Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 3 (59). С. 70-80
Vestnik Kurganskoj GSHA. 2026; (3-59): 70-80

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 621.311.1:631.3
Код ВАК 4.3.2

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_59_70_80
EDN: RLZZPT

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЬСКИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 0,4 КВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ АПК

Владимир Алексеевич Кончин[1]✉, Владимир Исаевич Серебровский[2], Ирина Валерьевна Ворначева[3], Александр Александрович Меркулов[4]
[1, 2, 4] Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, Курск, Россия
[3] Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия
[1] konchin98@mail.ru✉, https://orcid.org/0009-0004-0351-3490
[2] svi.doc@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-2894-8922
[3] vornairina2008@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1770-7451
[4] merkurial046@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6579-9312

Аннотация. Цель исследования – разработать и апробировать программно-расчетный алгоритм для автоматизированной оценки параметров сельских линий электропередачи 0,4 кВ с учетом трансформатора 10/0,4 кВ, параметров проводника, длины питающего участка и нагрузки объекта АПК. Методика включает формирование расчетной схемы, определение рабочего тока, реактивной мощности, потери напряжения, сопротивления трансформатора, трехфазного и однофазного токов короткого замыкания, ударного тока, а также серию вариантных расчетов для разных длин и сечений линии. В методике учитываются параметры трансформатора ТМГ-250/10/0,4 кВ: мощность 250 кВА, напряжение короткого замыкания 4,5 %, потери короткого замыкания 3,7 кВт. Исходная нагрузка 51 кВт представлена как смешанная нагрузка сельскохозяйственного объекта с электродвигательными и однофазными приемниками при cosφ = 0,92. Результаты апробации получены для линии СИП-4 4×50 мм². Установлено, что при длине 167,4 м потеря напряжения составляет 5,06 %, а при длине 450 м возрастает до 13,59 %, что превышает принятое проектное ограничение 8 %. Серия расчетов показала, что переход на СИП-4 4×95 мм², сокращение длины питающего участка или разделение нагрузки между двумя фидерами позволяют обеспечить допустимый режим. Контрольное сопоставление с ручным расчетом и R-X моделью показало расхождение не более 0,34 %. Программная реализация выполнена на языке Python с графическим интерфейсом и формированием отчета. Практическая значимость состоит в сокращении трудоемкости многовариантного расчета и повышении обоснованности решений по реконструкции сельских сетей 0,4 кВ.

Ключевые слова: электрическая сеть, линия электропередачи 0,4 кВ, агропромышленный комплекс, потеря напряжения, короткое замыкание, трансформатор 10/0,4 кВ, СИП-4, автоматизированный расчет, качество электроснабжения, надежность электроснабжения.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова» и ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» в рамках средств бюджетного финансирования указанных организаций. Дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Кончин В.А., Серебровский В.И., Ворначева И.В., Меркулов А.А. Автоматизированный расчет параметров сельских линий электропередачи 0,4 кВ для объектов АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 3 (59). С. 70-80. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_59_70_80. EDN: RLZZPT.

Scientific article

AUTOMATED CALCULATION OF PARAMETERS FOR RURAL 0.4 KV POWER TRANSMISSION LINES FOR AGRO-INDUSTRIAL FACILITIES

Vladimir A. Konchin[1]✉, Vladimir I. Serebrovsky[2], Irina V. Vornacheva[3], Alexander A. Merkulov[4]
[1, 2, 4] Kursk State Agrarian University named after I. I. Ivanov, Kursk, Russia
[3] Southwest State University, Kursk, Russia
[1] konchin98@mail.ru✉, https://orcid.org/0009-0004-0351-3490
[2] svi.doc@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-2894-8922
[3] vornairina2008@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1770-7451
[4] merkurial046@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-6579-9312

Abstract. The purpose of the study is to develop and test a software-based calculation algorithm for automated assessment of the parameters for rural 0.4 kV power transmission lines, taking into account the 10/0.4 kV transformer, conductor parameters, the length of the supply section and agro-industrial facility loading. The methodology includes formation of a computational scheme, determination of operating current,

© Кончин В.А., Серебровский В.И., Ворначева И.В., Меркулов А.А., 2026

reactive power, voltage loss, transformer resistance, three-phase and single-phase short-circuit currents, shock current, as well as a series of variant calculations for different lengths and cross-sections of the line. The methodology takes into account the parameters of the TMG [oil-filled waterproofed transformer]-250/10/0.4 kV transformer such as power 250 kVA, short-circuit voltage 4.5%, short-circuit loss 3.7 kW. The initial load of 51 kW is represented as a mixed load of an agricultural facility with electric motor and single-phase receivers at the value cosφ = 0.92. The results of approbation were obtained for the SIP [self-supporting insulated wire]-4 4×50 mm² line. It has been found that with a length of 167.4 m, the voltage loss is 5.06%, and with a length of 450 m it increases to 13.59%, which exceeds the accepted design limit of 8%. A series of calculations has shown that switching to the SIP-4 4×95 mm², reducing the length of the supply section or sharing the load between two feeders make it possible to ensure an acceptable mode. A control comparison with manual calculation and the R-X model has shown a discrepancy of no more than 0.34 %. The software support is implemented in Python with a graphical interface and report generation. The practical significance consists in reducing the complexity of the multivariate calculation and in increasing the substantiation of decisions on reconstruction of rural networks of 0.4 kV.

Keywords: electric grid, 0.4 kV power transmission line, agro-industrial complex, voltage loss, short circuit, 10/0.4 kV transformer, SIP-4, automated calculation, power supply quality, reliability of power supply.

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of Kursk State Agrarian University named after I. I. Ivanov and Southwest State University within the framework of budgetary financing of these organizations. No additional grants were received to conduct or direct this particular study.

For citation: Konchin V.A., Serebrovsky V.I., Vornacheva I.V., Merkulov A.A. Automated calculation of parameters for rural 0.4 kv power transmission lines for agro-industrial facilities // Vestnik Kurganskoj GSHA. 2026; (3-59): 70-80. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_59_70_80. EDN: RLZZPT. (In Russ).

Введение. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей напряжением 0,4 кВ относится к наиболее чувствительным участкам энергообеспечения АПК. На этом уровне подключаются электроприводы ферм и зерноочистительных пунктов, насосные агрегаты, вентиляционные установки, ремонтные мастерские, складские помещения и коммунально-бытовые потребители сельских населенных пунктов. Для таких линий характерны протяженная радиальная схема, сезонная и суточная неравномерность нагрузки, наличие однофазных ответвлений и заметное влияние сопротивления проводов на напряжение у удаленного потребителя. В работах по развитию агроэкосистем и территориальному планированию аграрного сектора отмечается, что энергетическая инфраструктура должна рассматриваться как один из факторов устойчивости сельскохозяйственного производства [1; 2]. Поэтому для сетей 0,4 кВ особое значение имеет не только оценка общей надежности, но и расчет конкретного режима линии: рабочего тока, потери напряжения и токов короткого замыкания. Современные исследования по моделированию сельских сетей 0,4 кВ показывают, что отклонения напряжения, конфигурация линии и размещение нагрузки должны анализироваться совместно, поскольку эти параметры непосредственно определяют допустимость выбранного проектного решения [3; 4].

Анализ публикаций по низковольтным сельским сетям показывает, что типовыми эксплуатационными ограничениями остаются потери электроэнергии, снижение напряжения в конце протяженных линий, несимметрия фазных нагрузок и недостаточная чувствительность защитных аппаратов к минимальным токам однофазного короткого замыкания [3–5]. Для объектов АПК такие ограничения имеют прикладное значение: даже при допустимом токе провода линия может не обеспечить требуемый уровень напряжения для электродвигателей, систем вентиляции, насосов и другого технологического оборудования. Отдельного учета требуют последствия аварийных и плановых отключений, поскольку они влияют на непрерывность технологических процессов, сроки ремонта и величину недоотпуска электроэнергии [4].

Расчет аварийных режимов в сетях 0,4 кВ необходим, поскольку в удаленных точках линии сопротивление петли «фаза-нуль» возрастает, а ток однофазного короткого замыкания может оказаться ниже тока надежного срабатывания защитного аппарата [5]. Следовательно, проверка линии только по длительно-допустимому току не является достаточной. При инженерной оценке требуется одновременно учитывать потерю напряжения, чувствительность защиты, распределение однофазных нагрузок и возможность секционирования или реконфигурации сети [6; 7].

В отечественных и зарубежных исследованиях низковольтные распределительные сети рассматриваются как объект расчетного моделирования и вариантной оптимизации. Для сетей 0,4 кВ анализируются изменение профиля напряжения, расчет потерь, работа распределенной генерации, применение накопителей энергии и выбор мероприятий по восстановлению допустимого режима [8–10]. Эти результаты подтверждают необходимость прикладных алгоритмов, которые позволяют инженеру сопоставлять несколько вариантов решения, проверять ограничения по току и напряжению и использовать результаты расчета при проектировании или эксплуатационной оценке [11–13].

Цель исследования – разработать и апробировать автоматизированный расчетный алгоритм для определения параметров сельской линии электропередачи 0,4 кВ с учетом трансформатора 10/0,4 кВ и оценки применимости выбранного технического решения по условиям токовой нагрузки, допустимой потери напряжения и токов короткого замыкания.

Объект исследования – процесс функционирования трехфазной сельской линии электропередачи напряжением 0,4 кВ, питающей нагрузку сельскохозяйственного потребителя от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ.

Предмет исследования – расчетные зависимости рабочих токов, потерь напряжения и токов короткого замыкания от параметров трансформатора, проводника, длины линии и нагрузки, реализованные в автоматизированном алгоритме проверки допустимости режима.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: 1) сформировать расчетную схему сельской линии 0,4 кВ с учетом трансформатора 10/0,4 кВ, проводника и нагрузки объекта АПК; 2) разработать алгоритм расчета рабочего тока, реактивной мощности, потери напряжения и токов короткого замыкания; 3) реализовать алгоритм в виде программы с графическим интерфейсом и автоматическим формированием расчетного отчета; 4) выполнить серию расчетных экспериментов для разных длин, сечений проводника и вариантов реконструкции; 5) оценить трудоемкость ручного и автоматизированного расчета.

Научная новизна работы заключается в разработке расчетно-алгоритмической модели автоматизированной проверки сельской линии 0,4 кВ, в которой параметры трансформатора, проводника, длины линии и нагрузки учитываются совместно при оценке трех критериев: допустимой токовой нагрузки, потери напряжения и чувствительности защиты к однофазному короткому замыканию.

Практическая значимость заключается в возможности применения алгоритма при проектировании, реконструкции и эксплуатационной проверке низковольтных сельских сетей объектов АПК, а также при оперативном сравнении нескольких вариантов технического решения без многократного ручного пересчета.

Материалы и методы. В качестве расчетной схемы принята линия 0,4 кВ, отходящая - от комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ и питающая обобщенную нагрузку сельскохозяйственного объекта. Схема включает трансформатор, шины 0,4 кВ, питающий участок линии СИП-4, расчетную нагрузку и точки проверки трехфазного и однофазного короткого замыкания. Такая схема позволяет отдельно оценить влияние трансформатора и линии на токи короткого замыкания, что устраняет неопределенность, возникающую при использовании заранее заданных сопротивлений ΣZ и Zп без пояснения их происхождения (таблица 1).

Для апробации алгоритма принята нагрузка 51 кВт. Значение получено как расчетная установленная мощность типового смешанного сельскохозяйственного объекта: насосная установка – 15 кВт, вентиляция – 11 кВт, транспортирующее и кормоприготовительное оборудование – 7,5 кВт, вспомогательное технологическое оборудование – 11 кВт, освещение и однофазные приемники – 6,5 кВт. Коэффициент мощности cosφ = 0,92 принят как усредненное значение для смешанной электродвигательной нагрузки с частичной компенсацией реактивной мощности. Длина L = 450 м соответствует удаленному потребителю, питающемуся от комплектной трансформаторной подстанции (КТП) по радиальной линии. Расчетная длина 167,4 м используется как вариант сокращения низковольтного участка при приближении КТП или формировании нового центра питания.

Таблица 1 – Исходные данные для апробации расчетного алгоритма
Table 1 – Initial data for testing the computational algorithm

Показатель	Обозначение	Значение
Мощность трансформатора, кВА	Sт	250
Напряжение НН, кВ	Uнн	0,4
Напряжение короткого замыкания, %	uk	4,5
Потери короткого замыкания, кВт	ΔPk	3,7
Расчетная активная мощность, кВт	P	51
Линейное напряжение, В	U	380
Полная длина линии, м	L	450
Расчетная длина участка, м	l	167,4
Марка проводника	-	СИП-4 4×50 мм²
Коэффициент мощности	cosφ	0,92
Удельное активное сопротивление, Ом/км	Rк	0,822
Удельное индуктивное сопротивление, Ом/км	Xк	0,0782
Длительно-допустимый ток, А	Iдоп	195
Проектное ограничение потери напряжения, %	ΔUдоп%	8

Принятое ограничение потери напряжения 8 % является проектным, а не предельным нормативным значением. ГОСТ 32144-2013 допуска-

ет более широкий диапазон отклонения напряжения, однако в настоящей методике оставлен резерв около 2 % на падение напряжения в трансформаторе, внутренних сетях объекта, пусковые токи электродвигателей и сезонные колебания нагрузки [14]. Такой подход повышает надежность проектного решения для объектов АПК.

Сопротивление трансформатора включено в алгоритм расчета. Номинальный ток трансформатора, полное сопротивление, активная и реактивная составляющие определялись по формулам:

$$I_{ном.т} = \frac{S_m}{1{,}73 \times U_{нн}}, \quad (1)$$

$$Z_m = \left(\frac{u_k}{100}\right) \times \frac{U_{нн}^2}{S_m}, \quad (2)$$

$$R_m = \frac{\Delta P_k}{3 \times I_{ном.т}^2}, \quad (3)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (4)$$

При Sт = 250 кВА, Uнн = 0,4 кВ, uk = 4,5 % и ΔPk = 3,7 кВт получены: Iном.т = 361,3 А, Zт = 0,0288 Ом, Rт = 0,0094 Ом, Xт = 0,0272 Ом. Эти значения далее используются при расчете трехфазного и однофазного короткого замыкания [15–17].

Рабочий ток линии, реактивная мощность и потеря напряжения рассчитывались по формулам:

$$I_p = \frac{P}{1{,}73 \times U \times \cos\varphi}, \quad (5)$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}; \; tg\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}; \; Q = P \times tg\varphi, \quad (6)$$

$$\Delta U = 1{,}73 \times I_p \times l \times (R_k \times \cos\varphi + X_k \times \sin\varphi), \quad (7)$$

$$\Delta U\% = \left(\frac{\Delta U}{U}\right) \times 100. \quad (8)$$

Токи короткого замыкания определялись с учетом сопротивления трансформатора и линии:

$$Z_\Sigma = \sqrt{(R_m + R_k \times l)^2 + (X_m + X_k \times l)^2}. \quad (9)$$

$$I_{k3} = \frac{U_\ell}{1{,}73 \times Z_\Sigma}. \quad (10)$$

$$Z_n = \sqrt{(R_m + 2R_k \times l)^2 + (X_m + 2X_k \times l)^2}. \quad (11)$$

$$I_{k1} = \frac{U_ф}{Z_n}; \quad i_{уд} = 1{,}4 \times I_{k3} \times K_{уд}. \quad (12)$$

На рисунке 1 приведена структура автоматизированного расчетного алгоритма.

Для определения расчетной мощности по укрупненным или табличным зависимостям в алгоритм включена линейная интерполяция:

$$y = y_0 + \frac{(y_1 - y_0) \times (x - x_0)}{x_1 - x_0}; \; P_p = x \times y. \quad (13)$$

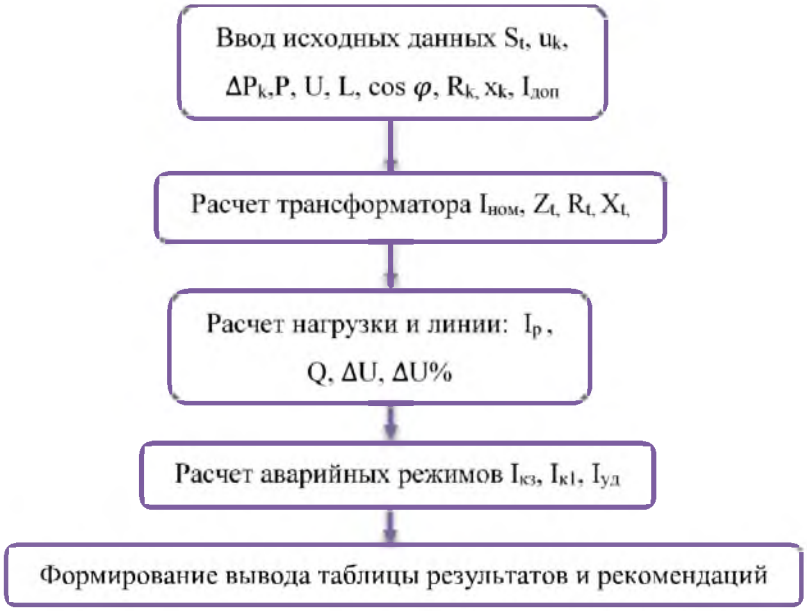

Рисунок 1 – Структура автоматизированного расчетного алгоритма
Figure 1 – The structure of the automated calculation algorithm

Программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотеки Tkinter. Графический интерфейс содержит поля ввода параметров трансформатора, линии и нагрузки, а также окно вывода расчетного отчета. Расчетный модуль выполняет последовательность операций: чтение исходных данных, расчет параметров трансформатора, расчет рабочего режима, проверку потери напряжения, расчет токов короткого замыкания и формирование рекомендаций [18; 19].

Фрагмент ключевого расчетного модуля представлен ниже (рисунок 2). В статье приведен не полный листинг программы, а та часть алгоритма, которая определяет основные выходные параметры и может быть воспроизведена при проверке результатов.

$$u_{kv} = \frac{u_v}{1000},$$

$$I_p = \frac{P_{kw}}{1{,}73 \times u_{kw} \times \cos\varphi},$$

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi},$$

$$Q = \frac{P_{kw} \times \sin\phi}{\cos\phi},$$

$$\Delta U = 1{,}73 \times I_p \times L_{km} \times (R_k \times \cos\phi + X_k \times \sin\phi,$$

$$Z_t = \left(\frac{u_k}{100}\right) \times \frac{U_n^2}{S_t},$$

$$R_t = \frac{P_k}{3 \times I_t^2},$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2},$$

$$Z_{loop} = \sqrt{(R_t + 2 \times R_k \times L_{km})^2 + (X_t + 2 \times X_k \times L_{km})^2},$$

$$I_{k1} = \frac{U_{\text{phase}}}{Z_{\text{loop}}}.$$

Результаты исследований и их обсуждение. При подстановке исходных данных в формулу (5) расчетный рабочий ток линии составил:

$$I_p = \frac{51}{1{,}73 \times 0{,}38 \times 0{,}92} = 84{,}22A. \quad (14)$$

Полученное значение меньше длительно-допустимого тока выбранного проводника СИП-4 4×50 мм²:

$$84{,}22 < 195; \qquad K_I = \frac{84{,}22}{195} = 0{,}432. \quad (15)$$

Следовательно, по условию нагрева выбранное сечение допустимо. Однако этот вывод явля-

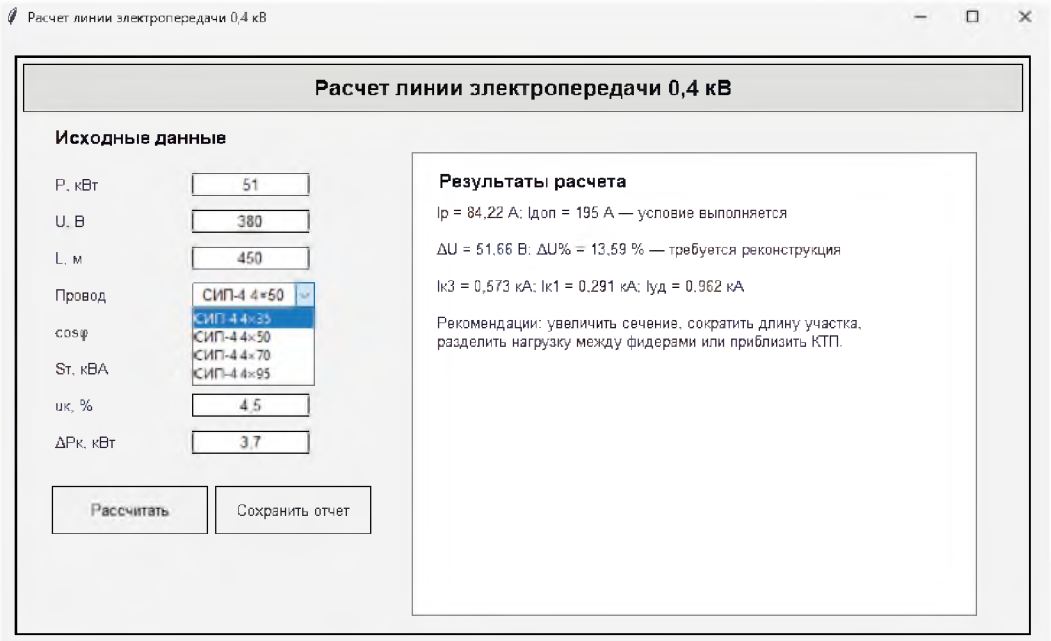

Рисунок 2 – Фрагмент интерфейса программы автоматизированного расчета линии 0,4 кВ
Figure 2 – Fragment of the interface of the 0.4 kV automated line calculation program

ется только первым этапом проверки, так как для протяженных линий 0,4 кВ определяющим ограничением часто становится потеря напряжения.

На рисунке 3 приведена зависимость потери напряжения от длины линии 0,4 кВ.

Для исходного коэффициента мощности cosφ = 0,92 получены sinφ = 0,392, tgφ = 0,426 и реактивная мощность Q = 21,73 квар. При расчетной длине 167,4 м потеря напряжения равна:

$$\Delta U_{167,4} = 1{,}73 \times 84{,}22 \times 0{,}1674 \times$$
$$\times (0{,}822 \times 0{,}92 + 0{,}0782 \times 0{,}392) = 19{,}21 B, \quad (16)$$

$$\Delta U_{167,4}\% = \frac{19{,}21}{380} \times 100 = 5{,}06\ \%. \quad (17)$$

При полной длине линии 450 м результат изменяется:

$$\Delta U_{450} = 1{,}73 \times 84{,}22 \times 0{,}45 \times$$
$$\times (0{,}822 \times 0{,}92 + 0{,}0782 \times 0{,}392) = 51{,}66 B, \quad (18)$$

$$\Delta U_{450}\% = \frac{51{,}66}{380} \times 100 = 13{,}59\ \%. \quad (19)$$

Таким образом, при длине 167,4 м линия удовлетворяет принятому проектному ограничению 8 %, а при длине 450 м – не удовлетворяет. Это подтверждает необходимость многовариантной расчетной проверки для различных конфигураций сельской сети 0,4 кВ.

С учетом параметров трансформатора получены следующие аварийные режимы для базового варианта длиной 450 м: ток трехфазного короткого замыкания Iк3 = 0,571 кА, ток однофазного короткого замыкания Iк1 = 0,291 кА, ударный ток Iуд = 0,960 кА. Для участка 167,4 м токи возрастают: Iк3 = 1,441 кА, Iк1 = 0,760 кА. Следовательно, сокращение длины низковольтного участка одновременно улучшает и качество напряжения, и условия чувствительности защитного аппарата.

Для подтверждения работоспособности программы выполнена серия расчетных экспериментов. Сравнивались варианты изменения сечения, сокращения длины участка, компенсации реактивной мощности и разделения нагрузки между двумя фидерами. Результаты приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что базовый вариант В2 с СИП-4 4×50 мм² при длине 450 м не проходит по потере напряжения. Увеличение сечения до 70 мм² снижает потерю до 9,54 %, но еще не обеспечивает выполнение ограничения 8 %. Сечение 95 мм² дает допустимую потерю напряжения 7,03 %, однако сопровождается ростом материалоемкости. Наиболее предпочтительным по комплексному показателю является вариант В5, при котором длина низковольтного участка сокращается до 167,4 м. Вариант В7, предусматривающий разделение нагрузки между двумя фидерами, также обеспечивает допустимое напряжение, но требует дополнительной проверки чувствительности защиты, так как длина линии и сопротивление петли «фаза-нуль» сохраняются.

Для оценки чувствительности защиты в расчетной серии принят требуемый минимальный ток однофазного короткого замыкания 0,40 кА. Если выбранный автоматический выключатель имеет другую характеристику, программа

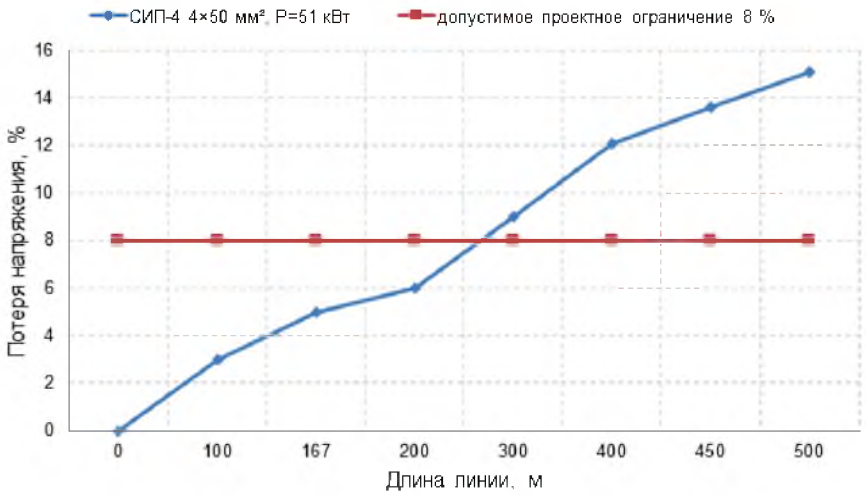

Рисунок 3 – Зависимость потери напряжения от длины линии 0,4 кВ
Figure 3 – Dependence of voltage loss on 0.4 kV line length

позволяет изменить этот параметр и повторить расчет. Это важно для сельских линий, где ток однофазного КЗ может оказаться значительно ниже трехфазного тока короткого замыкания.

Для проверки корректности программной реализации выполнено сопоставление результатов с ручным расчетом по тем же формулам и с независимой расчетной моделью эквивалентной R-X схемы трансформатора и линии. Расхождения обусловлены только округлением промежуточных величин.

Экономическая целесообразность автоматизированного расчета оценивалась по трудоемкости подготовки вариантных решений. При ручном расчете одного варианта инженер должен последовательно определить рабочий ток, реактивную мощность, потерю напряжения, сопротивления линии и трансформатора, токи короткого замыка-

Таблица 2 – Серия автоматизированных расчетов вариантов линии 0,4 кВ
Table 2 – A series of automated calculations for 0.4 kV line options

Вариант	Техническое решение	P, кВт	L, м	Iр, А	ΔU, %	Iк1, кА	F	Вывод
В1	СИП-4 4×35 мм²	51,00	450,0	84,22	14,34	0,276	1,267	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты
В2	СИП-4 4×50 мм²	51,00	450,0	84,22	13,59	0,291	1,195	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты
В3	СИП-4 4×70 мм²	51,00	450,0	84,22	9,54	0,416	0,886	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты
В4	СИП-4 4×95 мм²	51,00	450,0	84,22	7,03	0,563	0,700	допустимо
В5	СИП-4 4×50 мм², КТП ближе к нагрузке	51,00	167,4	84,22	5,06	0,760	0,572	допустимо
В6	СИП-4 4×50 мм², cosφ=0,98	51,00	450,0	79,16	13,32	0,291	1,184	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты
В7	СИП-4 4×50 мм², два фидера	25,50	450,0	42,16	6,80	0,291	0,826	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты
В8	СИП-4 4×50 мм², P=38,53 кВт	38,53	450,0	63,71	10,27	0,291	1,002	по напряжению допустимо, требуется проверка защиты

Таблица 3 – Контрольная проверка результатов автоматизированного расчета
Table 3 – Verification check of automated calculation results

Показатель	Ручной расчет	Программа Python	R-X модель	Расхождение, %
Iр, А	84,22	84,22	84,22	0,00
ΔU450, В	51,66	51,66	51,65	0,02
ΔU450, %	13,59	13,59	13,59	0,00
Iк1, кА	0,291	0,291	0,292	0,34
Iк3, кА	0,571	0,571	0,572	0,18

Таблица 4 – Контрольная проверка результатов автоматизированного расчета
Table 4 – Verification check of the automated calculation results

Операция	Ручной расчет	Автоматизированный расчет	Эффект
Один вариант линии	20-30 мин	1-2 мин	сокращение времени в 10–15 раз
Серия из 8 вариантов	2,5-4 ч	10-15 мин	быстрый выбор допустимого решения
Формирование отчета	20-30 мин	автоматически	снижение риска ошибок переноса
Повторный расчет при изменении исходных данных	15-20 мин	менее 1 мин	удобно при подборе сечения

ния и затем перенести результаты в таблицу. При сравнении 6–8 вариантов это приводит к повторению однотипных вычислений и повышает вероятность арифметических ошибок.

Полученные значения трудоемкости являются инженерной оценкой, однако они показывают практический смысл программной реализации: автоматизация не изменяет физическую сущность расчетных формул, но позволяет быстро выполнять многовариантную проверку и обосновывать технические мероприятия. Для объектов АПК это особенно важно при выборе между увеличением сечения проводника, переносом КТП, разделением нагрузки и компенсацией реактивной мощности.

Программа предназначена для предварительной инженерной оценки и не заменяет полный проектный расчет. При практическом применении необходимо уточнять паспортные данные трансформатора, фактические сопротивления проводников, условия прокладки, температуру окружающей среды, характеристики защитных аппаратов, схему заземления и распределение однофазных нагрузок по фазам. Дальнейшее развитие алгоритма целесообразно связать с расчетом несимметрии напряжений, учетом суточного графика нагрузки, подбором защитных аппаратов по времятоковым характеристикам и расчетом потерь электроэнергии за заданный период.

Заключение. Сформирована расчетная схема сельской линии 0,4 кВ с учетом трансформатора 10/0,4 кВ, проводника СИП-4, расчетной нагрузки и точек проверки трехфазного и однофазного короткого замыкания. В алгоритм добавлены параметры трансформатора: мощность, напряжение короткого замыкания и потери короткого замыкания.

Уточнены объект и предмет исследования, а также сформулированы задачи, связанные с разработкой алгоритма, программной реализацией и серией расчетных экспериментов. Научная новизна перенесена с автоматического формирования вывода на совместный учет трансформатора, линии и нагрузки при проверке токовой нагрузки, потери напряжения и чувствительности защиты.

Программная реализация выполнена на языке Python с графическим интерфейсом. В статье приведены схема расчетной модели, структура алгоритма, фрагмент интерфейса и фрагмент расчетного модуля, что подтверждает наличие автоматизированного расчета, а не только ручной подстановки формул.

Для базового варианта с СИП-4 4×50 мм² при нагрузке 51 кВт рабочий ток составил 84,22 А, что меньше длительно-допустимого тока 195 А. При расчетной длине 167,4 м потеря напряжения равна 5,06 %, а при длине 450 м – 13,59 %. Следовательно, по току линия допустима, но по качеству напряжения при полной длине требует реконструкции.

Серия расчетов показала, что увеличение сечения до 70 мм² снижает потерю напряжения до 9,54 %, но не обеспечивает проектное ограничение 8 %. Допустимый режим достигается при использовании СИП-4 4×95 мм², сокращении длины низковольтного участка до 167,4 м или разделении нагрузки между двумя фидерами.

Расчет токов короткого замыкания с учетом трансформатора показал, что для базового варианта длиной 450 м ток однофазного короткого замыкания составляет 0,291 кА, что требует отдельной проверки чувствительности защитного аппарата. Для участка 167,4 м ток Iк1 возрастает до 0,760 кА, что улучшает условия защитного отключения.

Сопоставление программного расчета с ручным расчетом и независимой R-X моделью показало расхождение не более 0,34 %, что подтверждает корректность расчетного алгоритма. Экономическая оценка показала сокращение трудоемкости серии расчетов с 2,5–4 часов до 10–15 минут, что подтверждает практическую целесообразность автоматизации для проектной и эксплуатационной работы в АПК.

Список источников

1. Стратегические подходы и методы отраслевого и территориального планирования аграрного сектора / Н.Г. Барышников [и др.] // Международный сельскохозяйственный журнал. 2025. № 1 (403). С. 90-94. DOI: 10.55186/25876740_2025_68_1_90. EDN: OSUWEL.

2. Интегральная оценка технологического развития пространст венно локализованных агросоциохозяйственных систем региона / Д.И. Жиляков [и др.] // Техника и оборудование для села. 2025. № 3 (333). С. 44-47. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-44-47. EDN: WDZEHK.

3. Виноградов А.В., Голиков И.О. Новый подход к математическому моделированию сельских электрических сетей 0,4 кВ с использованием метода фазных координат // Техника и оборудование для села. 2024. № 3 (321). С. 36-41. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-3-36-41. DN: SREJVO.

4. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ // Агроинженерия. 2024. Т. 26. № 6. С. 77-85. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN: AZEIQF.

5. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П., Кунгс Я.А. Учет допустимого времени отключения при выборе автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 25-30. EDN: KGBEHL.

6. Allocation of 0.4 kv ptl sectionalizing units under criteria of sensitivity limits and power supply reliability / A. Vinogradova [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. No. 24. DOI: 10.3390/app112411608. EDN: WPNTHG.

7. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 3 (56). С. 44-51. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI.

8. Виноградов А.В., Лансберг А.А. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. № 8 (326). С. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA.

9. Benesz M., Moskwa S. Impact of Prosumers' Operation on Selected Parameters of Low-Voltage Distribution Network Operation // Energies. 2024. Vol. 17. No. 8. P. 1872. DOI: 10.3390/en17081872. EDN: GGJYCM.

10. Korab R., Połomski M., Smołka M. Evaluating the Risk of Exceeding the Normal Operating Conditions of a Low-Voltage Distribution Network due to Photovoltaic Generation // Energies. 2022. Vol. 15. No. 6. P. 1969. DOI: 10.3390/en15061969. EDN: XBTORO.

11. Voltage Control Strategy for Low-Voltage Distribution Network with Distributed Energy Storage Participating in Regulation under Low-Carbon Background / L. Zhu [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 13. P. 9943. DOI: 10.3390/su15139943. EDN: FUOKZR.

12. Stochastic Approach for Increasing the PV Hosting Capacity of a Low-Voltage Distribution Network / J. Bendík [et al.] // Processes. 2023. Vol. 11. No. 1. P. 9. DOI: 10.3390/pr11010009. EDN: TQNGJP.

13. Mazur Ł., Kłosowski Z. A New Approach to the Use of Energy from Renewable Sources in Low-Voltage Power Distribution Networks // Energies. 2023. Vol. 16. No. 2. P. 727. DOI: 10.3390/en16020727. EDN: DDPYFP.

14. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

15. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: ЭНАС, 2022. 704 с.

16. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. № 4 (53). С. 22-29. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.

17. Псарев А.И., Виноградова А.В. Технико-экономическое обоснование применения секционирующих пунктов в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 3 (44). С. 65-74. EDN: QJADJW.

18. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Компьютерное моделирование режимов работы электрической сети 0,4 кВ с устройством сетевого секционирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2025. Т. 25. № 2. С. 5-16. DOI: 10.14529/power250201. EDN: BQXEFC.

19. Применение гибридной сети для оценки технического состояния силового трансформатора / Д.В. Куделина [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2025. № 6 (116). С. 110-118. DOI: 10.37670/2073-0853-2025-116-6-110-118. EDN: DVEYDX.

References

1. Baryshnikov N.G. [et al.] Strategicheskie podkhody i metody otraslevogo i territorial'nogo planirovaniya agrarnogo sektora [Strategic approaches and methods of sectoral and territorial planning of the agricultural sector]. *International Agricultural Journal*. 2025; 1(403): 90-94. DOI: 10.55186/25876740_2025_68_1_90. EDN: OSUWEL. (In Russ).

2. Zhilyakov D.I. [et al.] Strategicheskie podkhody i metody otraslevogo i territorial'nogo planirovaniya agrarnogo sektora [Integral assessment of technological development of spatially localized agro-socioeconomic systems of the region]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025; 3(333): 44-47. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-44-47. EDN: WDZEHK. (In Russ).

3. Vinogradov A.V., Golikov I.O. Novyi podkhod k matematicheskomu modelirovaniyu sel'skikh ehlektricheskikh setei 0,4 kV s ispol'zovaniem metoda faznykh koordinat [A new approach to mathematical modeling of 0.4 kV rural electrical networks using the phase coordinate method]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024; 3(321): 36-41. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-3-36-41. EDN: SREJVO. (In Russ).

4. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V., Bukreev A.V. Udel'nye pokazateli nadezhnosti ehlektricheskikh setei 0,4 kV [Specific reliability indicators of 0.4 kV electrical networks]. *Agricultural engineering*. 2024; 26(6): 77-85. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85. EDN: AZEIQF. (In Russ).

5. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P., Kungs Y.A. Uchet dopustimogo vremeni otklyucheniya pri vybore avtomaticheskikh vyklyuchatelei dlya zashchity sel'skikh ehlektricheskikh setei 0,4 kV [Taking into account the permissible tripping time when selecting circuit breakers for protecting 0.4 kV rural electrical networks]. *Promyshlennaya ehnergetika*. 2009; (2): 25-30. EDN: KGBEHL. (In Russ).

6. Vinogradova A. [et al.] Allocation of 0.4 kv ptl sectionalizing units under criteria of sensitivity limits and power supply reliability. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021; 11(24). DOI: 10.3390/app112411608. EDN: WPNTHG.

7. Vinogradova A.V., Vinogradov A.V. Analiz planovykh i avariinykh otklyuchenii v sel'skikh ehlektricheskikh setyakh 0,4 kV [Analysis of planned and emergency outages in rural 0.4 kV electrical networks]. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2024; 71(3-56): 44-51. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. EDN: VRFTOI. (In Russ).

8. Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Razrabotka fizicheskoi modeli sel'skoi ehlektricheskoi seti 0,4 kV [Development of a physical model of a 0.4 kV rural electrical network]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024; 8(326): 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA. (In Russ).

9. Benesz M., Moskwa S. Impact of Prosumers' Operation on Selected Parameters of Low-Voltage Distribution Network Operation. *Energies*. 2024; 17(8): 1872. DOI: 10.3390/en17081872. EDN: GGJYCM.

10. Korab R., Połomski M., Smołka M. Evaluating the Risk of Exceeding the Normal Operating Conditions of a Low-Voltage Distribution Network due to Photovoltaic Generation. *Energies*. 2022; 15(6): 1969. DOI: 10.3390/en15061969. EDN: XBTORO.

11. Zhu L. [et al.] Voltage Control Strategy for Low-Voltage Distribution Network with Distributed Energy Storage Participating in Regulation under Low-Carbon Background. *Sustainability*. 2023; 15(13): 9943. DOI: 10.3390/su15139943. EDN: FUOKZR.

12. Bendík J. [et al.] Stochastic Approach for Increasing the PV Hosting Capacity of a Low-Voltage Distribution Network. *Processes*. 2023; 11(1): 9. DOI: 10.3390/pr11010009. EDN: TQNGJP.

13. Mazur Ł., Kłosowski Z. A New Approach to the Use of Energy from Renewable Sources in Low-Voltage Power Distribution Networks. *Energies*. 2023; 16(2): 727. DOI: 10.3390/en16020727. EDN: DDPYFP.

14. GOST 32144-2013 Ehlektricheskaya ehnergiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoi ehnergii v sistemakh ehlektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electrical Energy Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems]. Moscow: Standartinform; 2014: 20. (In Russ).

15. Pravila ustroistva ehlektroustanovok [Electrical Installation Rules]. Moscow: EHNAS; 2022: 704. (In Russ).

16. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analiz konfiguratsii ehlektricheskikh setei 0,4 kV Orlovskoi oblasti [Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical networks in the Oryol region]. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2023; 70(4-53): 22-29. DOI: 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK. (In Russ).

17. Psarev A.I., Vinogradova A.V. Tekhniko-ehkonomicheskoe obosnovanie primeneniya sektsioniruyushchikh punktov v sel'skikh ehlektricheskikh setyakh 0,4 kV [Feasibility study for the use of sectionalizing points in 0.4 kV rural electrical networks]. *Agrotekhnika i ehnergoobespechenie*. 2024; 3(44): 65-74. EDN: QJADJW. (In Russ).

18. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Komp'yuternoe modelirovanie rezhimov raboty ehlektricheskoi seti 0,4 kV s ustroistvom setevogo sektsionirovaniya [Computer simulation of operating modes of a 0.4 kV electrical network with a network sectioning device]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ehnergetika*. 2025; 25(2): 5-16. DOI: 10.14529/power250201. EDN: BQXEFC. (In Russ).

19. Kudelina D.V. [et al.] Primenenie gibridnoi seti dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya silovogo transformatora [Application of a hybrid

network to assess the technical condition of a power transformer]. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025; 6(116): 110-118. DOI: 10.37670/2073-0853-2025-116-6-110-118. EDN: DVEYDX. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Кончин В.А. – концепция исследования; разработка расчетного алгоритма; программная реализация; написание исходного текста; итоговые выводы.

Серебровский В.И. – постановка расчетной задачи; анализ параметров трансформатора и линии; научное редактирование.

Ворначева И.В. – анализ диагностических аспектов электрооборудования; обработка результатов; корректировка выводов.

Меркулов А.А. – участие в расчетной проверке, подготовка таблиц и графических материалов.

AUTHOR CONTRIBUTION

Konchin, V.A. – research concept; development of a computational algorithm; software implementation; writing the original text; final conclusions.

Serebrovsky, V.I. – formulation of a computational problem; analysis of transformer and line parameters; scientific editing.

Vornacheva, I.V. – analysis of diagnostic aspects of electrical equipment; processing of results; correction of conclusions.

Merkulov, A.A. – participation in the calculation check, preparation of tables and graphic materials.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

В.А. Кончин – кандидат технических наук; AuthorID 1092271.

В.И. Серебровский – доктор технических наук, профессор; AuthorID 433918.

И.В. Ворначева – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 644741.

А.А. Меркулов – аспирант; AuthorID 1312449.

Information about the authors

V.A. Konchin – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 1092271.

V.I. Serebrovsky – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 433918.

I.V. Vornacheva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID 644741.

A.A. Merkulov – Postgraduate Student; AuthorID 1312449.

Статья поступила в редакцию 31.05.2026; одобрена после рецензирования 20.06.2026; принята к публикации 16.09.2026.

The article was submitted 31.05.2026; approved after reviewing 20.06.2026; accepted for publication 16.09.2026.