

ОШ МАМЛЕКЕТТИК УНИВЕРСИТЕТИНИН ЖАРЧЫСЫ

ВЕСТНИК ОШСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

BULLETIN OF OSH STATE UNIVERSITY

ISSN: 1694-7452 e-ISSN: 1694-8610

№3/2025, 207-226

ТЕХНИКА

УДК: 620.9: 681.5

DOI: [10.52754/16948610_2025_3_0_16](https://doi.org/10.52754/16948610_2025_3_0_16)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ АСКУЭ

ЭЭКЭАС ШАРТЫНДА БӨЛҮШТҮРҮҮЧҮ ТАРМАКТАРДАГЫ ЭНЕРГИЯ КЕРЕКТӨӨ
ПРОЦЕССТЕРИНИН ИМИТАЦИЯЛЫК МОДЕЛИ

SIMULATION MODEL OF ENERGY CONSUMPTION IN DISTRIBUTION NETWORKS
UNDER AMRCS CONDITIONS

Закиряев Кубанычбек Эсейович

Закиряев Кубанычбек Эсейович

Zakiryaev Kubanychbek Eseyovich

старший преподаватель, Иссык-Кульский государственный университет им. К.Тыныстанова

улуук окутуучу, К.Тыныстанов атындағы Ысык-Көл мамлекеттік университеті

Senior Lecturer, Issyk-Kul State University named after K. Tynystanov

kubz1@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8762-1285

Жолдошов Толкунбек Мамытович

Жолдошов Толкунбек Мамытович

Zholdoshov Tolkunbek Matyтович

к.т.н., доцент, Ошский государственный университет

тех.и.к., доцент, Ош мамлекеттік университеті

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Osh State University

tjoldoshov@oshsu.kg

ORCID: 0009-0002-1241-3665

Иманакунова Женишкуль Сартбаевна

Иманакунова Женишкуль Сартбаевна

Imanakunova Zhenishkul Sartbaevna

к.т.н., доцент, Кыргызский государственный технический университет им. И. Рazzакова

тех.и.к., доцент, И. Рazzаков атындағы Кыргыз мамлекеттік техникалық университеті

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov

j.imanakunova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4118-6457

Осмонова Римма Чынарбековна

Осмонова Римма Чынарбековна

Osmonova Rimma Chinarbekovna

к.т.н., доцент, Кыргызский государственный технический университет им. И. Рazzакова

тех.и.к., доцент, И. Рazzаков атындағы Кыргыз мамлекеттік техникалық университеті

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov

r.osmonova@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7305-1146

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ АСКУЭ

Аннотация

В задачах информатизации процессов контроля и учета электроэнергии в распределительных электрических сетях (РЭС) активно внедряются программно-аппаратные комплексы АСКУЭ. В целях совершенствования этих автоматизированных систем в настоящее время наиболее актуальным является решение таких функциональных задач как оптимизация режимов работы РЭС, оперативный мониторинг технических и коммерческих потерь электроэнергии, а также диагностика состояний сети, включая локализацию координат несанкционированных отборов электроэнергии (НОЭ). В Национальной академии наук КР и в ряде зарубежных научных центрах разработаны научные основы и технологии решения указанных выше задач в режиме реального времени. При этом возникает необходимость проверки эффективности и точности этих новых результатов. Для этой цели целесообразным является разработка имитационной модели автоматизированной распределительной сети. В данной статье рассматриваются вопросы связанные с построением такой имитационной модели с использованием программной системы MatLab. Ее основу составляет имитационная модель электронного счетчика электроэнергии. Его входные и выходные переменные и параметры задаются случайным образом с применением датчика случайных чисел. С использованием разработанной имитационной модели выполнены расчеты по определению эффективности методов оптимизации режима работы РЭС и идентификации недоступных для измерения переменных состояния трехфазной сети.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, модель счетчика электроэнергии, имитационная модель сети, исследования эффективности методов расчета

**ЭЭКЭАС ШАРТЫНДА БӨЛҮШТҮРҮҮЧҮ
ТАРМАКТАРДАГЫ ЭНЕРГИЯ КЕРЕКТӨӨ
ПРОЦЕССТЕРИНИН ИМИТАЦИЯЛЫК
МОДЕЛИ**

**SIMULATION MODEL OF ENERGY
CONSUMPTION IN DISTRIBUTION NETWORKS
UNDER AMRCS CONDITIONS**

Аннотация

Таратылуучу электр тармактарында электр энергиясын көзөмөлдөө жана эсепке алуу процесстерин маалыматташтыруу милдеттеринде автоматташтырылган системалар — ЭЭКЭАС программалык-аппараттык комплекстери активдүү киргизилүүдө. Бул автоматташтырылган системаларды өркүндөтүү максатында учурда эң актуалдуу болгон функционалдык милдеттердин катарына төмөнкүлөр кирет: таратылуучу электр тармактарынын (ТЭТ) иштөө режимдерин оптималдаштыруу, электр энергиясынын техникалык жана коммерциялык жоготууларын ыкчам мониторинг кылуу, ошондой эле тармактын абалын диагностикалоо, анын ичинде электр энергиясын уруксатсыз пайдалануунун (ЭЭУП) координаттарын аныктоо. Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясында жана чет өлкөлүк бир катар илимий борборлордо жогоруда аталган милдеттерди реалдуу убакыт режиминде чечүүгө багытталган илимий негиздер жана технологиялар иштелип чыккан. Бул жаңы натыйжалардын тактыгын жана эффективдүүлүгүн текшерүү зарылдыгы келип чыгууда. Бул максатта автоматташтырылган таратылуучу тармактын имитациялык моделин иштеп чыгуу максатка ылайык болуп саналат. Бул макалада MatLab программалык чөйрөсүн колдонуу менен мындаи имитациялык модель түзүү

Abstract

In the context of informatization of control and metering processes in distribution electrical networks (DEN), automated metering and control systems (AMRCS) are being actively implemented as integrated hardware and software solutions. To improve these automated systems, the most relevant functional tasks today include: optimization of DEN operating modes, real-time monitoring of technical and commercial electricity losses, and diagnostics of the network condition, including localization of unauthorized electricity consumption (UEC). The National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic and several international research centers have developed scientific foundations and real-time technologies for solving the above-mentioned tasks. However, there is a growing need to evaluate the effectiveness and accuracy of these new solutions. For this purpose, the development of a simulation model of an automated distribution network is considered a reasonable and effective approach. This article discusses the construction of such a simulation model using the MatLab software environment. The core of the model is a simulation of an electronic electricity meter, whose input and output variables and parameters are randomly generated using a random number generator. Based on this simulation model, calculations were performed to evaluate the efficiency of methods for optimizing the operating modes of distribution networks and identifying state

маселелери каралат. Моделдин негизин электр энергиясынын электрондук эсептегичинин имитациялык модели түзөт. Анын кириүүчү жана чыгуу параметрлери менен өзгөрмөлөрү кокустук сандардын генератору аркылуу ыктымалдык негизде берилет. Иштелип чыккан имитациялык модель негизинде ТЭТ иштөө режимин оптималдаштыруу ыкмаларынын натыйжалуулугу жана үч фазалуу тармактагы түз өлчөө мүмкүн болбогон абалдык өзгөрмөлөрдү аныктоо маселелери боюнча эсептөөлөр жүргүзүлдү.

variables of a three-phase network that are not directly measurable.

Ачык сөздөр: таратылуучу электр тармагы; электр энергиясынын эсептегичинин модели; тармактын имитациялык модели; эсептөөлөр ыкмаларынын эффективдүүлүгүн изилдөө

Keywords: distribution electrical network; electricity meter model; network simulation model; evaluation of calculation method efficiency

Введение

В настоящее время в распределительных электрических сетях (РЭС) активно внедряются программно – аппаратные комплексы АСКУЭ (Sigma Telas, 2023; Концерн «Энергомера», 2024), которые создаются с применением технологии Smart Grid (El-Hawary, 2014, pp239–250; Kazmi, Shahzad, 2017). Они относятся к классу информационно-измерительных систем, состав функций которых ориентирован для автоматизации коммерческого учета электроэнергии путем дистанционного сбора данных со счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети. В то же время в современных (традиционных) АСКУЭ не решаются ряд важных функциональных задач, применения которых дает возможность значительно повысить эффективность использование автоматизированных систем и экономические показатели распредкомпаний, а также улучшить качество электроэнергии. К таким задачам, в частности, относятся задачи оптимизации режимов работы РЭС путем симметрирования трехфазной сети (Киселев, Лепанов, 2018, С.63-70; Оморов, Такырбашев, Койбагаров, 2021, С. 192 – 199; Патент, Наумов, Иванов, Подъячих, 2013, Патент, Самокиш, 2013; Omorov, Takyrbashev, Osmonova, 2016, pp. 606-615), оперативного мониторинга потерь электроэнергии (Авербух, 2016, С. 54-56; Дед, Бирюков, Паршукова, 2014, С. 64-67; Оморов, Осмонова, и д.р., 2018, С. 56-60) и локализации мест несанкционированных отборов электроэнергии (НОЭ) (Стенников, Голуб, Болоев, с. 3; Оморов, Такырбашев, и д.р., 2019, С. 50-55; Kirankumar, Sri Madhu, 2018, Р. 834–838; Jeyaranjani, Devaraj, 2018 Р. 900–904). Как известно, решение этих функциональных задач напрямую связано с проблемой сокращения потерь электроэнергии в сетях, которые в настоящее время имеют достаточно высокий уровень. В связи с этим с целью минимизации технических и коммерческих потерь электроэнергии в РЭС в Национальной академии наук Кыргызской Республики проводятся теоретические и прикладные исследования, направленные на совершенствование традиционных АСКУЭ, которые в настоящее время активно внедряются в распределительных сетях. В результате этих исследований разработаны новые методы и цифровые технологии (Оморов, Такырбашев, Койбагаров, 2021, С. 192 – 199; Omorov, Takyrbashev, Osmonova, 2016, pp. 606-615, Оморов, Осмонова, и д.р., 2018, С. 56-60; Оморов, Такырбашев, и д.р., 2019, С. 50-55; Оморов, Осмонова, и д.р., 2021, -С. 168-177, Оморов, Такырбашев, Осмонова, 2017, с.17-23; Omorov, Takyrbashev, Zakiriaev, Koibagarov, 2021, Pp.38-46), ориентированные для использования в составе традиционных АСКУЭ. Следует отметить, что для исследования и проверки эффективности указанных технологий целесообразно иметь необходимый набор данных с реальных объектов, функционирующих в условиях работы АСКУЭ. Однако, получение таких данных с заданными характеристиками на практике представляет большие трудности в организационном и техническом планах. В связи с этим в целях исследования и отработки новых технических и программных решений в области автоматизации и цифровизации процессов в распределительных сетях разработана имитационная модель автоматизированной распределительной сети.

Постановка задачи. Рассматривается четырехпроводная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис.1, где k, v -индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С ($k = \overline{1,3}$) и электрических контуров сети ($v = \overline{1, n}$); \widetilde{E}_k – мгновенная э.д.с. источника питания для k -ой фазы; $\widetilde{I}'_{kv}, \widetilde{U}'_{kv}, \dot{\widetilde{Z}}_{kv}$ – мгновенный ток, напряжение и комплексное сопротивление нагрузки абонента с

координатой (k, v) соответственно; \tilde{I}_{kv} , \dot{z}_{kv} —ток и комплексное сопротивление v -го межабонентского участка k -ой фазы; \tilde{J}_v , \dot{z}_v —мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го участка нейтрального провода; \tilde{I}'_k , \tilde{U}'_k , \dot{Z}_k —мгновенные токи, напряжения и комплексные сопротивление на входах соответствующих фаз.

Будем считать, что в дискретный момент времени $t = t_0$ с помощью счетчиков электроэнергии АСКУЭ осуществляются синхронные измерения действующих значений токов I'_k , I'_{kv} и напряжений U'_k , U'_{kv} соответственно на входах фаз и на нагрузках сети, а также коэффициенты мощностей $c_k = \cos \varphi'_k$ и $c_{kv} = \cos \varphi'_{kv}$ между ними. Полученная информация записывается в базу данных АСКУЭ и на их основе формируются векторы токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \bar{I}'_k &= [I'_{k1}, I'_{k2}, \dots, I'_{kn}], & \bar{U}'_k &= [U'_{k1}, U'_{k2}, \dots, U'_{kn}], & k &= \overline{1,3} \\ C'_k &= [c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn}], \end{aligned}$$

$$I' = [I'_1, I'_2, I'_3], \quad U' = [U'_1, U'_2, U'_3], \quad C' = [c_1, c_2, c_3].$$

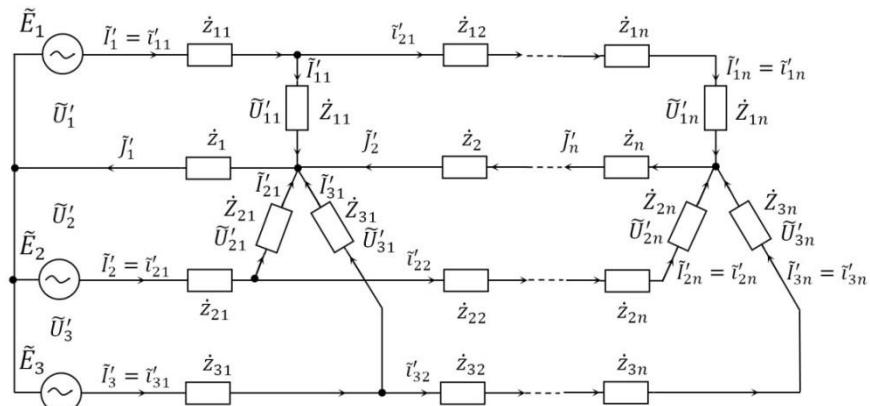


Рис.1. Расчетная схема трехфазной сети

Предполагается, что к нагрузкам абонентов подключены счетчики электроэнергии с (Cr_{kv}) , имеющие координаты (k, v) . Задача заключается в разработке имитационной модели автоматизированной распределительной сети, к фазам которой подключены абонентские счетчики электроэнергии.

Решение сформулированной задачи включает следующие основные этапы:

1. Описание синусоидальных токов и напряжений.
2. Построение имитационной модели счетчика электроэнергии.
3. Построение имитационной модели процессов в распределительной сети.
4. Моделирование динамических процессов с использованием имитационной модели.
5. Исследования эффективности метода идентификации переменных состояния сети недоступных для измерения.
6. Исследование метода эффективности оптимизации режима работы РЭС на основе симметрирования фазных нагрузок.

Описание синусоидальных токов и напряжений. Далее предполагается, что на вход счетчика электроэнергии (Cr_{kv}) , установленного у абонента сети с координатой (k, v) , поступает синусоидальные ток $\tilde{I}_{kv}(t)$ и напряжение $\tilde{U}_{kv}(t)$:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{kv}(t) &= I_{kv}^{\max} \sin(\omega t + \beta_k + \alpha_{kv}), \\ \tilde{U}_{kv}(t) &= U_{kv}^{\max} \sin(\omega t + \beta_k + \psi_{kv}),\end{aligned}\quad (1)$$

где I_{kv}^{\max} , U_{kv}^{\max} – максимальные значения тока и напряжения соответственно; ω – круговая частота; α_{kv} , ψ_{kv} – отклонения фазовых сдвигов от их базовых (номинальных) значений β_k , которые определяются по формулам

$$\beta_k = \frac{2(k-1)\pi}{3}, \quad k = \overline{1,3}.$$

Круговая частота ω зависит от периода T синусоидальных электрических величин $\tilde{I}_{kv}(t)$ и $\tilde{U}_{kv}(t)$:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

где f – частота тока и напряжения, т.е. $f = 50$ Гц.

Счетчик электроэнергии измеряются следующие величины:

- 1) действующие значения тока I_{kv} и напряжение U_{kv} в дискретный момент времени $t = t_m$, где $m = 0, 1, 2, \dots, M$;
- 2) активная P_{kv} и реактивная q_{kv} мощности;
- 3) коэффициенты мощности $C_{kv} = \cos \varphi_{kv}$, где φ_{kv} – разность сдвигов фаз напряжений и тока, т.е.

$$\varphi_{kv} = \psi_{kv} - \alpha_{kv}. \quad (2)$$

Таким образом, счетчик электроэнергии (C_{kv}) представляет собой электронное устройство, на вход которого поступают ток $\tilde{I}_{kv}(t)$ и напряжение $\tilde{U}_{kv}(t)$, а на его выходе формируются следующие величины (рис. 2): U_{kv} , I_{kv} , $\cos \varphi_{kv}$, P_{kv} , q_{kv} .

При этом между максимальными значениями напряжения U_{kv}^{\max} и I_{kv}^{\max} и их действующими значениями имеются следующие соотношения:

$$U_{kv} = \frac{U_{kv}^{\max}}{\sqrt{2}}, \quad I_{kv} = \frac{I_{kv}^{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

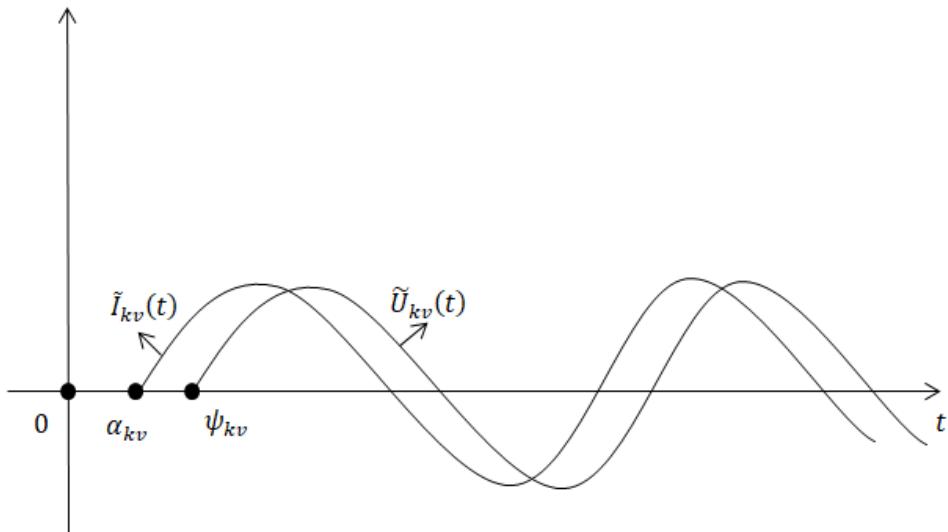


Рис. 2. Динамика тока и напряжения

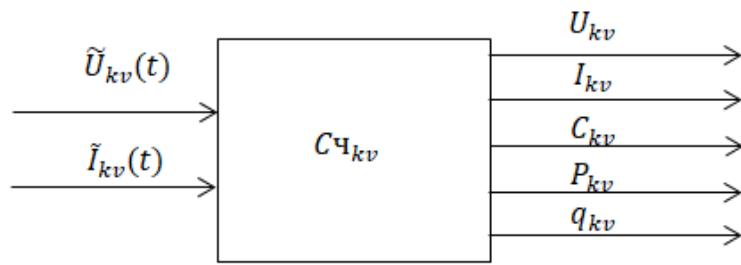


Рис. 3. Представление Сч_{kv} как вход – выход

Как известно (Киселев, Лепанов, 2018, С.63-70), активная и реактивная мощности определяются по формулам:

$$\begin{aligned} P_{kv} &= U_{kv} I_{kv} \cos \varphi_{kv}, \\ q_{kv} &= U_{kv} I_{kv} \sin \varphi_{kv}. \end{aligned} \quad (4)$$

При моделировании необходимо задавать ограничения на величины параметров токов и напряжений:

$$\begin{aligned} I_{kv}^{\min} &\leq I_{kv} \leq I_{kv}^{\max}, \\ U_{kv}^{\min} &\leq U_{kv} \leq U_{kv}^{\max}, \\ C_{kv}^{\min} &\leq C_{kv} \leq C_{kv}^{\max}. \end{aligned} \quad (5)$$

Построение модели счетчика электроэнергии.

Построение имитационной модели счетчика электроэнергии. Структура модели Сч_{kv} представлена на рис. 4.

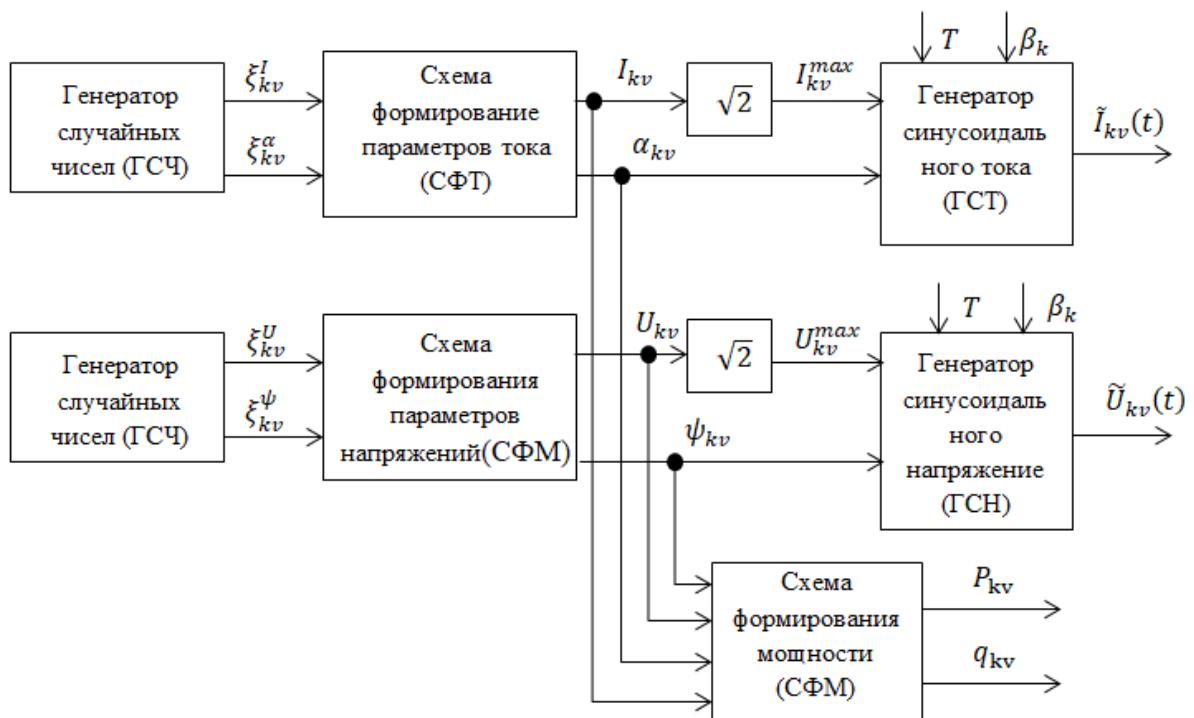


Рис. 4. Структура имитационной модели счетчика электроэнергии

Она включает следующие функциональные блоки (элементы):

ГСЧ – генератор случайных чисел в интервале $[0, 1]$;

СФТ – схему формирования параметров тока $\tilde{I}_{kv}(t)$;

СФН - схему формирования параметров напряжения $\tilde{U}_{kv}(t)$;

ГСТ – генератор синусоидального тока;

ГСН - генератор синусоидального напряжения;

СФМ – схему формирования активной и реактивной мощности.

Для формирования параметров тока и напряжения используется единый подход, который заключаются в следующем. Введем общую переменную x_{kv} , которую можно описать следующими условиями:

$$x_{kv} = \begin{cases} I_{kv}, & \text{если формируется параметр } I_{kv} \\ \varphi_{kv}, & \text{если формируется параметр } U_{kv} \\ \alpha_{kv}, & \text{если формируется параметр } \alpha_{kv} \\ \psi_{kv}, & \text{если формируется параметр } \psi_{kv} \end{cases}$$

Предположим, что заданы ограничения на x_{kv} , которые относительно параметров $\mathbf{Сч}_{kv}$ приведены в условиях (5):

$$x_{kv}^- \leq x_{kv} \leq x_{kv}^+.$$

Тогда схему формирования параметра x_{kv} может быть представлена структурой, которая показана на рис. 6.

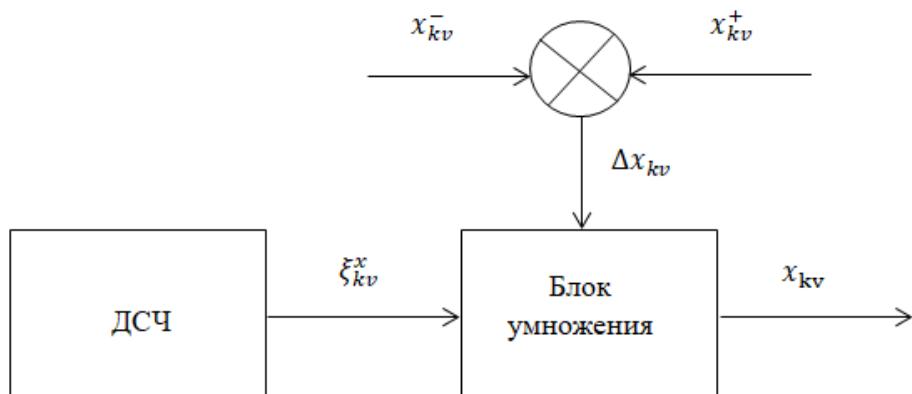


Рис. 6. Схема формирования параметра x_{kv} .

Здесь $x_{kv} = \Delta x_{kv} \xi_{kv}^x$, где $\Delta x_{kv} = x_{kv}^+ - x_{kv}^-$.

Использование такого подхода позволяет построить функциональные блоки СФТ и СФН, которые показаны на рис. 7 а и б, 8 а и б.

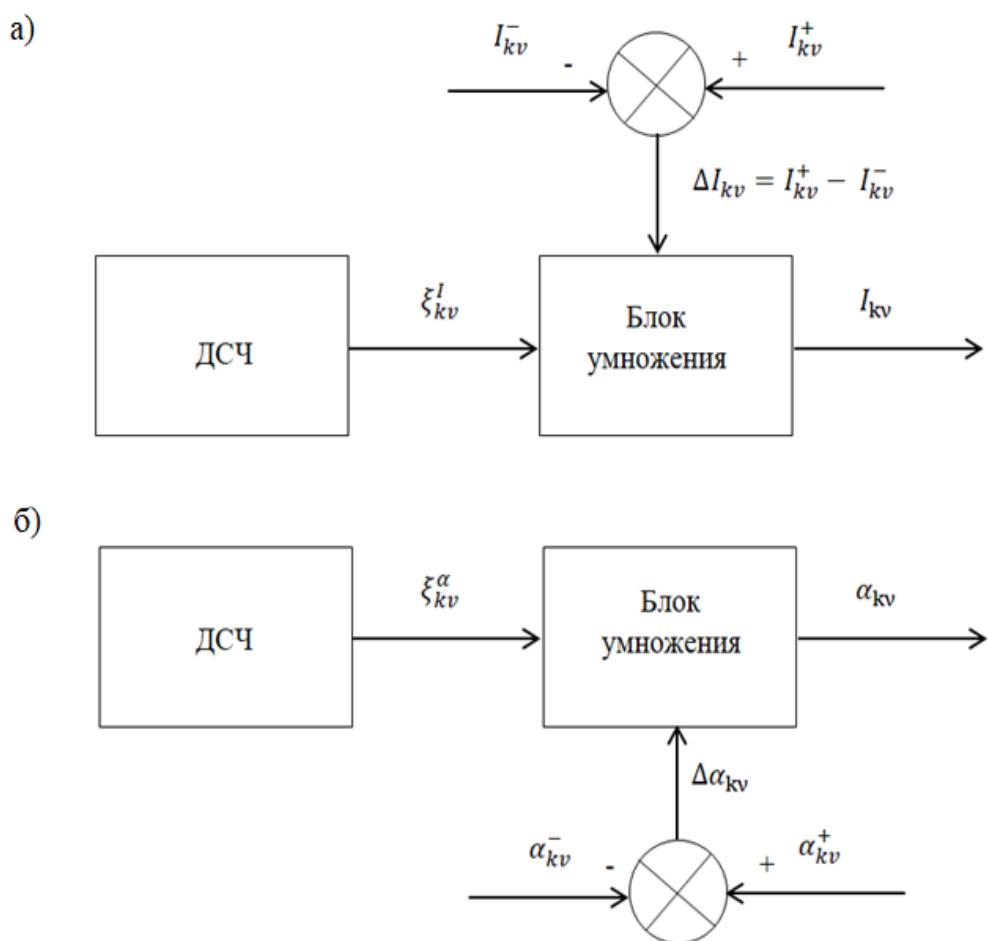


Рис. 7. Структуральная схема блока СФТ

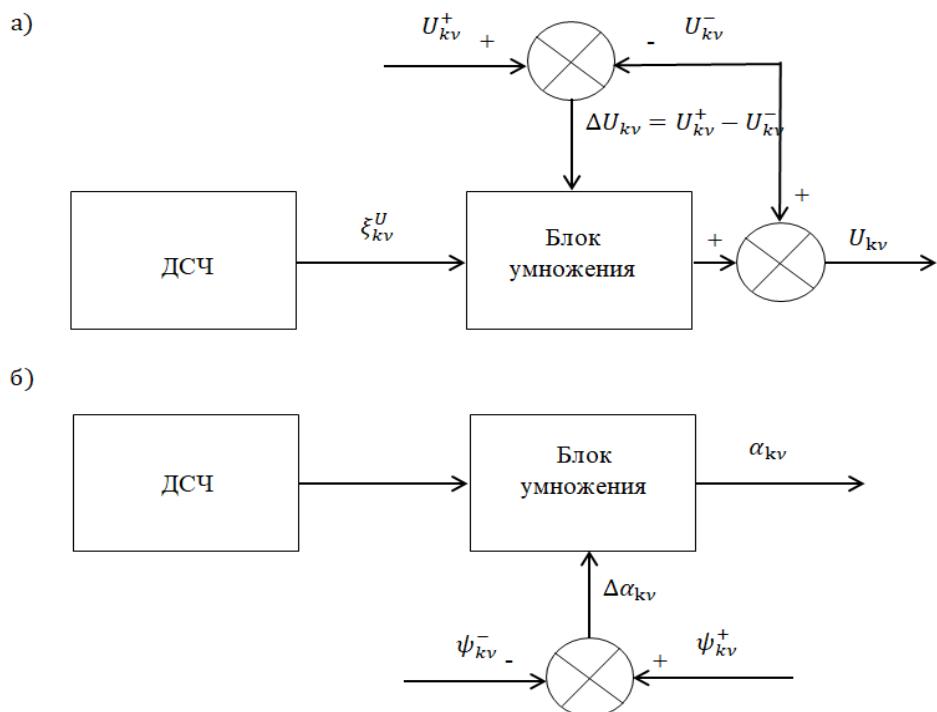


Рис. 8. Структуральная схема блока СФН

Выходные данные блоков СФТ и СФН используются для вычисления активной P_{kv} и реактивной q_{kv} мощности с помощью функционального элемента СФМ (рис.9).

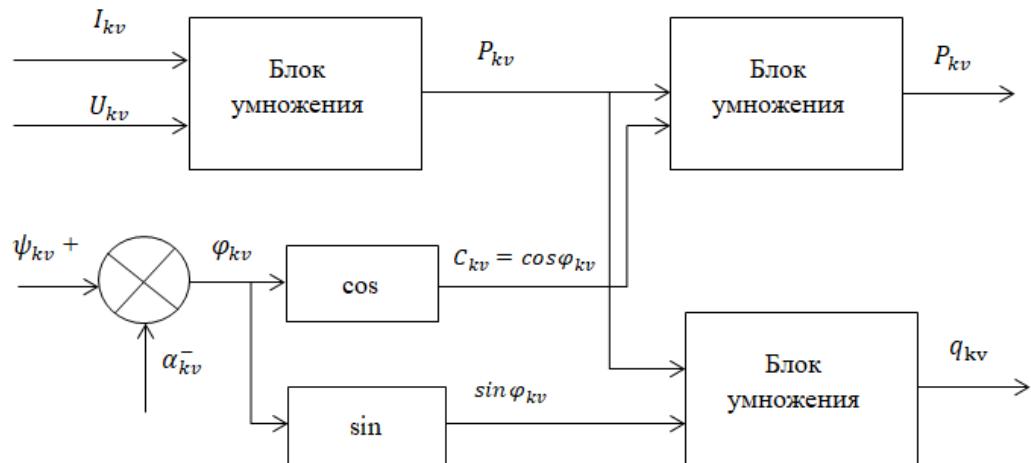


Рис. 9. Структура блока СФМ

При построении СФМ используются формулы (4).

Имитационная модель счетчика электроэнергии. За основу схемы для имитационной модели счетчика возьмем схему, указанной на рис.4., включающий все другие схемы по заданию ограничений соответствующим параметрам сеть на входе счетчика электроэнергии.

Итак, предположим, что эти ограничения параметров сети имеют следующие значения:

1. Для токов (I_{kv}):

- Минимальное значение (I_{kv}^-): 0 А.
- Максимальное значение (I_{kv}^+): 10 А.

2. Для напряжений (U_{kv}):

- Минимальное значение (U_{kv}^-): 200 В.
- Максимальное значение (U_{kv}^+): 240 В.

3. Для фазового угла тока (α_{kv}):

- Минимальный угол (α_{kv}^-): 0.
- Максимальный угол (α_{kv}^+): 0,3.

4. Для фазового угла напряжения (ψ_{kv}):

- Минимальный угол (ψ_{kv}^-): 0.
- Максимальный угол (ψ_{kv}^+): 0,3.

Эти ограничения обеспечивают реалистичность значений токов, напряжений и фазовых углов, моделируемых в системе. Они учитывают физические параметры сети и возможные отклонения. При этом в модели учитываются отклонения:

- Провалы и скачки напряжения: Ограничения напряжения моделируют стандартные провалы или превышения в пределах сети.
- Несимметрия фаз: Отклонения углов (α_{kv} и ψ_{kv}) учитывают фазовый дисбаланс.

- Изменение нагрузки: Диапазоны токов отражают различные сценарии нагрузки в сети.
- Реактивные нагрузки: Фазовый угол между током и напряжением ($\varphi_{kv} = \psi_{kv} - \alpha_{kv}$) позволяет учитывать влияние индуктивных и емкостных нагрузок.

Для выбранной схемы моделирования работы счетчика электроэнергии разработана следующая программа на MatLab, с учетом всех вышеуказанных параметров, ограничений и возможных отклонений в сети:

```
% Параметры модели
f = 50; % Частота сети, Гц
omega = 2 * pi * f; % Угловая частота
t = linspace(0, 0.04, 1000); % Временная шкала (1 период, 50 Гц)

% Ограничения
I_min = 0; I_max = 15; % Диапазон токов, А
U_min = 200; U_max = 240; % Диапазон напряжений, В
alpha_min = 0; alpha_max = 0.3; % Угол тока в радианах
psi_min = 0; psi_max = 0.3; % Угол напряжения в радианах

% Генерация случайных параметров
xi_I = rand; xi_U = rand; % Случайные числа для тока и напряжения
xi_alpha = rand; xi_psi = rand; % Случайные числа для фазовых углов

I_kv = I_min + (I_max - I_min) * xi_I; % Генерация тока
U_kv = U_min + (U_max - U_min) * xi_U; % Генерация напряжения
alpha_kv = alpha_min + (alpha_max - alpha_min) * xi_alpha; % Фазовый угол тока
psi_kv = psi_min + (psi_max - psi_min) * xi_psi; % Фазовый угол напряжения

% Генерация сигналов
I_signal = I_kv * sqrt(2) * sin(omega * t + alpha_kv); % Синусоидальный ток
U_signal = U_kv * sqrt(2) * sin(omega * t + psi_kv); % Синусоидальное напряжение

% Вычисление мощности
phi = psi_kv - alpha_kv; % Разность фаз
P = U_kv * I_kv * cos(phi); % Активная мощность
Q = U_kv * I_kv * sin(phi); % Реактивная мощность

% Визуализация
figure;

% Синусоидальный ток
subplot(3,1,1);
plot(t, I_signal, 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('Синусоидальный ток');
xlabel('Время (с)');
```

```

ylabel('Ток (A)');
grid on;

% Синусоидальное напряжение
subplot(3,1,2);
plot(t, U_signal, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Синусоидальное напряжение');
xlabel('Время (с)');
ylabel('Напряжение (В)');
grid on;

% Мощности
subplot(3,1,3);
bar([P, Q], 'FaceColor', 'flat');
set(gca, 'XTickLabel', {'Активная мощность', 'Реактивная мощность'});
title('Мощности');
ylabel('Вт');
grid on;

% Подписи для столбцов
text(1, P, sprintf('%.2f', P), 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', 'FontSize', 10);
text(2, Q, sprintf('%.2f', Q), 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', 'FontSize', 10);

```

На рис.10. показан результат работы имитационной модели счетика электроэнергии.

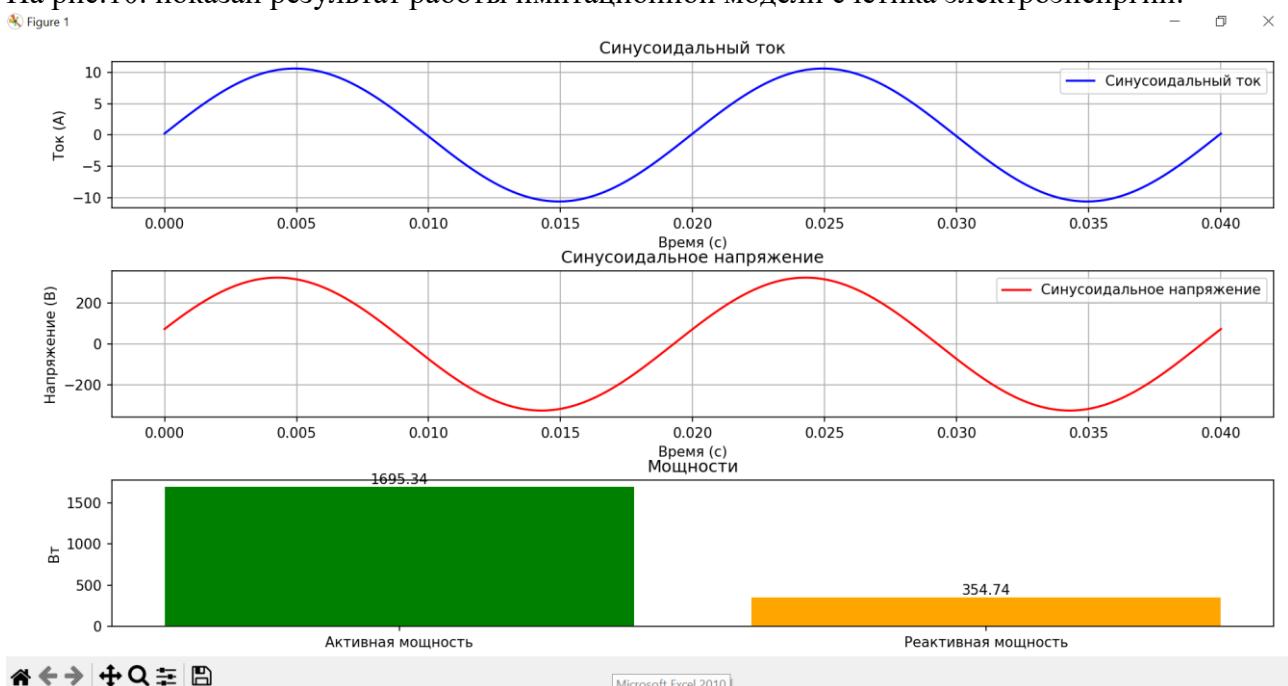


Рис.10. Имитация работы счетчика электроэнергии: ток, напряжение и мощности

Как видно, входные параметры модели задаются с использованием случайной генерации в пределах заранее установленных диапазонов. Это позволяет имитировать поведение сети с учётом возможных отклонений.

На графике представлены три ключевых аспекта работы имитационной модели счётчика электроэнергии:

1. Синусоидальный ток ($I_{kv}(t)$):
 - Верхний график демонстрирует изменение тока во времени.
 - Амплитуда тока достигает около 10 А, что соответствует установленным ограничениям ($0 \leq I_{kv} \leq 15A$).
2. Синусоидальное напряжение ($U_{kv}(t)$):
 - Средний график показывает динамику напряжения во времени.
 - Амплитуда напряжения составляет около 215 В, что также укладывается в диапазон ограничений ($200 \leq U_{kv} \leq 240B$).
3. Активная и реактивная мощности (P_{kv}, q_{kv}):
 - Нижняя диаграмма отображает результаты расчёта мощностей:
 - Активная мощность (P_{kv}): 1695.34Вт.
 - Реактивная мощность (q_{kv}): 354.74Вт.

Графики показывают изменение тока и напряжения в течение временного интервала $t = [0, 0.04c]$, что соответствует двум периодам сети с частотой $f = 50\text{Гц}$.

Итак, можно сделать вывод о том, что данная модель работает корректно, показывает реальную ситуацию в сети в заданный период измерения в пределах заданных ранее отклонений:

1. Высокий коэффициент мощности и доминирующая активная мощность указывают на энергоэффективность сети.
2. Небольшая реактивная мощность свидетельствует о том, что в сети минимально выражены индуктивные или ёмкостные потери.
3. Ток и напряжение не выходят за установленные пределы, что говорит о корректной работе сети и отсутствии сильных отклонений.
4. Такая сеть является оптимальной для работы бытовых и промышленных нагрузок, так как потери энергии сведены к минимуму.

Рассмотрим случай, когда при значительных отклонениях входных параметров, которые близки к пределам стабильности. Это позволит увидеть, как модель реагирует на более экстремальные условия. Изменим входные параметры на:

1. Ток ($I_{kv}(t)$):
 - Новый диапазон: $10 \leq I_{kv} \leq 20\text{A}$ (вместо $0 \leq I_{kv} \leq 15\text{A}$).
 - Это позволяет увидеть влияние высоких токов, характерных для перегрузки.
2. Напряжение ($U_{kv}(t)$):
 - Новый диапазон: $190 \leq U_{kv} \leq 250\text{B}$ (вместо $200 \leq U_{kv} \leq 240\text{B}$).
 - Это моделирует как понижение напряжения (просадка), так и перенапряжение.
3. Фазовые углы α_{kv} и ψ_{kv} :
 - Новый диапазон: $0.2 \leq \alpha_{kv}, \psi_{kv} \leq 0.6$ (вместо $(0 \leq \alpha_{kv}, \psi_{kv} \leq 0.3)$).
 - Это позволяет учесть значительные фазовые сдвиги, характерные для больших реактивных нагрузок.

Генерация параметров остаётся случайной, но в изменённых диапазонах, что обеспечит вариативность и возможность наблюдать поведение счётчика в разных условиях.

На рис.11 показан результат имитации работы счетчика электроэнергии в условиях новых отклонений.

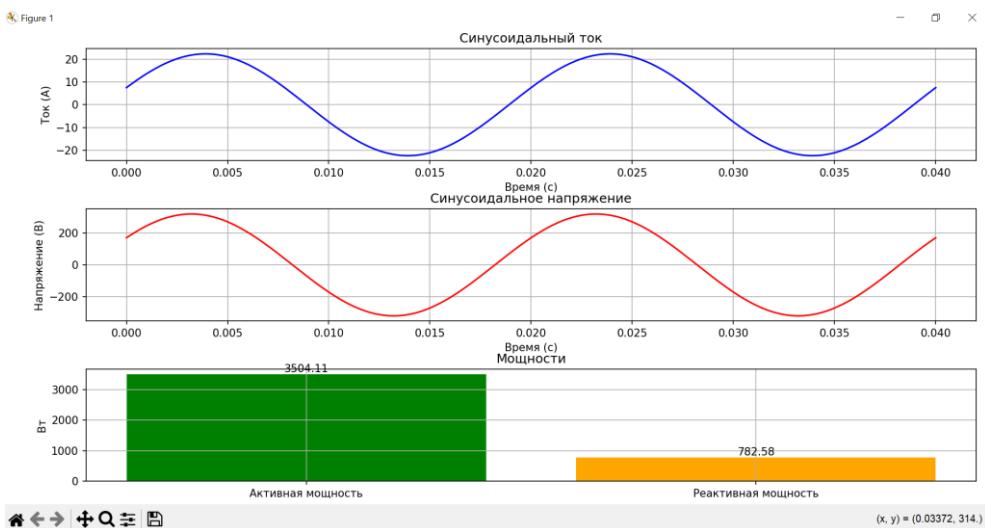


Рис.11. Имитация работы счетчика электроэнергии: ток, напряжение и мощности с отклонениями

Как видно из графика, увеличение амплитуд сигналов и мощностей указывает на более тяжёлые условия работы сети. Значения напряжения, близкие к 190В или 250В, могут привести к проблемам в реальной сети, например, к перегреву оборудования. Также видно, что наблюдается рост как активной, так и реактивной мощности. Однако, высокий коэффициент мощности подтверждает, что сеть остаётся энергоэффективной, несмотря на увеличенные нагрузки.

Имитационная модель процессов в распределительной сети. Структура имитационной модели счетчиков электроэнергии показана на рис. 4. На её основе построена имитационная модель системы, включающей абонентские счетчики электроэнергии ($C_{ch,r}$) фазные провода и нулевой провод распределительной сети, что показано на рис. 12.

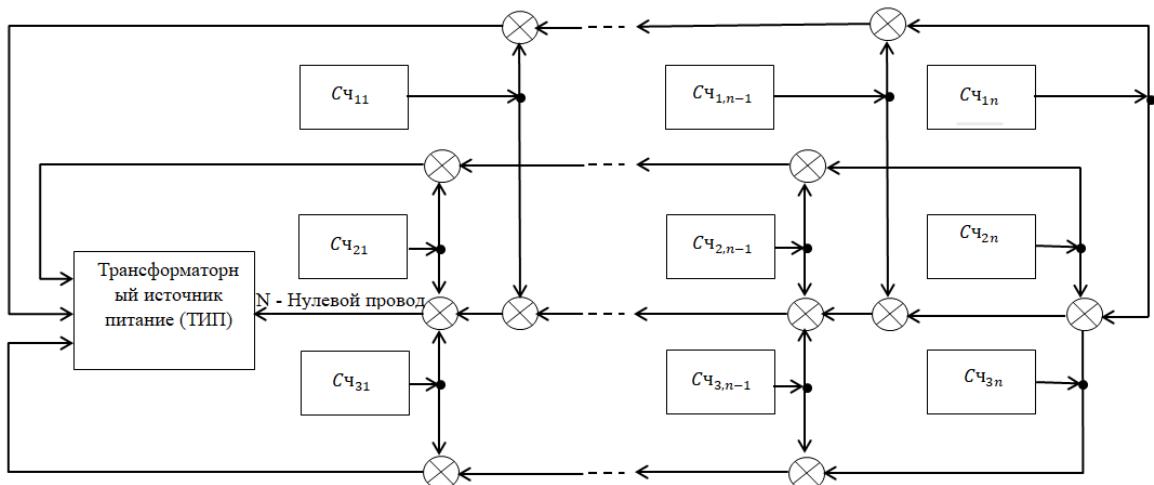


Рис. 12. Имитационная модель процессов в трехфазной сети

Моделирование динамических процессов с использованием имитационной модели. Основной целью моделирования с использованием разработанной имитационной модели сети является исследование эффективности новых параметров и алгоритмов, предназначенных для:

- оптимизации режимов работы РЭС на основе симметрирования фазных нагрузок;
- локализации координат несанкционированных отборов электроэнергии (НОЭ) в сети;
- идентификации недоступных для измерения переменных состояния (токов, напряжений) трехфазной сети в заданных местах (узлах).

Динамика токов и напряжений на основе схемы имитационной модели распределительной трехфазной сети заданной структуры со счетчиками электроэнергии ($n=6$) приведеной на рис.12 может выглядеть как показана на рис.13.

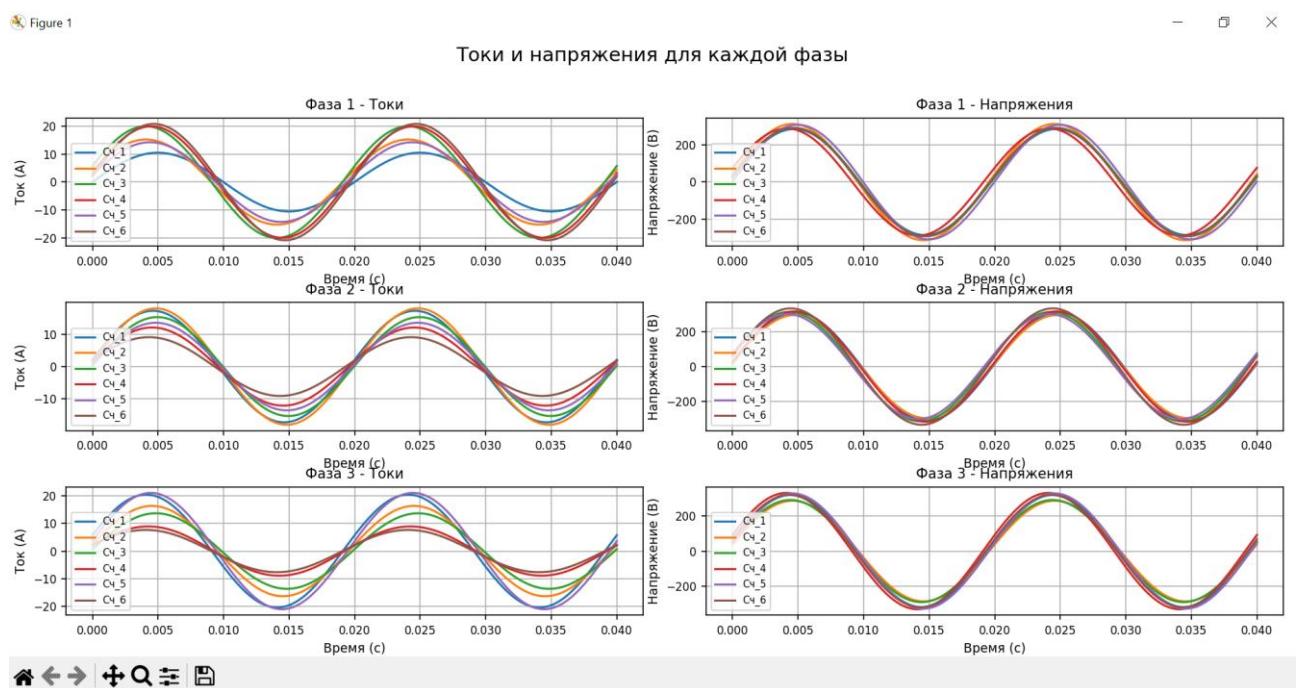


Рис.13. Динамические процессы в имитационной модели сети (MatLab)

Ниже в табл.1 приведены результаты измерений этих счетчиков текущего состояния сети. Ограничения и отклонения взяты как в предыдущем разделе. Это обеспечит реальные данные.

Табл.1.

	I_{kv}			U_{kv}			α_{kv}			ψ_{kv}		
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$\nu = 1$	9.33	7.23	5.63	230.65	209.44	218.12	0.189	0.230	0.264	0.092	0.022	0.170
$\nu = 2$	11.08	7.21	5.12	222.10	216.38	207.91	0.091	0.078	0.134	0.050	0.183	0.230
$\nu = 3$	12.08	6.75	12.59	238.61	212.86	220.46	0.230	0.054	0.127	0.184	0.285	0.169
$\nu = 4$	14.03	5.25	12.65	226.68	222.05	202.82	0.128	0.175	0.044	0.229	0.165	0.014
$\nu = 5$	14.17	9.04	9.81	202.80	231.46	229.96	0.141	0.068	0.186	0.010	0.158	0.149
$\nu = 6$	5.57	8.94	10.66	228.47	236.43	202.09	0.293	0.174	0.054	0.075	0.220	0.010

На основе полученных графиков (рис.13) и данных табл.1. можно сделать вывод о том, что модель корректно воспроизводит синусоидальные сигналы токов и напряжений для

трёхфазной сети, что соответствует реальной работе сети. Графики и данные подтверждают корректность работы модели:

1. Все параметры находятся в заданных пределах.
2. Модель учитывает индивидуальные особенности каждого счётчика.
3. Сеть показывает стабильные синусоидальные токи и напряжения с допустимыми отклонениями.

Исследования эффективности метода идентификации переменных состояния сети недоступных для измерения. Вначале рассмотрим проблему оценки действующих значений межабонентских токов, которые представлены векторами $l_k = [l_{k1}, l_{k2}, \dots, l_{kn}]$, где $k = \overline{1,3}$; n – количество абонентов, подключенных к каждой фазе сети. Для конкретизации задачи далее примем, что $n = 6$, а интервал наблюдения $\Delta t = 600$ сек. Ограничения (5) на параметры счетчиков электроэнергии зададим в виде:

$$\begin{aligned} 0 \leq l_{kv} \leq 15, \\ 200 \leq U_{kv} \leq 240, \\ 0 \leq \alpha_{kv} \leq 0,3, \\ 0 \leq \psi_{kv} \leq 0,3. \end{aligned}$$

Базовые (номинальные) значения фазовых сдвигов:

$$\beta_1 = 0, \quad \beta_2 = \frac{2\pi}{3}, \quad \beta_3 = \frac{4\pi}{3}.$$

Проведем сравнительный анализ результатов идентификации компонентов векторов $l_k = [l_{k1}, l_{k2}, \dots, l_{k5}]$, $k = \overline{1,3}$, полученных на основе метода, изложенного в (Омогов, Такырбашев, 2021, Рр.38-46) и компьютерного моделирования с использованием разработанной имитационной модели РЭС, включающей абонентские счетчики электроэнергии. При этом используются одни и те же исходные данные (табл.1), которые для заданного интервала наблюдения $\Delta t = 600$ сек.

Результаты расчета на основе рассматриваемого метода и имитационного моделирования по межабонентским токам приведены в табл. 2. Отметим, что в приведенных таблицах через токи \hat{l}_{kv} , \hat{J}_1 обозначены их оценки, полученные на основе рассматриваемого метода, а через токи l_{kv} и J_k – результаты имитационного моделирования.

Таблица 2.

	$k = 1$		$k = 2$		$k = 3$	
	\hat{l}_{1v}	l_{1v}	\hat{l}_{2v}	l_{2v}	\hat{l}_{3v}	l_{3v}
$v = 1$	21.12	21.55	24.67	25.18	26.67	27.22
$v = 2$	15.86	16.19	18.89	19.28	22.52	22.98
$v = 3$	10.96	11.69	14.38	14.68	16.34	16.68
$v = 4$	8.50	8.69	10.57	10.79	11.16	11.39
$v = 5$	6.06	6.19	8.12	8.29	6.45	6.59
$v = 6$	4.12	4.20	5.39	5.50	3.13	3.20

Исследование метода эффективности оптимизации режима работы РЭС. Теперь рассмотрим случай, связанный с оптимизацией режимов работы РЭС. В работах (Оморов, Такырбашев, 2016, С. 651-656) для симметрирования начального участка сети предлагается минимизировать суммарную ошибку управления E , которая определяется выражением:

$$E = |e_1| + |e_2| + |e_3|, \quad (8)$$

где $|e_k|$ - отклонение входного фазного тока l_{k1} (или мощности P_{k1}) от его желаемого (номинального) значения l_k , т.е.

$$e_k = l_{k1} - l, \quad k = \overline{1,3}. \quad (9)$$

При этом величина l определяется как среднее значение входных фазных токов:

$$l = (l_{11} + l_{21} + l_{31})/3. \quad (10)$$

1. Считается, что минимизация показателя E , определяемая формулой (8), приводит к уменьшению тока J_1 нулевого провода, что обеспечивает сокращению потерь электроэнергии в трансформаторной подстанции и начальном участке магистральной линии сети. В работе (Оморов, Джолдошов, 2012, С. 28-36) минимизацию показателя E предлагается путем переключения соответствующих абонентских счетчиков электроэнергии с более нагруженной фазы на менее нагруженные. Для этой цели используются специальные электронные цифровые устройства, названные коммутаторами фазных токов (КФТ). Разработан вычислительный алгоритм управления потерями электроэнергии на основе минимизации (оптимизации) критериальной функции E . Далее рассмотрим потенциальную возможность такого подхода для оптимизации режима работы РЭС с использованием разработанной имитационной модели РЭС со счетчиками электроэнергии.

Предварительно проведем анализ данных первой строки

$$l_{11} = 15.3, l_{21} = 10.5, l_{31} = 12.8.$$

Номинальное значение

$$l = 12.9$$

Ошибки управления по фазам:

$$e_1 = 15.3 - 12.9 = 2.4,$$

$$e_2 = 10.5 - 12.9 = -2.4,$$

$$e_3 = 12.8 - 12.9 = -0.1$$

При этом значение показателя

$$E = 2.4 + 2.4 + 0.1 = 8.9,$$

2. а значение тока нулевого провода J_1 = взять из таблицы. Отсюда видно, что для оптимизации режима работы рассматриваемой РЭС необходимо минимизировать критериальную функцию E . Для этой цели в соответствии с методом, описанным в (Оморов, Кожекова, 2009, С.10-13), один из нагрузок фазы А ($k = 1$) будем переключать на фазы В ($k = 2$). В результате входные фазные токи принимают средние значения:

$$l_{11} = 13.8, l_{21} = 12.0, l_{31} = 12.8.$$

При этом

$$l = 12.9,$$

а ошибки управления

$$e_1 = 13.8 - 12.9 = 0.9,$$

$$e_2 = 12.0 - 12.9 = -0.9,$$

$$e_3 = 12.9 - 12.8 = 0.1.$$

Вычислим значение показателя E :

$$E = 1.6 + 0.2 + 0.6 = 2.4.$$

Путем моделирования получаем значение тока $J_1 = ?$. Отсюда видно, что уменьшение показателя E привело к снижению тока J_1 .

Анализ полученных данных показывает, что имеется возможность дальнейшего уменьшения значения E . Для этой цели C_{r_x} , подключенный к фазе А, переключаем к фазе В. В результате входные фазные токи l_{k1} , $k = \overline{1,3}$, принимают следующие значения:

$$l_{11} = 12.9, l_{21} = 12.9, l_{31} = 12.8,$$

а $l = 12.9$. При этом, ошибки управления по фазам:

$$e_1 = 0,$$

$$e_2 = 0,$$

$$e_3 = 0.1.$$

Следовательно, критериальная функция E принимает минимальное значение, т.е. $E = 0.1$. Далее на основе полученных исходных данных путем имитационного моделирования находим величину тока J_1 нулевого провода: $J_1 = ?$. Таким образом, полученные результаты показывают, что минимизация критериальной функции E обеспечивает минимизацию тока J_1 , что приводит к уменьшению потерь электроэнергии в РЭС. Графическая иллюстрация процесса оптимизации показана на рис.13 а, б, где -номер итерационного процесса при оптимизации РЭС.

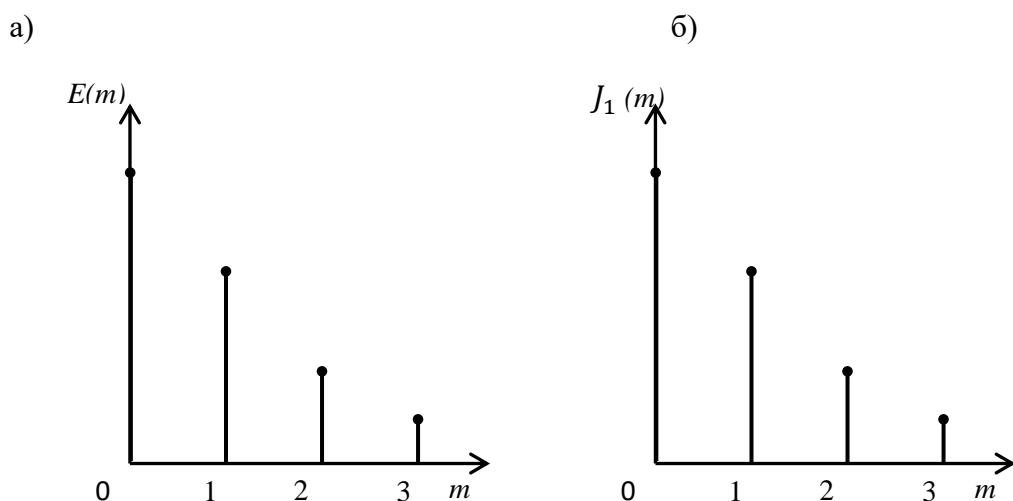


Рис.14. Динамика показателей E и J_1 при оптимизации режима работы РЭС

Заключение

Одной из направлений совершенствования программно-аппаратных комплексов АСКУЭ состоит в разработке новых функциональных подсистем в составе этих автоматизированных систем на основе научно обоснованных методов и цифровых технологий, ориентированных на сокращение потерь электроэнергии в сети в режиме реального времени. В целях исследования и отработки этих новых подсистем разработана имитационная модель автоматизированной распределительной сети с использованием программного комплекса MatLab. Использование разработанной системы моделирования позволяет исследовать эффективность методов решения таких функциональных задач как оптимизация режимов работы РЭС на основе симметрирования фазных нагрузок,

мониторинг потерь электроэнергии в сети и идентификации переменных состояния сети недоступных для измерения.

Список литературы

1. Авербух, М.А., Жилин, Е.В. (2016). “О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства”. *Энергетик*, №6, сс. 54-56.
2. Дед, А. В., Бирюков, С. В., Паршукова, А. В. (2014). “Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных”. *Успехи современного естествознания*, № 11, сс. 64-67.
3. Киселев, М.Г., Лепанов, М.Г. (2018). “Симметрирование токов в сетях электроснабжения силовым электрическим регулятором неактивной мощности”. *Электротехника*, №11. сс. 63-70.
4. Оморов, Т.Т., Такырбашев, Б.К., Койбагаров, Т. Дж. (2021). “Управление потерями электроэнергии в распределительных сетях в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии”. *Мехатроника, автоматизация, управление*, Т. 22, №4, сс. 192-199.
5. Оморов, Т.Т., Осмонова, Р.Ч., Койбагаров, Т.Ж., Эралиева, А.Ш. (2018). “К проблеме идентификации технических и коммерческих потерь электроэнергии в составе АИИС КУЭ”. *Электроэнергия. Передача и распределение*, №5 (50), сс. 56-60.
6. Оморов, Т.Т., Такырбашев, Б.К., Осмонова, Р.Ч., Койбагаров, Т.Ж. (2019). “Идентификация координаты несанкционированного отбора электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ”. *Контроль. Диагностика*, № 1, сс. 50-55.
7. Оморов, Т.Т., Осмонова, Р.Ч. (2021). “Методика идентификации параметров магистральной линии распределительной сети по данным АСКУЭ”. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, Т. 13. № 3 (51), сс. 168-177.
8. Оморов, Т.Т., Такырбашев, Б.К., Осмонова, Р.Ч. (2017). “К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ”. *Вестник ЮРГУ. Серия Энергетика*, № 9, сс. 17-23.
9. Оморов, Т.Т., Такырбашев, Б.К. (2016) “Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением”. *Мехатроника, автоматизация, управление*, №10, сс. 651-656.
10. Оморов, Т.Т., Джолдошов, Б.О. (2012). “Краткий обзор методов анализа и синтеза нелинейных САУ”. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова*, Бишкек, №26, сс. 28-36.
11. Оморов, Т.Т., Кожекова, Г.А. (2009). “Синтез законов управления взаимосвязанными электроприводами”. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, №10. сс. 10-13.
12. Стенников, В.А., Голуб, И.И., Болоев, Е.В. (2024). “Использование измерений интеллектуальных счетчиков для установления виновных в неучтенном потреблении электроэнергии”. *Энергетик*, №4. с. 3.

13. El-Hawary, M.E. (2014). “The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends. Electr”. *Power Compon. Syst.* 42, pp. 239–250.
14. Jeyaranjani, J., Devaraj, D. (2018). “Machine learning algorithm for efficient power theft detection using smart meter data”. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7, no. 3, pp. 900–904.
15. Kazmi, S.A., Shahzad, M.K., Khan, A.Z., Shin, D.R. (2017). “Smart Distribution Networks: A Review of Modern”. *Energies*, 2017.
16. Kirankumar, T., Sri Madhu, G.N. (2018). “Power theft detection using probabilistic neural network classifier”. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, no. 8. – P. 834–838.
17. Omorov, T.T., Takyrbashev, B., Zakiriae, K., Koibagarov, T. (2021). “Digital Control of Electric Power Flows in Unbalanced Distribution Networks as Part of The Automated Metering and Control System”. *Energy Systems Research*, Vol. 4, No. 1(13), pp. 38-46.
18. Omorov, T.T., Takyrbashev, B. K., Osmonova, R.Ch. (2016). “Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network”. *Engineering Studies*, №3, pp. 606-615.

Патенты

Патент № 2490768 (РФ). И.В. Наумов, Д.А.Иванов, С.В. Подъячих, Гантулга Дамдинсурэн. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом // Бюлл. № 23. 20.08.2013.

Патент № 2548656 (РФ). Самокиш В.В. Способ симметрирования фазных токов трехфазной четырехпроводной линии и устройство для его осуществления // Бюлл. №11. 27.12.2013.

Электронные источники

<http://www.sigmatelas.lt/> (дата использования: 08.08.2025)

<http://www.energomera.ru/> (дата использования: 08.08.2025)