

УДК 621.3.052.3

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-104-115

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА РЕЖИМА НИЗКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, Ю. А. РУДЧЕНКО, Д. И. ВЕРЕМЕЕВА,
Д. В. СУЧКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Рассмотрены алгоритмы расчета установившегося режима трехфазной низковольтной электрической сети. Алгоритмы базируются на известном матричном методе узловых потенциалов с использованием комплексных чисел. Для решения системы уравнений предложено применять метод Гаусса. С целью обоснования применения этого метода проведены экспериментальные исследования, показавшие, что сопротивление нагрузки бытовых потребителей с достаточной точностью можно представить как линейное, не зависящее от напряжения. Приведенные алгоритмы применены в программе LineCapacity, предназначенной для расчета режима электрической сети и последующей оценки ее пропускной способности. Точность расчетов в программе LineCapacity проверена двумя независимыми способами и не вызывает сомнений. Установлено, что практическая значимость использования программы LineCapacity заключается в возможности оценки пропускной способности электрических сетей на этапах их проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: электрическая сеть, алгоритм, матричный метод, установившийся режим, программное обеспечение.

Для цитирования. Автоматизация расчета режима низковольтной электрической сети / Д. И. Зализный, Ю. А. Рудченко, Д. И. Веремеева, Д. В. Сучков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 104–115. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-104-115

AUTOMATION OF LOW-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORK MODE CALCULATION

**D. I. ZALIZNY, Y. A. RUDCHENKO, D. I. VEREMEEVA,
D. V. SUCHKOV**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

Algorithms for calculating the steady-state mode of a three-phase low-voltage electrical network are considered. The algorithms are based on the well-known nodal potential matrix method using complex numbers. The Gaussian elimination method is proposed for solving the system of equations. To justify the application of this method, experimental studies were conducted, demonstrating that the load resistance of household consumers can be accurately approximated as linear and independent of voltage. The proposed algorithms were implemented in the LineCapacity software, designed for electrical network mode calculations and subsequent evaluation of network capacity. The accuracy of the calculations in LineCapacity was verified using two independent methods and is considered reliable. It was established that the practical significance of the LineCapacity software lies in its ability to assess the capacity of electrical networks at the design and operation stages.

Keywords: electrical network, algorithm, matrix method, steady-state mode, software.

For citation. Zaliznyi D. I., Rudchenko Yu. A., Veremeeva D. I., Suchkov D. V. Automation of low-voltage electrical network mode calculation. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 1 (100), pp. 104–115 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-104-115

Введение

Расчет установившегося режима электрической сети – важная составляющая при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения. Вычислительные возможности современных компьютеров позволяют выполнять такие расчеты для электрических сетей со значительным количеством элементов.

Наиболее известными программными продуктами в данной области являются RastrWin и Mustang. Эти и подобные им программы ориентированы, как правило, на работу с высоковольтными трехфазными электрическими сетями, где наблюдается относительная симметричность нагрузок потребителей по фазам и расчеты можно проводить упрощенно: как для однофазных сетей. Именно упрощенные расчеты и используются в подавляющем большинстве таких программ.

Низковольтные трехфазные электрические сети часто характеризуются значительной несимметричностью нагрузок, особенно в населенных пунктах с частной застройкой.

Для расчета режимов этих сетей необходимо учитывать влияние всех фаз и участков нулевого провода. Программных продуктов, способных реализовать такие задачи в рамках целых населенных пунктов, на сегодняшний день очень мало и разработки в данном направлении актуальны и необходимы.

Цель представленных в данной статье исследований – разработать алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие выполнять расчет установившегося режима низковольтной трехфазной электрической сети с несимметричной нагрузкой.

Состояние проблемы

Классически в теории электрических сетей исходными данными для расчета являются значения напряжений со стороны источников питания и значения мощностей потребителей [1]. Причем мощности потребителей могут как не зависеть от значения напряжения, так и зависеть от него в соответствии со статическими характеристиками нагрузки.

При такой формулировке задачи расчет выполняется только итерационными методами, такими как метод Зейделя или метод Ньютона [2–6]. В качестве современного подхода в литературе предлагаются генетические алгоритмы [4].

Итерационные методы расчета обладают двумя существенными недостатками: затратами вычислительного времени на каждую итерацию и отсутствием гарантии устойчивости итерационного процесса.

Альтернативой итерационным методам становятся методы прямого расчета с вычислением обратной матрицы или метод Гаусса [2]. Однако их применение возможно только тогда, когда сопротивление нагрузки потребителя является линейным, не зависящим от напряжения.

Алгоритмы расчета установившегося режима электрической сети

Для расчета напряжений в узлах схемы примем матричный метод узловых потенциалов [7], в соответствии с которым потенциалы в узлах схемы определяются по формуле

$$[\varphi][A][g][A]^T = -[A][g][E], \quad (1)$$

где $[\varphi]$ – матрица узловых потенциалов; $[A]$ – узловая матрица (матрица инцидентий); $[g]$ – диагональная матрица проводимостей ветвей; $[E]$ – матрица ЭДС ветвей.

Обозначив $[G] = [A][g][A]^T$, получим:

$$[\varphi][G] = -[A][g][E], \quad (2)$$

где $[G]$ – матрица суммы проводимостей ветвей.

Решение системы уравнений (2) будем выполнять по методу Гаусса (методом Гауссовых исключений) как наиболее просто реализуемому на этапе программирования. Результатом решения является матрица-столбец узловых потенциалов $[\varphi]$. Для расчета падения напряжения между узлами с номерами i и j необходимо воспользоваться выражением

$$U_{i,j} = \varphi_i - \varphi_j, \quad (3)$$

где φ_i, φ_j – значения матрицы $[\varphi]$ в i -й и j -й строках.

Отметим, что обязательным условием для формул (1)–(3) является выполнение расчетов над комплексными числами, т. е. по символическому методу, принятому в электротехнике при расчете цепей переменного тока. Рассмотрим простейшую расчетную схему электрической сети (рис. 1).

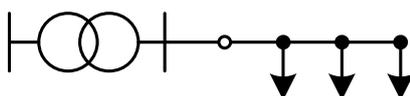


Рис. 1. Расчетная однолинейная электрическая схема

Данная схема содержит силовой трансформатор и магистральную воздушную линию электропередачи на четырех опорах, три из которых имеют ответвления к потребителям.

На основании этой расчетной схемы можно составить схему замещения, показанную на рис. 2.

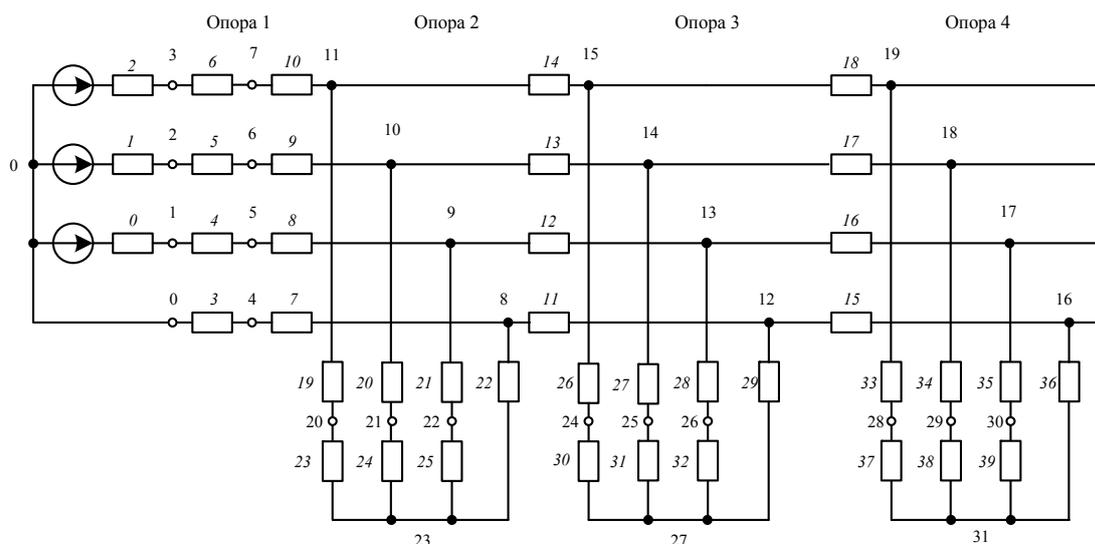


Рис. 2. Схема замещения для расчетной схемы

Цифрами на схеме замещения обозначены номера узлов и ветвей. Источник питания представлен трехфазной системой ЭДС с внутренними сопротивлениями. Фазные ЭДС трехфазной системы задаются в следующем виде:

$$\dot{E}_1 = U_{\text{нн}}; \dot{E}_2 = U_{\text{нн}} e^{-j120^\circ}; \dot{E}_3 = U_{\text{нн}} e^{j120^\circ}, \quad (4)$$

где $U_{\text{нн}}$ – значение фазного напряжения сети.

Величина $U_{\text{нн}}$ определяется по формуле

$$U_{\text{нн}} = \frac{U_{\text{ВН ном}} \left(1 + N_{\text{ПБВ}} \frac{K_{\text{ПБВ}}}{100} \right)}{\sqrt{3} K_{\text{т}}} = \frac{U_{\text{НН ном}} \left(1 + N_{\text{ПБВ}} \frac{K_{\text{ПБВ}}}{100} \right)}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{ВН ном}}$ – номинальное напряжение силового трансформатора со стороны высокого

напряжения (ВН); $K_{\text{т}} = \frac{U_{\text{ВН ном}}}{U_{\text{НН ном}}}$ – номинальный коэффициент трансформации; $U_{\text{НН ном}}$ –

номинальное напряжение трансформатора со стороны низкого напряжения (НН); $N_{\text{ПБВ}}$ – номер ступени (ответвления) переключения без возбуждения (ПБВ) силового трансформатора; $K_{\text{ПБВ}}$ – шаг одной ступени ПБВ, %.

В формуле (5) предполагается, что в исходном положении $N_{\text{ПБВ}} = 0$. Для повышения напряжения $N_{\text{ПБВ}} > 0$, для понижения напряжения $N_{\text{ПБВ}} < 0$.

Внутренние сопротивления источников ЭДС рассчитываются по следующему выражению:

$$\dot{Z}_0 = \frac{P_{\text{КЗ}} U_{\text{НН ном}}^2}{S_{\text{н}}^2} + j \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НН ном}}^2}{S_{\text{н}}} \frac{U_{\text{КЗ, \%}}}{100} \right)^2 - \left(\frac{P_{\text{КЗ}} U_{\text{НН ном}}^2}{S_{\text{н}}^2} \right)^2}, \quad (6)$$

где $P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания трансформатора; $U_{\text{КЗ, \%}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора; $S_{\text{н}}$ – номинальная мощность трансформатора.

Участок магистральной линии, а также ответвление от магистрали к потребителю представлены в схеме замещения трехфазной четырехпроводной сетью (3 фазных провода и нулевой).

Фазный проводник для осветительной сети в схеме замещения не предусматривается.

Осветительная нагрузка магистральной линии намного меньше фазной силовой нагрузки, поэтому в расчетах учитываться не будет.

Каждый провод показан в схеме замещения комплексным сопротивлением. Однако анализ справочных данных заводов-производителей кабельно-проводниковой продукции указывает на то, что индуктивное сопротивление проводов низковольтных воздушных линий электропередачи (ЛЭП) намного меньше активного, поэтому индуктивной составляющей сопротивления в расчетах будем пренебрегать. Тогда сопротивления проводов участка ЛЭП определяются по формуле

$$\dot{Z}_{\text{ЛЭП}} = RL, \quad (7)$$

где R – активное сопротивление участка ЛЭП, Ом/км; L – длина участка ЛЭП, км.

Однофазный потребитель электроэнергии в схеме замещения представлен одной ветвью с комплексным сопротивлением \dot{Z}_H , рассчитываемым по следующей формуле:

$$\dot{Z}_H = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_H + jQ_H}, \quad (8)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение потребителя, равное 220 В; P_H – мощность активной нагрузки потребителя; Q_H – мощность реактивной нагрузки потребителя.

Трехфазный потребитель характеризуется тремя ветвями на схеме замещения с равными сопротивлениями:

$$\dot{Z}_H = \frac{3U_{\text{НОМ}}^2}{P_H + jQ_H}. \quad (9)$$

В формулах (8), (9) подразумевается, что сопротивление нагрузки потребителя является линейным, т. е. не зависит от напряжения.

При использовании в расчетах установившегося режима электрической сети рассмотренных алгоритмов сложность этой сети ограничивается только вычислительными возможностями компьютера.

Экспериментальное определение зависимости сопротивлений нагрузки от напряжения для некоторых электроприемников

Для анализа зависимости сопротивления нагрузки характерных бытовых электроприемников от напряжения на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого была создана экспериментальная установка, состоящая из лабораторного автотрансформатора, трех ваттметров типа ЦЛ8516/2, мультиметра МНИПИ В7-77, распределительной коробки и 15 бытовых электроприемников.

Ваттметры использовались для измерения в реальном времени тока, мощности, коэффициента мощности.

В ходе испытаний при помощи лабораторного автотрансформатора напряжение плавно изменялось в диапазоне 150–250 В. Все электроприемники функционировали в своих естественных режимах.

Результаты, полученные при испытаниях для различных электроприемников, отображены на рис. 3 в виде зависимостей, показывающих, как влияет величина напряжения U на величину отклонения сопротивления нагрузки ΔR от номинального значения.

В целом можно сделать вывод, что у большинства маломощных электроприемников вольт-амперная характеристика нелинейна и их сопротивление возрастает с ростом напряжения.

Однако мощные электроприемники, такие как утюг, пылесос, обогреватель, электроплита, имеют фактически постоянное значение сопротивления, не зависящее от напряжения.

Данные электроприемники оказывают определяющее влияние на пропускную способность электрической сети.

Следовательно, для бытовых потребителей вольт-амперную характеристику можно принять линейной и рассчитывать сопротивление нагрузки по формулам (8), (9).

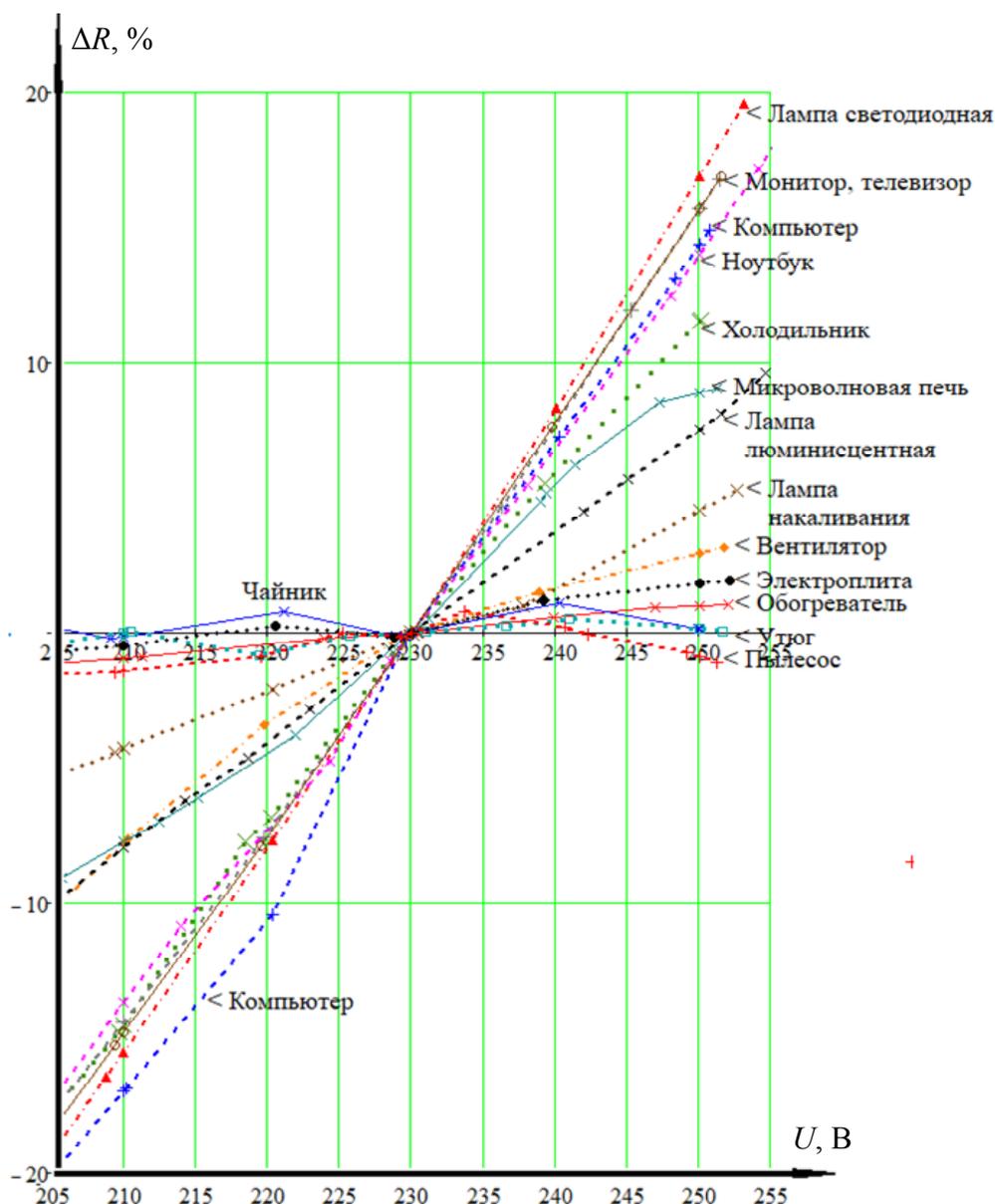


Рис. 3. Семейство графиков зависимости отклонения активного сопротивления нагрузки от напряжения для различных электроприемников

Программа *LineCapacity*

Для реализации описанных выше алгоритмов было создано *Windows*-приложение (далее – программа), которое названо *LineCapacity* (пропускная способность линий).

Программа рассчитывает по каждой фазе значения напряжений и мощностей на шинах трансформаторной подстанции, токов в ЛЭП, напряжений и мощностей для всех потребителей, максимальные потери напряжения и мощности в ЛЭП. Также рассчитываются температуры проводов и силового трансформатора. Автоматически определяются потребители, для которых параметры качества электрической энергии не соответствуют нормам (уровень напряжения – ниже или выше допустимого значения), и участки электрической сети, температура нагрева проводов на которых превышает длительно допустимые значения.

Программа *LineCapacity* написана на языке C++ и использует ряд объектов специально разработанных классов. Перечень некоторых из них приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень основных классов программы *LineCapacity*

Класс	Назначение
<i>Transformer</i>	Работа с параметрами силового трансформатора
<i>Line</i>	Работа с параметрами провода (кабеля)
<i>Column</i>	Работа с параметрами опоры
<i>Consumer</i>	Работа с параметрами потребителя
<i>Coordinates</i>	Работа с присоединениями на схеме
<i>Matrix</i>	Класс матриц с комплексными числами

Все эти классы оснащены необходимыми параметрами и методами (функциями). В качестве примера рассмотрим основные параметры и методы класса *Consumer* (потребитель). Они даны в табл. 2. Используются параметры потребителя как элемента АСКУЭ, элемента схемы сети и электрической нагрузки в схеме.

Таблица 2

Перечень основных элементов класса *Consumer*

Элемент класса	Назначение
<i>Address</i>	Почтовый адрес потребителя
<i>Type</i>	Дополнительные данные по потребителю: адрес прибора АСКУЭ, мощность по ТУ и др.
<i>x, y</i>	Координаты потребителя на схеме
<i>P</i>	Мощность индивидуальной нагрузки потребителя
<i>cosphi</i>	Коэффициент мощности потребителя
<i>ph</i>	0 – трехфазный; 1 – однофазный
<i>nbph</i>	Номер фазы однофазной ЛЭП, к которой подключен потребитель
<i>ldtype</i>	Вид текущей нагрузки потребителя: 0 – типовая нагрузка; 1 – индивидуальная нагрузка
<i>R, X</i>	Активное и реактивное сопротивления индивидуальной нагрузки потребителя

Для реализации матричных вычислений с комплексными числами созданы необходимые функции: перемножение матриц, сложение матриц, расчет по методу Гаусса и др. Для ускорения расчетов некоторые операции были оптимизированы. Так, при перемножении чисел поставлено условие, что если один из сомножителей равен нулю, то и результат произведения равен нулю. При этом операции перемножения не происходит. Это позволило ускорить расчеты приблизительно в 2 раза, поскольку в используемых матрицах встречается много нулей.

На рис. 4 показана структурная схема основных функциональных блоков программы *LineCapacity*.

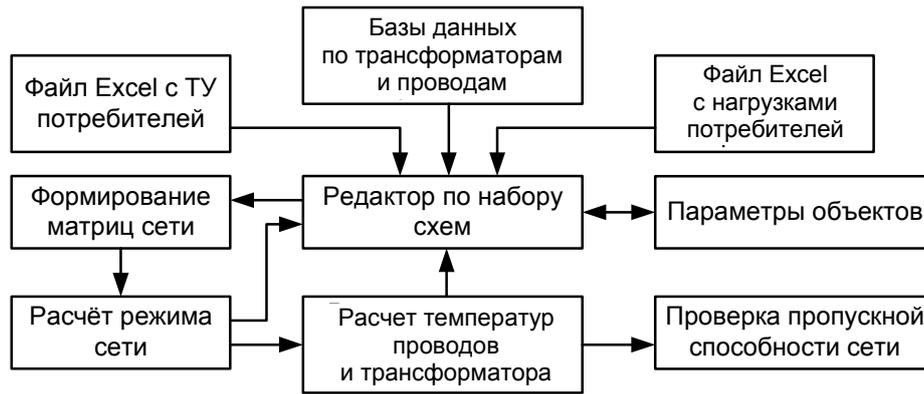


Рис. 4. Структурная схема программы *LineCapacity*

Центральным модулем программы является редактор по набору схем. В процессе формирования схемы сети создаются требуемые объекты: линии, опоры, потребители, присоединения. При этом трансформатор на схеме может быть только один. Фрагмент схемы для реального населенного пункта представлен на рис. 5.

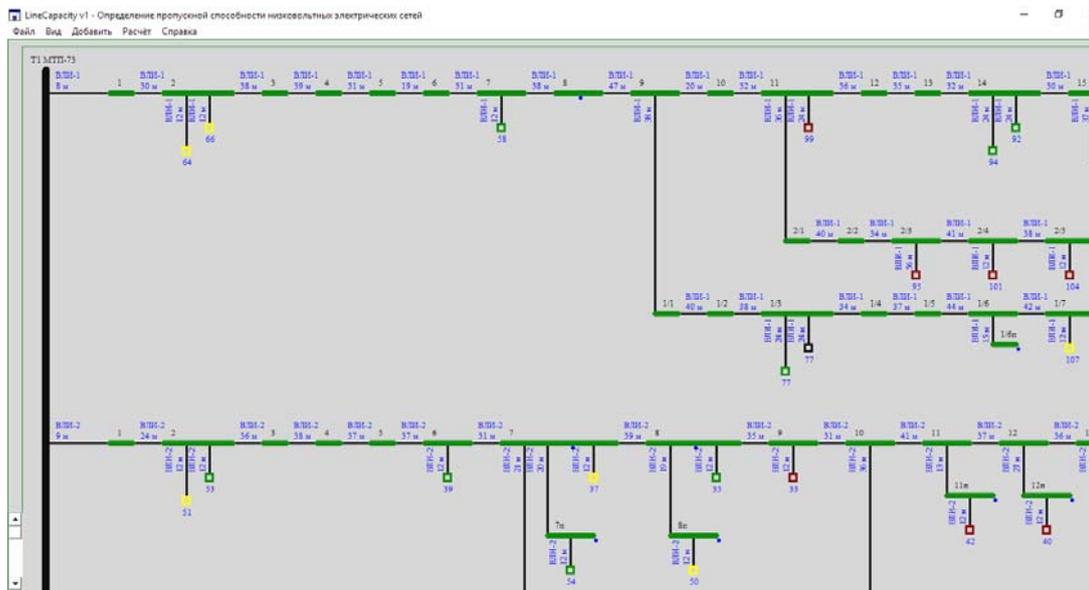


Рис. 5. Фрагмент схемы населенного пункта в программе *LineCapacity*

Все элементы схемы являются интерактивными, т. е. при нажатии на них мышью появляются окна редактирования параметров объектов.

Для трансформатора и линий предусмотрены базы данных, позволяющие выбрать необходимые марки оборудования. Для параметров потребителя могут быть загружены данные из файла *Excel*: почтовый адрес, номер прибора АСКУЭ, мощность по ТУ и др. Также возможен импорт значений нагрузок потребителей из файла *Excel*.

После запуска расчета вначале формируются матрицы: узловая матрица, матрица проводимостей ветвей и матрица ЭДС ветвей (шины ТП). Затем выполняются необходимые операции с этими матрицами для получения матрицы потенциалов в узлах сети, на основе которой рассчитываются требуемые значения напряжений, токов, мощностей, температур проводов и трансформатора и определяется достаточность пропускной способности сети. Результаты расчетов отображаются в окне редактора.

Проверка точности расчетов установившегося режима электрической сети программой *LineCapacity*

Для проверки правильности расчетов, выполняемых программой *LineCapacity*, были проведены аналогичные расчеты с использованием программных продуктов *Mathcad* и *Multisim* для рассматриваемой схемы замещения (рис. 1).

В процессе проверки были приняты следующие исходные данные для параметров схемы: трансформатор марки ТМ-250/10 (номинальная мощность – 250 кВА; потери холостого хода – 0,74 кВт; потери короткого замыкания – 3,7 кВт; номинальное напряжения высокой и низкой стороны 10 и 0,4 кВ соответственно; напряжение короткого замыкания – 4,5 %). Параметры участков магистральной воздушной линии электропередачи, а также ответвлений от магистрали воздушной линии к потребителям приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Принятые параметры участков магистральной ВЛ

Параметр	Участок ЛЭП:			
	трансформатор – опора № 1	опора № 1 – опора № 2	опора № 2 – опора № 3	опора № 3 – опора № 4
Марка провода	А	А	А	А
Длина участка, м	5	40	40	40
Число и сечение фазных/нулевого проводника, Ом/км	3 × 25/1 × 16	3 × 25/1 × 16	3 × 25/1 × 16	3 × 25/1 × 16
Удельное сопротивление фазных/нулевого проводника, Ом/км	1,15/1,8	1,15/1,8	1,15/1,8	1,15/1,8

Таблица 4

Принятые параметры ответвлений от магистральной ВЛ к потребителям

Параметр	Участок ЛЭП:		
	ответвление к потребителю № 1	ответвление к потребителю № 2	ответвление к потребителю № 3
Марка провода	СИП-4	СИП-4	СИП-4
Длина участка, м	5	5	5
Число и сечение фазных/нулевого проводника, Ом/км	1 × 16/1 × 16	3 × 16/1 × 16	3 × 16/1 × 16
Удельное сопротивление фазных/нулевого проводника, Ом/км	1,91/1,91	1,91/1,91	1,91/1,91

Для моделирования несимметричной электрической нагрузки к опоре № 2 был присоединен однофазный потребитель, а к опорам № 3 и № 4 – трехфазные. Параметры потребителей даны в табл. 5.

Таблица 5

Принятые параметры потребителей

Параметр	Потребитель:		
	№ 1	№ 2	№ 3
Активная мощность, кВт	5	5	5
cosφ	1	1	1
Вид потребителя	однофазный	трехфазный	трехфазный

На рис. 6 показаны результаты расчета, выполненного в разработанной программе *LineCapacity*.

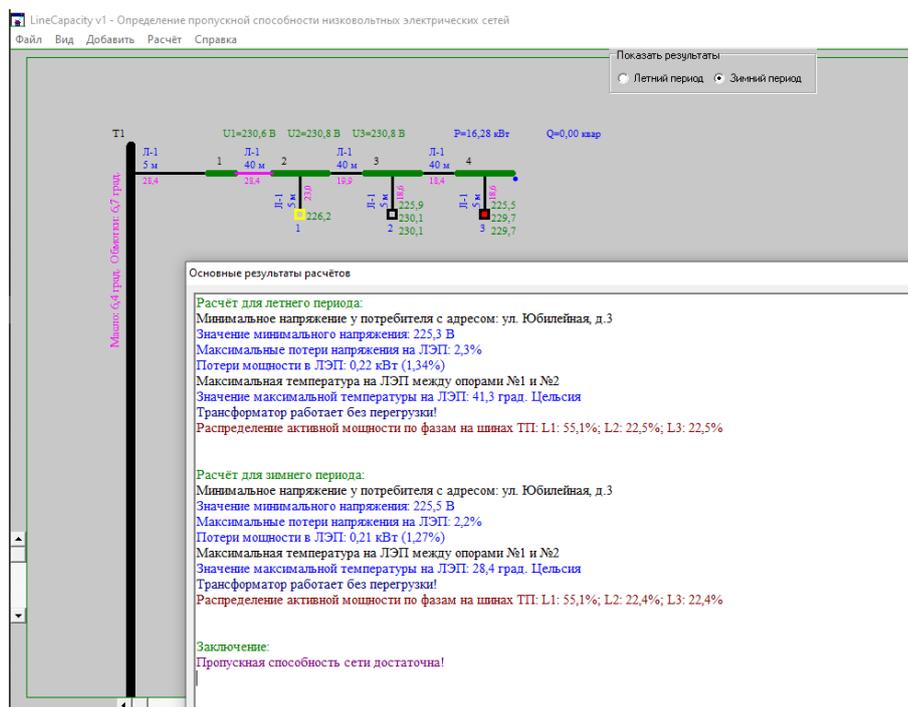


Рис. 6. Внешний вид окон программы *LineCapacity* с результатами расчета

Аналогичные расчеты также были проведены в программе *Mathcad*. Фрагменты расчетных матриц $[A]$ и $[G]$ представлены на рис. 7.

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	-1	0	0	0
2	-1	0	0	0	1	0	0
3	0	-1	0	0	0	1	0
4	0	0	-1	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0	0	0

a)

	1	2	3
1	11.42-32.791i	0	0
2	0	11.42-32.791i	0
3	0	0	11.42-32.791i
4	0	0	0
5	0	0	0

б)

Рис. 7. Фрагменты расчетных матриц в программе *Mathcad*:
 а – узловая матрица; б – матрица проводимостей

Модель рассматриваемой схемы замещения в программе *Multisim* приведена на рис. 8. Для нее выполнены те же расчеты, что и в программе *Mathcad*.

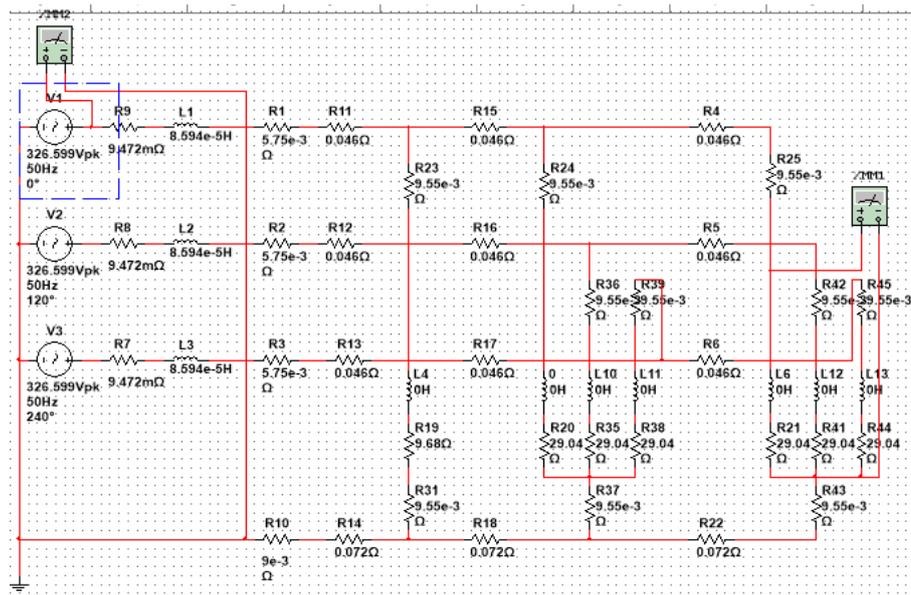


Рис. 8. Расчетная модель в программе *Multisim*

Действующие значения напряжений потребителей, полученные в программах *Mathcad* и *Multisim*, практически совпали с результатами расчета, проведенного в программе *LineCapacity* (табл. 6). Поскольку все расчеты выполнялись в трех различных, не связанных между собой программах, то можно сделать вывод, что точность выполнения расчетов установившегося режима электрической сети в программе *LineCapacity* гарантирована.

Проверка точности расчетов тепловых процессов в проводах и трансформаторах программой *LineCapacity* не проводилась в рамках данной статьи.

Таблица 6

Сравнение результатов расчета значений напряжений потребителей

Параметр	Результаты расчета, полученные в программе		
	<i>LineCapacity</i>	<i>Mathcad</i>	<i>Multisim</i>
Напряжение потребителя № 1 (фаза L1), В	226,2	226,25	226,52
Напряжение потребителя № 2 (фаза L1/ фаза L2/ фаза L3), В	225,9	225,95	225,95
	230,1	230,09	230,08
	230,1	230,07	230,06
Напряжение потребителя № 3 (фаза L1/ фаза L2/ фаза L3), В	225,5	225,61	225,59
	229,7	229,72	229,72
	229,7	229,70	229,69

Заключение

Предложенные алгоритмы и разработанное программное обеспечение *LineCapacity* можно применять для расчетов установившихся режимов трехфазных низковольтных электрических сетей с несимметричной нагрузкой. Практическая значимость использования программы *LineCapacity* заключается в возможности оценки пропускной способности электрических сетей, преимущественно частной жилой застройки, на этапах их проектирования и эксплуатации.

Исследования выполнены в рамках НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда» в сотрудничестве с РУП «Гомельэнерго».

Литература

1. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети : учебник / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск : Технопринт, 2004. – 720 с.
2. Строев, В. А. Уравнения установившегося режима электрической системы и методы их решения / В. А. Строев, Э. Н. Зуев. – М. : МЭИ, 1981. – 96 с.
3. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Иркут. гос. ун-т путей сообщения, 2005. – 273 с.
4. Солопов, Р. В. Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети / Р. В. Солопов, А. С. Самульченков // *Polytech Journal*. – 2018. – Т. 22, № 2 (133). – С. 131–141.
5. Винников, Б. Г. Расчет режимов разомкнутых распределительных сетей методом распределения мощности / Б. Г. Винников, Д. А. Зеленский, В. В. Картавец // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2009. – Т. 5, № 8. – С. 171–174.
6. Фурсанов, М. И. Алгоритм и программа расчета установившихся режимов основных электрических сетей энергосистем / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // *Наука и техника*. – 2002. – № 1. – С. 60–63.
7. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.

References

1. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. *Electrical systems and networks*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 720 p. (in Russian).
2. Stroeve V. A., Zuev E. N. *Electric system steady-state equations and methods of their solution*. Moscow, Izdatel'skii dom MEI Publ., 1981. 96 p. (in Russian).
3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complexly asymmetrical modes of electrical systems. Irkutsk, Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2005. 273 p. (in Russian).
4. Solopov R. V., Samul'chenkov A. S. Application of genetic algorithm for calculation of steady-state mode of electric network. *Polytech Journal*, 2018, vol. 22, no. 2 (133), pp. 131–141 (in Russian).
5. Vinnikov B. G., Zelenskij D. A., Kartavcev V. V. Calculation of open-circuit distribution network modes using the power distribution method. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2009, vol. 5, vol. 8, pp. 171–174 (in Russian).
6. Fursanov M. I., Zolotoj A. A. Algorithm and programme for calculation of steady-state modes of main power grids of power systems. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2002, no. 1, pp. 6063 (in Russian).
7. Bessonov, L. A. *Theoretical fundamentals of electrical engineering*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1996, 638 p. (in Russian).

Поступила 10.02.2025 г.