической статистики, машинного обучения, кластеризации, экспериментальные исследования, методология проектирования информационных систем *SADT* (методология функционального моделирования работ).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модификация алгоритма Сьюгер-Джеймса для определения количества кластеров в массивах измерений параметров режима на основе максимизации степени трансформации  $\lambda$ .
2. Математическая модель влияния «реакции сети» на измерения параметров режима в узле нагрузки.
3. Методика идентификации линейной модели СХН по напряжению с учётом преобразования параметров распределения кластеров и отбора наиболее значимых из них по значениям веса кластера  $w$  и определителя ковариационной матрицы  $|K|$ .

4. Методика оптимизационного расчёта коэффициентов полиномиальной модели СХН с помощью метода множителей Лагранжа по известному значению коэффициента наклона линейной СХН.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена оценкой отклонений экспериментальных точек, соответствующих измерениям параметров режима, зафиксированным при проведении пассивных экспериментов, от результатов, полученных при применении разработанных методик идентификации СХН.

**Апробация результатов исследований.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на: V Международной научно-технической конференции «Mechanical Science and Technology Update» (MSTU 2021) (Омск, 2021), XII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи-2022» (Нижний Новгород, 2022), XIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи-2023» (Красноярск, 2023), VII Всероссийской конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (Тольятти, 2024), XXVI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2023) (Санкт-Петербург, 2023), Международной конференции, индексируемой в базах данных Scopus, 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Магнитогорск, 2024), CVIII Международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» (Новосибирск, 2025), Всероссийской научно-практической конференции «Наука России» (Пенза, 2025).

В составе научного коллектива автор диссертации принимал участие в хозяйственных договорах, заключенных между Национальным исследовательским Томским политехническим университетом и Филиалом АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири, по определению статических характеристик нагрузки по напряжению по данным активного и пассивного экспериментов для крупных промышленных потребителей.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 19 научных работах, в числе которых 4 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science, получены 1 патент РФ на изобретение, 1 патент РФ на полезную модель и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад** автора состоит в модификации алгоритма Сьюгер-Джеймса для определения числа состояний нагрузки, формировании положений методики идентификации моделей СХН по данным пассивного эксперимента, программной реализации разработанной методики идентификации моделей СХН, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов. Постановка решаемых задач, планирование экспериментов и подготовка публикаций проводились совместно с научным руководителем. Автор выражает благодарность сотрудникам Отделения

электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ и Филиалу АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири за помощь в решении задач диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 136 наименований, содержит 194 страницы, 12 таблиц, 121 рисунок, 5 Приложений.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует Паспорту научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика, так как рассматриваются вопросы развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения надежной и экономичной работы энергорайонов энергосистем.

Паспорту специальности 2.4.3 соответствуют следующие пункты:

1. Пункт 15 «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике».
2. Пункт 20 «Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии».

**Во введении** обозначена проблема, приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения о методах исследования, достоверности полученных результатов, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** на основе аналитического обзора работ и публикаций по теме диссертационного исследования сделан вывод о том, что СХН по напряжению позволяют повысить точность расчёта электрических режимов, что необходимо для решения технологических задач.

Анализ исследований показал, что по сравнению с аналитическим методом и активным экспериментом, использование пассивного эксперимента является перспективным способом для идентификации моделей СХН по напряжению, так как позволяет получать актуальные модели СХН узлов нагрузки без вмешательства в режим работы энергосистемы.

Известно, что недостатком результатов пассивного эксперимента является меньшая точность получаемых коэффициентов СХН по напряжению по сравнению с результатами активного эксперимента, что увеличивает отклонения расчётных параметров режима от фактически измеренных параметров.

Факторами, влияющими на снижение точности, являются:

1. Малый диапазон изменения напряжения в узле нагрузки по сравнению с диапазоном при проведении активного эксперимента;
2. Влияние «реакции сети».

Указанные факторы приводят к усложнению статистической обработки измерений. В ряде исследований подтверждается необходимость преобразования измерений для учёта влияния «реакции сети». В случае измерений в пассивном эксперименте преобразования трудоёмки и носят приближённый характер в сочетании с методиками разделения измерений, что необходимо для снижения влияния малого диапазона изменения напряжения.

Достаточно точный учёт «реакции сети» может быть выполнен путём вычисления производной напряжения по активной или реактивной мощности через Якобиан с предварительной кластеризацией измерений на отдельные кластеры, характеризующие состояния нагрузки, и выполнения преобразования для каждого выявленного кластера.

Кластеризация *EM*-алгоритмом по причине его универсальности при соответствии измерений параметров режима нормальному закону распределения требует наличия информации о числе кластеров в обрабатываемых измерениях. Этого невозможно добиться в случае обработки измерений в режиме реального времени, поэтому необходимо использовать алгоритмы для автоматического определения числа кластеров.

Наиболее подходящим является алгоритм Сьюгер-Джеймса, но основным препятствием для его применения при обработке измерений параметров режима является некорректная работа при плотных данных, имеющих визуально различимые подмножества. Поэтому при обработке измерений пассивного эксперимента требуется модификация алгоритма.

Анализ исследований в части определения СХН по напряжению при пассивном эксперименте также показал необходимость преобразования линейных моделей СХН в полиномиальные модели, так как из-за малой обусловленности систем уравнений, решаемых по методу наименьших квадратов (МНК), получаемые коэффициенты СХН имеют завышенные значения. Одним из способов исключения влияния малой обусловленности является использование оптимизационного расчёта с ограничениями типа равенств, учитывающих влияние «реакции сети».

**Во второй главе** представлены факторы, затрудняющие определение корректных моделей СХН по напряжению при пассивном эксперименте:

1. Измерения в массиве могут отражать зависимость мощности нагрузки не от напряжения, а от других факторов;
2. Применение линейной или полиномиальной регрессии для измерений, полученных в пассивном эксперименте, приводит к ухудшению обусловленности системы уравнений для определения коэффициентов СХН по сравнению с измерениями, полученными в активном эксперименте;
3. При различных уровнях потребления мощности может меняться состав подключенных электроприёмников, и полученная средняя СХН, не будет отражать реальное поведение исследуемой нагрузки.

Для корректной обработки массивов измерений пассивного эксперимента с целью идентификации модели СХН может быть использован *EM*-алгоритм кластеризации. Для его применения в качестве исходных данных требуется знать кластеризации. Для его применения в качестве исходных данных требуется знать

число кластеров в массивах измерений, что требует применения алгоритмов определения числа кластеров.

С целью модификации алгоритма Сьюгер-Джеймса рассматривается функция скачков трансформированных искажений и её дифференцирование по переменной  $\lambda$ . Максимум функции скачков трансформированных искажений достигается при значении  $\lambda$ , обеспечивающим равенство нулю производной функции скачков трансформированных искажений (1):

$$\lambda = \frac{\ln(\ln(D_k)) - \ln(\ln(D_{k-1}))}{\ln(D_k) - \ln(D_{k-1})}. \quad (1)$$

График зависимости  $\lambda$  от числа кластеров  $k$  для нормально распределённых измерений ( $n=5000$ ), явно визуально разделённого на три подмножества, приведён на рисунке 1.

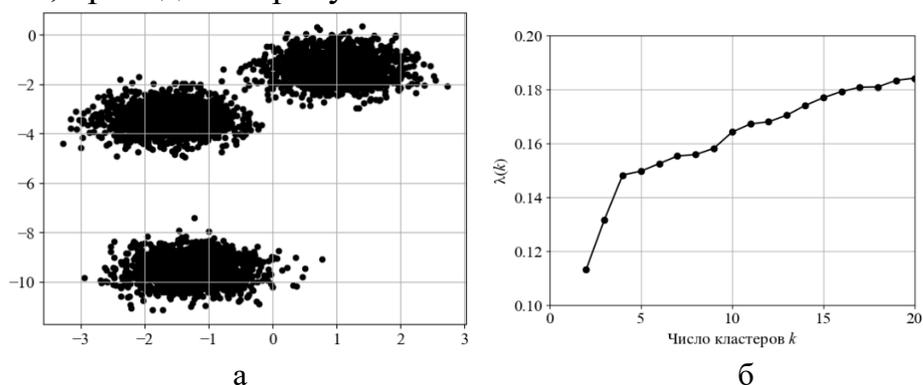


Рис. 1. а) нормально распределённое множество измерений  $n=5000$ ,  $k=3$ ; б) график зависимости  $\lambda(k)$

При определённом числе кластеров ( $k=4$  на рисунке 1, б), наблюдается перегиб кривой степени трансформации  $\lambda(k)$ , что свидетельствует о снижении зависимости степени трансформации от числа кластеров. Поэтому количество кластеров  $k$  определяют, как число  $k_{\text{мет}}$ , соответствующее точке наибольшего перегиба графика, уменьшенное на 1.

Для нахождения точек максимального перегиба вычисляют значения второй производной степени трансформации  $\lambda$ . Наибольший перегиб функции  $\lambda(k)$  будет в точке, в которой значение второй производной  $\lambda''(k)$  принимает наименьшее значение (рисунок 2).

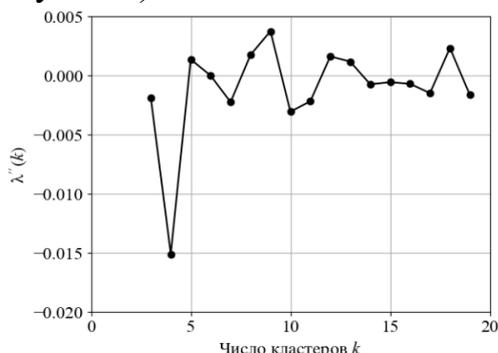


Рис. 2. График зависимости  $\lambda''(k)$

Предлагаемый алгоритм определения числа кластеров, основанный на максимизации степени трансформации  $\lambda$ , состоит из следующих этапов:

1. Итеративное выполнение *EM*-алгоритма при различном числе  $k$  и вычисление суммы внутрикластерных дисперсий  $D_k$  на каждой итерации;
2. Вычисление  $\lambda(k)$  для всех  $k > 1$ ;
3. Расчёт  $\lambda''(k)$  для всех  $k > 2$ ;
4. Выбор  $k^* = \text{argmin}(\lambda''(k)) - 1$  в качестве искомого числа кластеров.

На рисунках 3 представлены результаты тестирования алгоритма на измерениях параметров режима в узле нагрузки крупного промышленного потребителя.

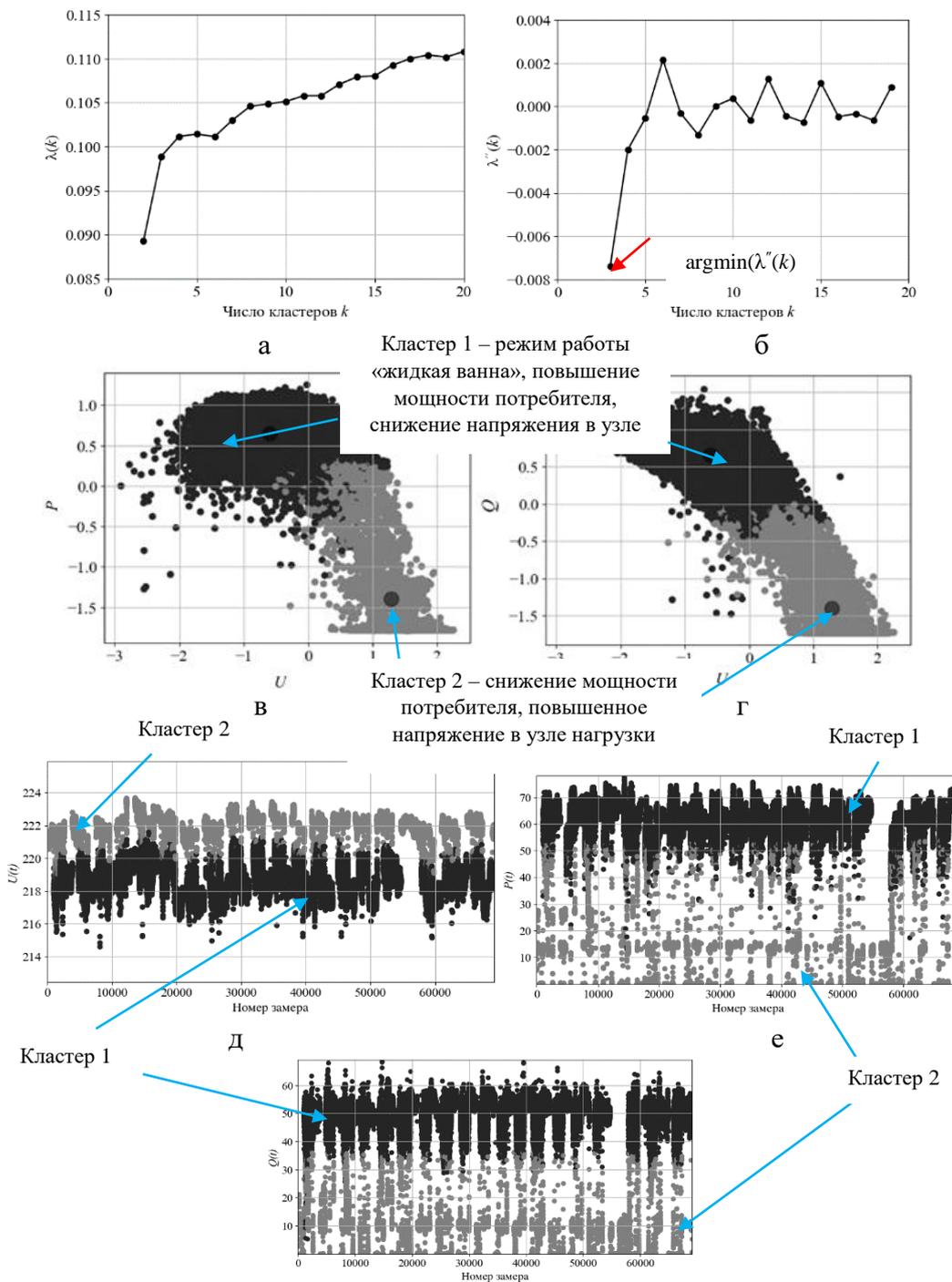


Рис. 3. а) график зависимости  $\lambda(k)$ ; б) график зависимости  $\lambda''(k)$ ; в), г) результаты применения *EM*-алгоритма на стандартизированных измерениях при  $k = k^*$ ; в) в координатах  $P(U)$ ; г) в координатах  $Q(U)$ ; д), е), ж) графики зависимости от времени с нанесением результатов применения *EM*-алгоритма; д)  $U(t)$ , е)  $P(t)$ , ж)  $Q(t)$

Из результатов следует, что выделенные подмножества в реальных массивах измерений соответствуют технологическим процессам, протекающим в узлах нагрузки, и характеризуются различными параметрами электрического режима.

Параметры электрического режима приведены к единой оси времени, поэтому для определения линейных моделей СХН можно применить трёхмерную кластеризацию в координатах  $U, P, Q$ .

Параметры распределения выделенных кластеров, полученные с помощью *EM*-алгоритма, используются для вычисления коэффициентов линейной модели СХН. Для исключения влияния погрешностей измерений режимных параметров проводят отбор кластеров на основании значений определителя ковариационной матрицы и веса кластера (2).

$$w_k \geq w_{max} - \sigma_w, \quad |\mathbf{K}_k| \geq |\mathbf{K}_{min}| + \sigma_{|\mathbf{K}|}, \quad (2)$$

Где  $w_{max}, \sigma_w$  – значения максимального веса и среднеквадратичного отклонения весов найденных кластеров соответственно;  $|\mathbf{K}_{min}|, \sigma_{|\mathbf{K}|}$  – значения минимального определителя ковариационной матрицы и среднеквадратичного отклонения определителей ковариационных матриц найденных кластеров соответственно.

**В третьей главе** приводятся исследования влияния «реакции сети» на параметры электрического режима в узле нагрузки. В главе 1 отмечено, что по измерениям, полученным при проведении пассивного эксперимента, точно можно определить только линейные модели СХН, так как диапазон изменения напряжения в пассивном эксперименте минимальный, и не позволяет получить полиномиальные модели СХН по напряжению. Поэтому при учёте влияния «реакции сети» вначале рассматриваются линейные модели СХН по напряжению.

$$\text{Коэффициенты «реакции сети» } k_P = \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_{\substack{P=P_m \\ Q=Q_m}}, \text{ и } k_Q = \left. \frac{\partial U}{\partial Q} \right|_{\substack{P=P_m \\ Q=Q_m}}, \text{ вычисляются}$$

аналитически по выражениям (3) и (4):

$$k_P = \frac{-\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (X_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2}}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (R_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot (X_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) + R_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m)) - 2X_i \cdot k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m - 2 \sum_{i=1}^n B_i \cdot U_m}{R_i^2 + X_i^2} \right) - \left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot (R_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) - X_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m)) - 2R_i \cdot k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m - 2 \sum_{i=1}^n G_i \cdot U_m}{R_i^2 + X_i^2} \right)}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (X_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right)} \quad (3)$$

$$k_Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (R_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2}}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (R_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) + X_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot (X_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) + R_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m)) - 2X_i \cdot k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - 2 \sum_{i=1}^n B_i \cdot U_m \right) - \left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot (R_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) - X_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m)) - 2R_i \cdot k_{Ti}^I k_{Ti}^U U_m}{R_i^2 + X_i^2} - 2 \sum_{i=1}^n G_i \cdot U_m \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{k_{Ti}^I \cdot U_i \cdot U_m \cdot (X_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) - R_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_m))}{R_i^2 + X_i^2} \right)} \quad (4)$$

Анализ выражений (3) и (4) показал, что коэффициенты «реакции сети»  $k_P$  и  $k_Q$  зависят от следующих параметров сетевых элементов:

1.  $k_{Ti}$  – коэффициент трансформации  $i$ -й связи;
2.  $R_i, X_i$  – активное и реактивное сопротивления  $i$ -й связи с питающим узлом;
3.  $G_i, B_i$  – активная и реактивная проводимости на землю  $i$ -й связи с питающим узлом, примыкающие к узлу нагрузки.

Коэффициенты  $k_P$  и  $k_Q$  зависят также и от режимных параметров:

1.  $U_i$  – модуль напряжения  $i$ -го питающего узла;
2.  $U_m$  – модуль рабочего напряжения узла нагрузки;
3.  $\delta_i - \delta_m$  – разность электрических углов напряжения  $i$ -го питающего узла и рабочего напряжения узла нагрузки.

На рисунках 4 представлены графики зависимостей  $k_P(X), k_Q(X), k_P(R), k_Q(R)$  при различных значениях сетевых параметров.

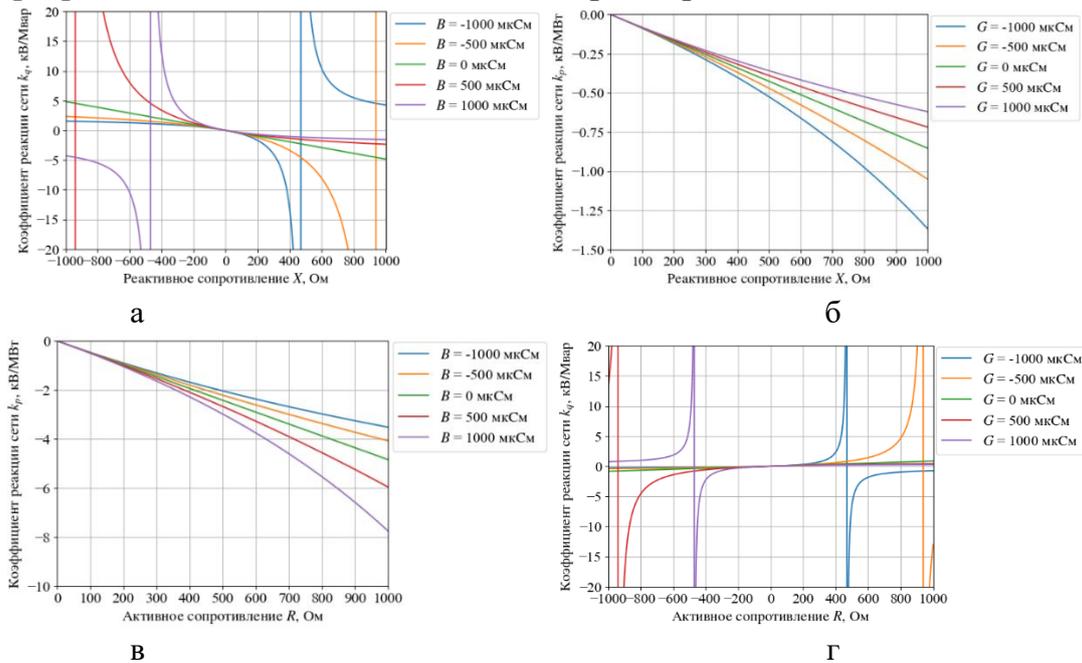


Рис. 4. Графики зависимостей: а)  $k_Q(X)$  при  $B = \text{var}$  и  $R, G = 0$ , б)  $k_P(X)$  при  $G = \text{var}$  и  $R, B = 0$ , в)  $k_P(R)$  при  $B = \text{var}$  и  $X, G = 0$ , г)  $k_Q(R)$  при  $G = \text{var}$  и  $X, B = 0$

Из анализа зависимости коэффициентов «реакции сети» от параметров сети следует:

1. При отсутствии реактивной проводимости ( $B=0$ ) значения коэффициентов реакции сети  $k_P$  и  $k_Q$  убывают с ростом величины реактивного сопротивления  $X$ .
2. При рассмотрении значений реактивного сопротивления  $X>0$  до точек разрыва функций  $k_P(X)$  и  $k_Q(X)$  при большем значении реактивной проводимости  $B$  наблюдаются меньшие значения  $k_P$  и  $k_Q$ .
3. Чем больше значение модуля реактивной проводимости  $|B|$ , тем ближе точки разрыва функций  $k_P(X)$  и  $k_Q(X)$  к оси ординат.
4. При изменении реактивного сопротивления  $X$ , коэффициент  $k_Q$  изменяется на величину большую, чем коэффициент  $k_P$ .
5. При любом значении активной проводимости  $G$  значения  $k_P$  и  $k_Q$  убывают с ростом увеличения реактивного сопротивления  $X$ .
6. С увеличением активного сопротивления  $R$  коэффициент  $k_P$  убывает. В то же время рост  $R$  приводит к увеличению коэффициента  $k_Q$ .
7. Основным способом снижения коэффициентов «реакции сети» является уменьшение полного сопротивления связи, осуществляющей питание узла нагрузки. При этом компенсация реактивной мощности не оказывает однозначного влияния на величину коэффициентов.

Для анализа влияния режимных параметров на величину  $k_P$  и  $k_Q$  рассмотрено два типа зависимостей:

1.  $k_P(U)$  и  $k_Q(U)$  при различных значениях модуля напряжения  $U_{вн}$  питающего узла и  $\delta_{вн} - \delta = 0$ ;
2.  $k_P(\delta_{вн} - \delta)$  и  $k_Q(\delta_{вн} - \delta)$  при различных значениях модуля напряжения  $U$  узла нагрузки и  $U_{вн} = 1$  о.е., приведённого к номинальному напряжению  $U_{НОМ}=220$ кВ.

Графики зависимостей  $k_P(U)$ ,  $k_Q(U)$ ,  $k_P(\delta_{вн} - \delta)$  и  $k_Q(\delta_{вн} - \delta)$  при различных значениях режимных параметров приведены на рисунках 5.

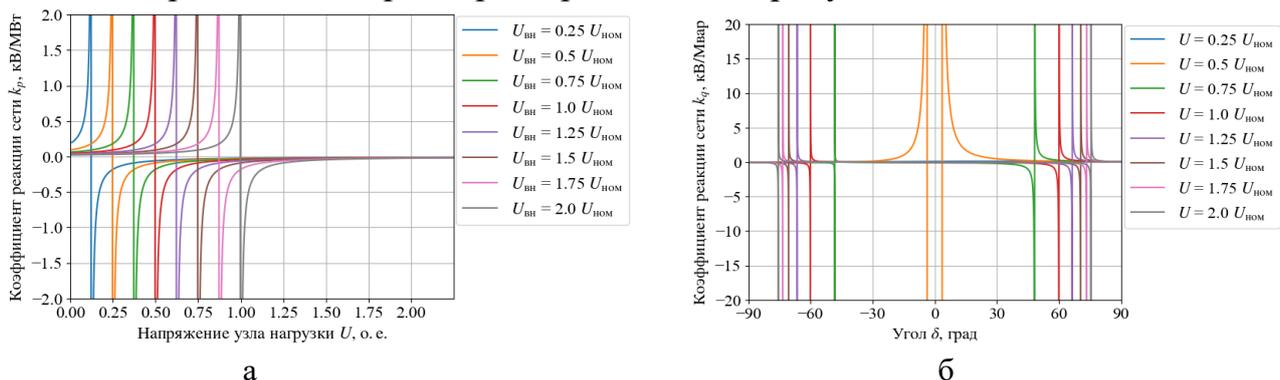


Рис. 5. Графики зависимостей: а)  $k_P(U)$  при  $U_{вн} = \text{var}$  и  $\delta_{вн} - \delta = 0$ ;  
б)  $k_Q(\delta_{вн} - \delta)$  при  $U = \text{var}$  и  $U_{вн} = 1$  о.е.

Из анализа зависимостей  $k_P(U)$  и  $k_Q(U)$  при различных значениях  $U$  и  $\delta_{вн} - \delta = 0$  установлено, что при некотором граничном значении напряжения узла нагрузки  $U_{гр}$  наблюдается точка разрыва функций  $k_P(U)$  и  $k_Q(U)$ . С увеличением рабочего напряжения в узле нагрузки  $k_P$  и  $k_Q$  уменьшаются по абсолютной величине, причём зависимости  $k_P$  и  $k_Q$  от модуля напряжения  $U$  питающего узла энергосистемы проявляется сильнее при малых значениях рабочего напряжения,

близких к  $U_{гр}$ . Увеличение  $U_{вн}$  при сохранении напряжения  $U$  в узле нагрузки приводит к увеличению по модулю  $k_P$  и  $k_Q$ .

Из анализа влияния режимных параметров следуют два способа уменьшения коэффициентов реакции сети:

1. Увеличение модуля напряжения в узле нагрузки;
2. Уменьшение модуля напряжения в питающем узле.

Анализ зависимостей  $k_P(\delta_{вн} - \delta)$  и  $k_Q(\delta_{вн} - \delta)$  при различных значениях модуля рабочего напряжения  $U$  узла нагрузки и  $U_{вн} = 1$  о.е. показал, что с увеличением модуля рабочего напряжения  $U$  узла нагрузки абсолютные значения коэффициентов  $k_P$  и  $k_Q$  уменьшаются, и при одних и тех же значениях  $\delta_{вн} - \delta$  модуль  $k_Q$  уменьшается гораздо сильнее, чем  $k_P$ . С ростом разности  $\delta_{вн} - \delta$  между точками разрыва  $k_P(\delta_{вн} - \delta)$  и  $k_Q(\delta_{вн} - \delta)$  модули коэффициентов  $k_P$  и  $k_Q$  уменьшаются. Таким образом, для уменьшения величин  $k_P$  и  $k_Q$  требуется уменьшать разность углов между питающим и нагрузочным узлами.

Математическая модель нагрузки, отражающая корреляционную зависимость между напряжением, активной и реактивной мощностями нагрузки и учитывающая влияние реакции сети, представляет собой систему уравнений, которая связывает точки на плоскостях  $(U, Q)$  и  $(U, P)$ , соответствующие нормальному распределению при отсутствии реакции сети, с точками, которые соответствуют параметрам режима при наличии реакции сети. Пояснение данной связи на примере системы случайных величин  $(U, P, Q)$ , спроецированной для наглядности на плоскость  $(U, Q)$ , с одномодальным распределением, приведено на рисунке 6.

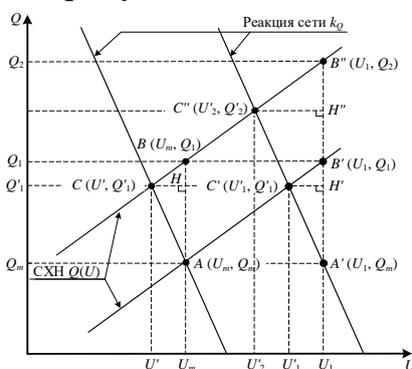


Рис. 6 – Пояснение к математической модели для системы  $(U, P, Q)$  в плоскости  $(U, Q)$

Для исключения влияния «реакции сети» для каждого выделенного кластера применяются алгебраические преобразования элементов ковариационной матрицы  $\mathbf{K}'$ . Полученные значения элементов ковариационной матрицы  $\mathbf{K}$  отражают естественные зависимости активной и реактивной мощностей нагрузки от напряжения в узле нагрузки в случае отсутствия «реакции сети».

Таким образом, алгоритм идентификации линейных моделей СХН  $EM$ -алгоритмом кластеризации с учётом влияния «реакции сети» по измерениям параметров режима  $(U, P, Q)$  в узле нагрузки следующий:

1. Определение числа кластеров с помощью модифицированного алгоритма Сьюгер-Джеймса;

2. Выделение кластеров (состояний нагрузки) *EM*-алгоритмом;
3. Вычисление коэффициентов  $k_P$  и  $k_Q$  «реакции сети» с использованием расчётной модели энергосистемы;
4. Преобразование параметров распределения выделенных кластеров для учёта «реакции сети»;
5. Отбор значимых кластеров по критериям (2);
6. Вычисление итоговых коэффициентов линейной модели СХН.

**В четвёртой главе** отмечена необходимость применения полиномиальных моделей СХН по напряжению (полиномов второго порядка), так как они обеспечивают корректные результаты расчёта установившихся режимов и позволяют учесть изменение знака регулирующего эффекта нагрузки.

Из-за отмеченных сложностей при идентификации полиномиальных моделей СХН по данным пассивного эксперимента предложен способ оптимизационного расчёта коэффициентов полиномиальных моделей СХН с ограничениями типа равенств. В качестве целевой функции используется дисперсия искомой полиномиальной модели от экспериментальных точек.

В качестве ограничений используются ограничения типа равенств:

1. Равенство производной полиномиальной СХН в точке математического ожидания значению регулирующего эффекта нагрузки  $k_S$ .
2. Равенство нулю производной полиномиальной СХН в точке с напряжением  $U_{кр}$ , при котором меняется знак регулирующего эффекта нагрузки.

С учётом представления значения напряжения  $U_{кр}$ , при котором происходит изменение знака регулирующего эффекта нагрузки, в виде доли  $u_{кр}$  от номинального напряжения  $U_{ном}$  узла нагрузки для коэффициентов  $Z_1$  и  $Z_2$  полиномиальных моделей СХН по напряжению получают выражения (5):

$$Z_1 = \frac{-u_{кр} \cdot k_S \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{(U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})}; Z_2 = \frac{k_S \cdot S_{БАЗ}^{(лин)}}{2 \cdot U_{ном} \cdot (U_m - u_{кр} \cdot U_{ном})}. \quad (5)$$

Итоговое ограничение  $g(u_{кр}, Z_0)$  отражает соответствие мощности нагрузки, рассчитанной по искомой полиномиальной СХН при математическом ожидании напряжения  $U_m$ , значению математического ожидания мощности нагрузки  $S_m$ . График функции  $\sigma(u_{кр}, Z_0)$  приведён на рисунке 7.

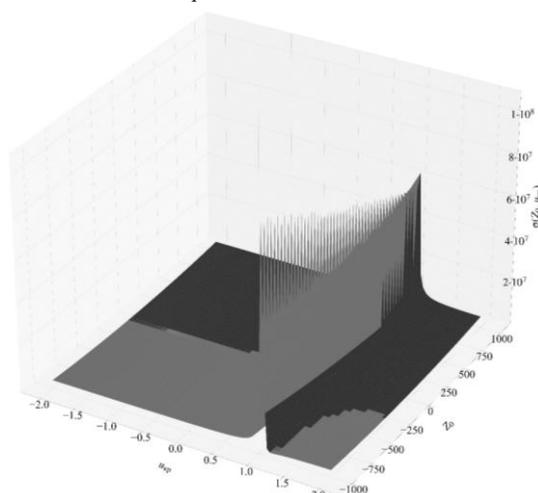


Рис. 7. График функции  $\sigma(u_{кр}, Z_0)$

Для заданной целевой функции существует минимальное значение при некоторых  $u_{кр}$  и  $Z_0$ , что позволяет выполнить оптимизационный расчёт с целью поиска её минимума. Для выполнения оптимизационного расчёта  $u_{кр}$  и  $Z_0$  с учётом ограничения  $g(u_{кр}, Z_0)$  использован метод множителей Лагранжа. Непосредственный расчёт независимых переменных в методе Лагранжа выполнен итерационным методом Ньютона.

В качестве начальных приближений для метода Ньютона выбирается такой вектор-столбец начальных приближений, при которых функция Лагранжа не обращается в бесконечность, и соблюдается ограничение  $g(u_{кр}, Z_0)$ .

Так как метод Ньютона чувствителен к начальному приближению, то для гарантированного нахождения вектор-столбца значений переменных, обеспечивающих минимальное значение целевой функции, применяется метод детерминированной сетки. После выполнения итерационного расчёта найденное значение  $u_{кр}$  используется для вычисления коэффициентов  $Z_1$  и  $Z_2$  по соотношениям (5).

**В пятой главе** рассмотрено применение методики идентификации моделей СХН напряжению для нагрузочных узлов с преимущественно тяговой нагрузкой: ПС 110 кВ Мариинск и Каштан тяговая; с промышленной нагрузкой: ПС 110 кВ Новая Еруда и ПС 220 кВ Опорная-9.

После предварительной обработки исходных измерений произведён расчёт числа кластеров в массивах с помощью алгоритма Сьюгер-Джеймса при различных значениях степени трансформации  $\lambda$  и модификации алгоритма, разработанной в рамках диссертации (алгоритм второй производной).

Результаты определения числа кластеров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Число кластеров в массивах измерений

Присоединение	Число кластеров $n$ по алгоритму второй производной $\lambda''$	Число кластеров $n$ по алгоритму Сьюгер-Джеймса при $\lambda=1/n$	Число кластеров $n$ по алгоритму Сьюгер-Джеймса при $\lambda=3/2$
ПС 110 кВ Мариинск	3	6	3
ПС 110 кВ Новая Еруда	8	6	9
ПС 110 кВ Каштан тяговая	11	6	11
ПС 220 кВ Опорная-9	2	7	2

Число кластеров  $n$ , полученное по алгоритму второй производной, используется в качестве гиперпараметра для  $EM$ -алгоритма.

Для учёта влияния «реакции сети» предварительно определены коэффициенты «реакции сети»  $k_P$  и  $k_Q$  с помощью расчёта приращений напряжений при приращениях активной и реактивной мощностей путём моделирования серии установившихся режимов в программном комплексе *RastrWin3*. Результаты вычисления коэффициентов линейных моделей СХН на основе параметров распределения отобранных кластеров и после процедуры отбора наиболее значимых из них, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты вычисления коэффициентов линейных моделей СХН

Присоединение	$A_1$ , МВт/кВ	$B_1$ , Мвар/кВ	$P_{баз}$ , МВт	$Q_{баз}$ , Мвар	$a_1$ , о.е.	$b_1$ , о.е.
ПС 110 кВ Мариинск	-0,047	-0,154	41,5	21,7	2,365	1,653
ПС 110 кВ Новая Еруда	-0,033	-0,120	24,8	7,2	-0,256	-0,097
ПС 110 кВ Каштан тяговая	-0,048	-0,146	92,4	23,1	-0,968	8,848
ПС 220 кВ Опорная-9	-0,025	-0,125	62,1	49,6	0,673	1,741

В таблице 3 приведены коэффициенты полиномиальных моделей СХН по напряжению и скорректированные значения базисных активной  $P_{\text{баз}}$  и реактивной  $Q_{\text{баз}}$  мощностей, полученные с применением оптимизационного расчёта, описанного в главе 4.

Таблица 3 – Результаты для полиномиальных моделей СХН

Присоединение	$a_2$ , о.е.	$a_1$ , о.е.	$P_{\text{баз}}$ , МВт	$b_2$ , о.е.	$b_1$ , о.е.	$Q_{\text{баз}}$ , Мвар
ПС 110 кВ Мариинск	0,642	1,019	41,6	3,269	-5,168	21,7
ПС 110 кВ Новая Еруда	-0,597	0,915	24,7	-0,447	0,780	7,2
ПС 110 кВ Каштан тяговая	-3,987	7,372	92,3	8,573	-9,306	23,7
ПС 220 кВ Опорная-9	-28,079	56,882	62,4	-8,105	18,627	50,2

Для проверки корректности полученных коэффициентов, предложена оценка квадратичных отклонений кривой (дисперсии), построенной по точкам, соответствующим параметрам режима в узле нагрузки при последовательном увеличении  $P_n$  и  $Q_n$  с сохранением  $\text{tg}\varphi$ . Из результатов расчёта дисперсий массивов измерений от расчётных кривых следует:

1. Для присоединений ПС 110 кВ Мариинск и Новая Еруда СХН, полученные по методике, точнее отражают поведение нагрузки, чем типовые;
2. Для присоединения ПС 220 кВ Опорная-9 полученная и типовая СХН показывают одинаковые дисперсии, что позволяет использовать для моделирования нагрузки типовые СХН;
3. Для присоединения ПС 110 кВ Каштан тяговая дисперсия полученной СХН выше, чем у типовой СХН. Результат связан со значительным смещением значения напряжения, при котором происходит смена знака регулирующего эффекта нагрузки в интервал изменения напряжения в пассивном эксперименте ( $u_{\text{кр}}=0,94$  о.е.) и высоким значением регулирующего эффекта нагрузки по реактивной мощности ( $b_{1(\text{лин})}=8,848$  о.е.), что характерно для узлов с значительным преобладанием нагрузки резко-переменного характера, когда изменение реактивной мощности нагрузки не связано с изменением напряжения.

На рисунке 8 приведены графики линейных и полиномиальных СХН, совмещённые с типовыми СХН и измерениями параметров режима для ПС 110 кВ Мариинск.

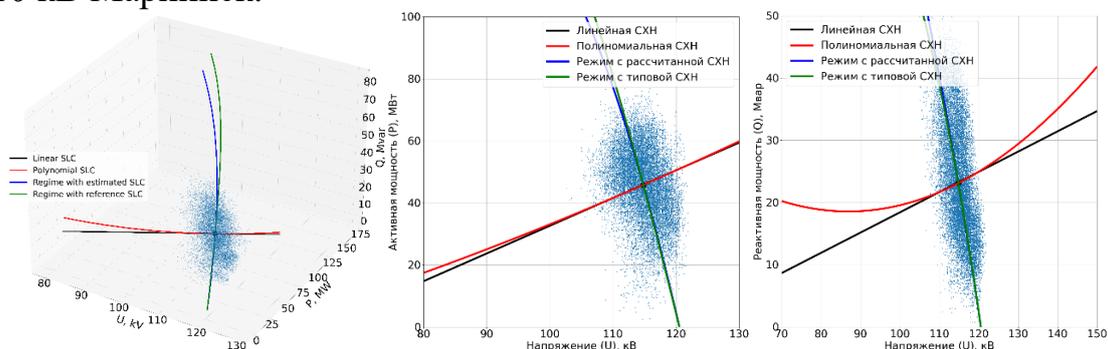


Рис. 8. Линейная и полиномиальная СХН с расчётными кривыми для ПС 110 кВ Мариинск

Для оценки влияния корректировки коэффициентов СХН в расчётной модели относительно установленных в ней типовых значений, выполнены расчёты предельных по статической аperiodической устойчивости перетоков активной мощности в КС в районе размещения вышеперечисленных узлов нагрузки при различных уровнях потребления активной мощности.

При выполнении процедуры утяжеления траектория утяжеления формируется автоматически на основе анализа матрицы Якоби и отбора влияющих на переток активной мощности генерирующих узлов. Графика энергорайона из расчётной модели приведена на рисунке 9.

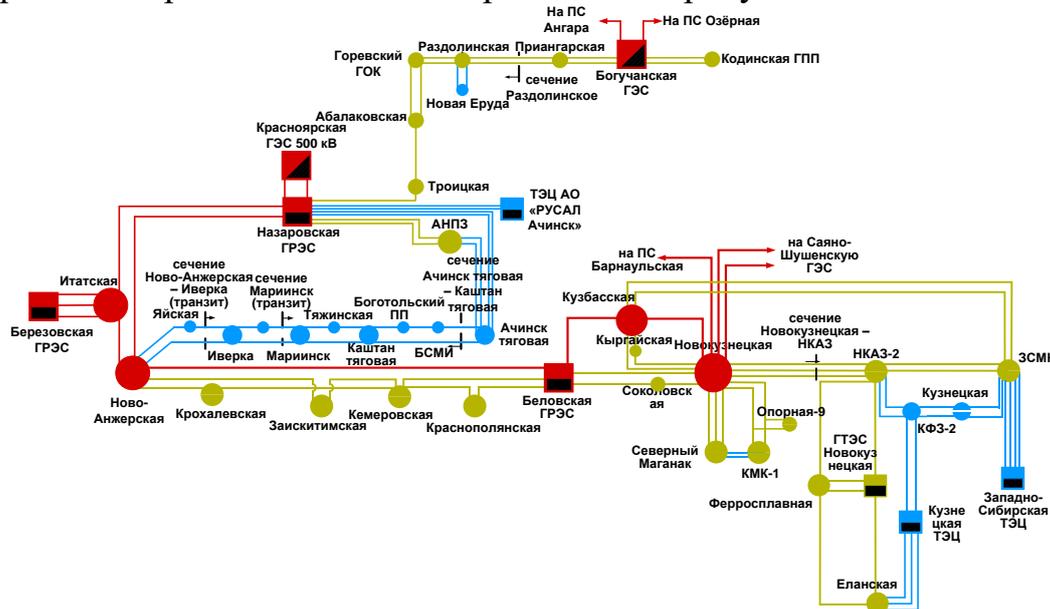


Рис. 9. Графика энергорайона

Значения предельных перетоков приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчётов предельных перетоков с типовыми и скорректированными коэффициентами СХН

№	Наименование присоединения	Наименование КС	$P_{\text{пред}}$ при расчётных СХН, МВт	$P_{\text{пред}}$ при типовых СХН, МВт	Отклонение, Δ	
					МВт	%
1.	ПС 110 кВ Маринск	Маринск (транзит)	121,236	101,723	-19,513	-16,095
		Ново-Анжерская – Иверка (транзит)	156,991	147,35	-9,641	-6,141
2.	ПС 110 кВ Каштан тяговая	Ачинск тяговая – Каштан тяговая	270,016	282,94	12,924	4,786
3.	ПС 220 кВ Опорная-9	Новокузнецкая – НКАЗ	1037,035	1161,484	124,449	12,000
4.	ПС 110 кВ Новая Еруда	Раздолинское	417,233	380,99	-36,243	-8,687

По результатам видно, что предельные перетоки активной мощности в КС могут значительно изменяться при изменении коэффициентов СХН в узлах нагрузки, близких к КС. Максимальное относительное отклонение предельного по статической апериодической устойчивости перетока составляет 16,095%, абсолютное максимальное отклонение мощности достигает 124,449 МВт, что существенно влияет как на работу автоматических ограничителей перетока активной мощности в КС, так и на планирование режимов.

В шестой главе выполнена программная реализация методик и алгоритмов, описанных в главах 2–4. Основным языком программирования выбран C# как обеспечивающий высокое быстродействие при проведении расчётов, в качестве языка программирования для прототипирования алгоритмов определения числа кластеров, кластеризации EM-алгоритмом и для учёта «реакции сети» выбран интерпретируемый язык программирования Python, позволяющий получать результаты и строить графики без компиляции.

Программа состоит из пяти модулей, имеющих связи между собой и с внешними системами: графический модуль, реализующий графический интерфейс программы; модуль импорта данных, реализующий загрузку данных в формате \*.csv (разделитель – точка с запятой); модуль привязки расчётной модели энергосистемы для расчёта коэффициентов  $k_P$  и  $k_Q$ ; расчётный модуль, реализующий функции обработки данных по алгоритмам, описанных в главах 2–4; модуль сохранения загруженных данных, результатов расчёта коэффициентов СХН по напряжению, построенных графиков. Алгоритм вторых производных степени трансформации для определения числа кластеров реализован в виде скрипта, написанного на языке программирования *Python*.

При тестировании установлено, что разработанная программа выполняет свои функции.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В диссертационной работе изложены научно-технические решения, направленные на повышение точности моделей СХН по напряжению, получаемых по измерениям режимных параметров в пассивном эксперименте. Решения направлены на выделение состояний нагрузки, наблюдаемых в измерениях; преобразование параметров распределения выделенных состояний для учёта влияния «реакции сети» и отбор значимых состояний нагрузки; определение линейных моделей СХН по напряжению; оптимизационный расчёт коэффициентов полиномиальных моделей СХН.

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Модифицирован алгоритм Сьюгер-Джеймса для определения числа кластеров, и подтверждена корректность его работы, как на тестовых, так и на экспериментальных измерениях. Модификация обладает преимуществами существующего алгоритма (возможность установления структуры разделяемых данных), при этом, корректно определяет число состояний нагрузки в измерениях режимных параметров даже при высокой плотности измерений и наличии визуально различимых подмножеств;
2. Выполнен анализ зависимостей степени влияния «реакции сети», выраженной в виде коэффициентов по активной  $k_P$  и реактивной  $k_Q$  мощностям, от сетевых и режимных параметров. Анализ показал, что влияние «реакции сети» увеличивается с ростом активного  $R$  и реактивного  $X$  сопротивлений связи между узлом нагрузки и узлами, от которых выполняется его электроснабжение, а также при увеличении разности углов по связям и уменьшении напряжения в узле нагрузки, и увеличении напряжения узлов питания. По результатам анализа в диссертации представлены мероприятия, позволяющие снизить степень влияния «реакции сети» на измерения пассивного эксперимента: установка шунтирующих реакторов в питающем узле и батарей статических конденсаторов в узле нагрузки, подключение собственной генерации в узле нагрузки, увеличение числа связей, по которым выполняется электроснабжение узла нагрузки;
3. Применена трёхмерная кластеризация измерений в координатах напряжения  $U$ , активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей для выделения состояний

нагрузки, что позволило перейти от задачи регрессии исходных данных с плохо обусловленной системой уравнений, решаемой по методу наименьших квадратов, к задаче регрессии по каждому выделенному кластеру со сниженным значением дисперсии по  $P$  и  $Q$ ;

4. Формализованы критерии отбора значимых кластеров для идентификации итоговых линейных моделей СХН по напряжению. В качестве критериев отбора использованы веса кластеров  $w$  и значения определителей ковариационных матриц  $|K|$ . В результате отбора решены задачи фильтрации измерений и учёта только тех состояний нагрузки, которые характеризуются ярко выраженной зависимостью мощности нагрузки от напряжения;

5. Разработана методика получения полиномиальных моделей СХН по измерениям режимных параметров в пассивном эксперименте, учитывающая влияние «реакции сети». Методика основана на оптимизации с ограничениями типа равенств методом множителей Лагранжа  $\lambda$  и позволяет получить коэффициенты полиномиальных моделей СХН по напряжению для активной и реактивной мощностей, а также значение напряжения в узле нагрузки, при котором происходит изменение знака регулирующего эффекта нагрузки;

6. Выполнена программная реализация разработанной методики для идентификации СХН в режиме реального времени с возможностью получения как линейных, так и полиномиальных моделей СХН с визуализацией результатов;

7. Оценено влияние использования коэффициентов полиномиальных моделей СХН на величины предельных по статической апериодической устойчивости перетоков активной мощности в КС, расположенных в районах размещения исследуемых узлов нагрузки. Установлено, что относительная величина отклонений предельных перетоков может составить порядка 18%, а абсолютные значения отклонения мощности – 125 МВт, что окажет влияние на планирование электрических режимов, на работу автоматических регуляторов и ограничителей перетоков мощности.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** Идентификация полиномиальных моделей статических характеристик нагрузки по напряжению по результатам пассивного эксперимента // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2024 – № 1(100). – С. 9–19. doi: 10.1234/2307-907X.2024.1.1.

2. Бацева Н.Л., Панкратов А.В., **Жуйков А.К.** Программное обеспечение для определения модели нагрузки по массивам измерений пассивного эксперимента // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022 – Т. 11 – № 3(59). – С. 51-56. doi: 10.46548/21vek-2022-1159-0008.

3. Панкратов А.В., Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.**, Шувалова А.А., Кондрашов М.А. Методика обработки телеизмерений оперативно-информационного комплекса при определении статических характеристик нагрузки методом активного эксперимента // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника,

информационные технологии, системы управления. – 2021 – №. 39. – С. 5-33. doi: 10.15593/2224-9397/2021.3.01.

4. Панкратов А.В., **Жуйков А.К.**, Шувалова А.А., Полищук В.И. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 2(51). – С. 4-11. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11.

#### **Публикации в изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science:**

1. Batseva N.L., **Zhuikov A.K.** Modification of the Sugar-James Algorithm for Clustering Measurements of Mode Parameters [Electronic resorces] // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon): proceedings, Магнитогорск, September 27-29, 2024. – [S.l]: IEEE, 2024 – p. 187-191. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10718908>.

2. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** О влиянии внешней электрической сети на параметры режима узла нагрузки = External electric grid impact on mode parameters at a load node // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2024 – Т. 335 – № 11. – С. 157-169. doi: 10.18799/24131830/2024/11/4817.

3. Pankratov A.V., **Zhuikov A.K.**, Polishchuk V.I., Postoyankova K. Yu. Load Model Identification using Steady-state Measurements for Power System Control // Journal of Physics: Conference Series – 2021 – P. 012076. doi: 10.1088/17426596/1901/1/012076.

4. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** Метод автоматического утяжеления режима для исследования влияния коррекции статических характеристик нагрузки по напряжению на величины перетоков активной мощности = Automatic loading method for the study of a correction effect of static voltage load characteristics on limited active power flows // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2025 – Т. 336 – № 6. – С. 185-193. doi: 10.18799/24131830/2025/6/4336.

#### **Публикации в сборниках статей и трудах конференций:**

1. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.**, Мизев А. В. Проблемы прогнозирования объёмов электропотребления для тяговых подстанций // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сборник статей по материалам CVIII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 6 января 2025. – Новосибирск: СибАК, 2025 – С. 66-75.

2. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.**, Мизев А. В. Группирование тяговых подстанций как этап подготовки исходных данных для апробации методов прогнозирования электропотребления // Наука России: сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 27 января 2025. – Пенза: Наука и просвещение, 2025 – С. 64-73.

3. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** Определение полиномиальных статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом реакции сети // Электроэнергетика глазами молодежи-2023: материалы XIII Международной

научно-технической конференции, Красноярск, 23-27 Октября 2023. – Красноярск: СФУ, 2023 – Т. 1 – С. 47-50.

4. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** Метод обработки измерений в задаче идентификации полиномиальных статических характеристик нагрузки по напряжению // XXVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2023): сборник докладов, Санкт-Петербург, 24-26 Мая 2023. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2023 – С. 20-24.

5. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.**, Мизев А.В. Использование инструментальных измерений и измерений из автоматизированной системы учета электрической энергии для определения статических характеристик по напряжению тяговой нагрузки // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XII Международной научно-технической конференции. В 2 ч., Нижний Новгород, 16-19 Мая 2022. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022 – Т. 1 – С. 66-69.

6. Бацева Н.Л., **Жуйков А.К.** Определение количества кластеров на основе максимизации скачков трансформированной внутрикластерной дисперсии в алгоритме Сьюгер-Джеймса [Электронный ресурс] // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: материалы VII Всероссийской конференции с международным участием, Тольятти, 16-18 Апреля 2024. – Тольятти: ТГУ, 2024 – С. 80-90. – Режим доступа: <https://drive.google.com/file/d/1AvQrzNHODkqBTGz9GrvzwjaDM0WoTSaX/view>.

**Патенты РФ на изобретение, полезную модель, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024688168. Определение параметров шунта короткого замыкания / Н.Л. Бацева, **А.К. Жуйков.** – Заявка № 2024686742. Дата поступления 26 ноября 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 ноября 2024 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024686943. Автоматическое утяжеление электрического режима в расчётных моделях энергосистем / Н.Л. Бацева, **А.К. Жуйков.** – Заявка №2024686742. Дата поступления 13 ноября 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2024 г.

3. Патент РФ 2809920 МПК G01R 21/133. Способ определения статических характеристик нагрузки по напряжению по измерениям пассивного эксперимента // **А.К. Жуйков**, Н.Л. Бацева, А.В. Панкратов. – №2023103094, заявлено 13.02.2023; Оpubл. 19.12.2023. Бюлл. № 35.

4. Патент РФ 218397 МПК G01R 21/133. Устройство для определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учётом влияния внешней электрической сети // **А.К. Жуйков**, Н.Л. Бацева, А.В. Панкратов. – №2023103091, заявлено 13.02.2023; Оpubл. 24.05.2023. Бюлл. № 15.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022619028. Идентификация статических характеристик нагрузки по напряжению / Н.Л. Бацева, **А.К. Жуйков**, А.В. Панкратов. – Заявка №2024686742. Дата поступления 04 мая 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2022 г.