УДК 621.311.1:631.171:004.42

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-265-11-86-96

В.А. Кончин, В.И. Серебровский, И.В. Ворначева, А.А. Меркулов
V.A. Konchin, V.I. Serebrovskiy, I.V. Vornacheva, A.A. Merkulov

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕЛЬСКИХ СЕТЯХ 0,4 КВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АПК

AUTOMATED ASSESSMENT OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN 0.4 KV RURAL NETWORKS TO IMPROVE POWER SUPPLY RELIABILITY OF AGRICULTURAL FACILITIES

Ключевые слова: *надежность электроснабжения, эксплуатация электрооборудования, электрическая сеть, электроснабжение АПК, короткое замыкание, петля фаза-ноль, трансформатор 10/0,4 кВ, защитная аппаратура.*

Предложена уточненная расчетно-программная методика оценки токов короткого замыкания в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Методика ориентирована на протяженные линии объектов агропромышленного комплекса и отличается раздельным учетом сопротивлений фазного и нулевого проводников, сопротивления петли «фаза-ноль», переходного сопротивления в месте повреждения, а также влияния погрешностей исходных данных на конечные значения токов. Программная реализация выполнена на языке Python и включает расчет параметров трансформатора 10/0,4 кВ, сопротивлений линии, тока трехфазного короткого замыкания, ударного тока и тока однофазного короткого замыкания. Верификация проведена для 3 расчетных вариантов с трансформаторами мощностью 100, 250 и 630 кВ·А, различной длиной линий и сечением проводников. Для контрольного варианта с трансформатором 250 кВ·А и линией 0,300 км получены следующие значения: ток трехфазного короткого замыкания – 0,890 кА, ударный ток – 1,511 кА, ток однофазного короткого замыкания – 0,368 кА. Установлено, что учет переходного сопротивления 0,0001 кОм снижает расчетный ток однофазного короткого замыкания – до 0,318 кА, то есть на 13,7%. Параметрический анализ показал, что при увеличении длины линии с 0,050 до 0,500 км ток однофазного короткого замыкания уменьшается с 1,208 до 0,237 кА. Разработанный алгоритм может применяться при проектировании, реконструкции и эксплуатационной проверке сетей электроснабжения объектов АПК.

Keywords: *power supply reliability, electrical equipment operation, electrical network, agricultural power supply, short circuit, phase-zero loop, 10/0.4 kV transformer, protective equipment.*

An improved computational software method for assessing short-circuit currents in 0.4 kV rural electric networks is proposed. The method is focused on extended lines supplying agricultural facilities and differs from a standard tabular calculation by separate consideration of phase and neutral conductor resistances, the phase-to-neutral loop impedance, fault contact resistance and the influence of input-data uncertainty on the final current values. The software implementation was developed in Python and included calculation of 10/0.4 kV transformer parameters, line impedances, three-phase short-circuit current, peak current and single-phase short-circuit current. Verification was carried out for three network variants with 100, 250 and 630 kV·A transformers, different line lengths and conductor cross-sections. For the reference variant with a 250 kV·A transformer and a 0.300 km line, the obtained values were: three-phase short-circuit current 0.890 kA, peak current 1.511 kA and single-phase short-circuit current 0.368 kA. It was found that a contact resistance of 0.0001 kOhm reduced the calculated single-phase short-circuit current to 0.318 kA, i.e. by 13.7 %. The parametric analysis showed that when the line length increased from 0.050 to 0.500 km, the single-phase short-circuit current decreased from 1.208 to 0.237 kA. The developed algorithm may be used for design, reconstruction and operational assessment of power supply networks for agricultural facilities.

Кончин Владимир Алексеевич, к.т.н., доцент, Курский ГАУ, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: konchin98@mail.ru.
Серебровский Владимир Исаевич, д.т.н., профессор, Курский ГАУ, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: svi.doc@yandex.ru.

Konchin Vladimir Alekseevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Kursk State Agricultural University, Kursk, Russian Federation, e-mail: konchin98@mail.ru.
Serebrovskiy Vladimir Isaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kursk State Agricultural University, Kursk, Russian Federation, e-mail: svi.doc@yandex.ru.

Ворначева Ирина Валерьевна, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vornairina2008@yandex.ru.
Меркулов Александр Александрович, аспирант, Курский ГАУ, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: merkurial046@mail.ru.

Vornacheva Irina Valerevna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vornairina2008@yandex.ru.
Merkulov Aleksandr Aleksandrovich, post-graduate student, Kursk State Agricultural University, Kursk, Russian Federation, e-mail: merkurial046@mail.ru.

Введение

Надежность электроснабжения объектов агропромышленного комплекса определяется не только установленной мощностью трансформаторных подстанций, но и фактическим состоянием распределительных линий 0,4 кВ. От таких линий питаются электроприводы технологических линий, насосные установки, вентиляционное оборудование животноводческих помещений, зерносушильные агрегаты, холодильные установки, системы освещения, автоматизированные устройства кормления и водоснабжения. По данным исследований надежности сельских сетей аварийные и плановые отключения в линиях 0,4 кВ остаются одним из факторов, влияющих на непрерывность технологических процессов АПК [1-3].

Одним из обязательных этапов проектирования и эксплуатационной проверки низковольтных сетей является расчет токов короткого замыкания. Максимальный ток короткого замыкания используется для проверки отключающей способности аппаратов, термической и электродинамической стойкости элементов сети, а минимальный ток, как правило, однофазный, в наиболее удаленной точке линии необходим для оценки чувствительности защитных аппаратов и выполнения условия автоматического отключения поврежденного участка [4-6].

В современных условиях эксплуатация электрооборудования объектов агропромышленного комплекса все чаще связывается с цифровым контролем технического состояния, автоматизированной обработкой измерительных данных и применением интеллектуальных алгоритмов. В работе Д.В. Куделиной, А.И. Кузьмичева, К.Р. Танцюры и соавторов показана возможность применения гибридной сети для оценки технического состояния силового трансформатора [7]. Близкое направление исследований представлено И.В. Ворначевой, О.М. Лариным, Н.В. Фастовой и соавторами, где результаты хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле, сопоставлены при использовании различных методов с применением искусственного интеллекта [8]. Эти работы показывают, что для задач эксплуатации электрооборудования АПК востребованы не только диагностические модели, но и воспроизводимые расчетные инструменты для анализа режимов сети.

Для низковольтных сельских сетей расчет токов короткого замыкания имеет особенности, связанные с большой долей активного сопротивления линии. В отличие от компактных промышленных сетей, отходящие линии сельских объектов могут иметь протяженность в сотни метров, различные сечения фазных и нулевых проводников, смешанное исполнение участков и неодинаковый срок эксплуатации. При удаленном повреждении сопротивление линии становится соизмеримым с сопротивлением трансформатора, а ток однофазного короткого замыкания заметно снижается. Аналогичная проблема отмечается в работах по моделированию установившихся режимов однофазных коротких замыканий в сетях 0,4 кВ [9, 10].

Научная задача работы состоит не в повторении известной нормативной формулы, а в построении расчетного алгоритма, который объединяет параметры трансформатора, фазного и нулевого проводников, переходного сопротивления в месте повреждения и анализ чувствительности результата к исходным данным. Такой алгоритм позволяет перейти от единичного табличного расчета к серии сопоставимых расчетных сценариев, что важно при реконструкции сельских сетей и настройке защитных устройств [11, 12].

Цель исследования – разработать и проверить уточненную расчетно-программную методику определения токов трехфазного и однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ, отличающуюся раздельным учетом фазного и нулевого проводников, возможностью задания переходного сопротивления в месте повреждения и оценкой влияния неопределенности исходных данных на расчетный ток.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

проанализировать применимость существующих расчетных подходов для протяженных сетей 0,4 кВ;

сформировать расчетную схему сети с учетом петли «фаза-ноль»;

реализовать алгоритм вычисления сопротивлений трансформатора и линии;

выполнить расчет токов короткого замыкания для нескольких вариантов сети;

оценить влияние переходного сопротивления и погрешностей исходных данных;

сопоставить трудоемкость программного и ручного расчета.

Отличие предложенной методики состоит в том, что расчет петли «фаза-ноль» включен в единый программный алгоритм вместе с расчетом параметров трансформатора, трехфазного короткого замыкания, ударного тока, переходного сопротивления и вариантной проверкой по нескольким значениям длины, сечения и материала проводников. В результате формируется не единичное расчетное значение, а набор сопоставимых сценариев, пригодных для инженерного выбора решений при реконструкции сети.

При проверке минимального тока однофазного короткого замыкания в конце линии более прикладным является расчет по сопротивлению петли «фаза-ноль». Такой подход не исключает метод симметричных составляющих, а конкретизирует его для эксплуатационной задачи низкого напряжения: вместо обобщенных сопротивлений последовательностей используются физически задаваемые сопротивления фазного и нулевого проводников. Это позволяет оценить именно тот ток, который определяет чувствительность автоматического выключателя или плавкой вставки в удаленной точке сети.

Для расчета несимметричных коротких замыканий в электроэнергетике традиционно применяется метод симметричных составляющих. Его преимущество состоит в универсальности: несимметричный режим представляется через системы прямой, обратной и нулевой последовательностей, что удобно при анализе сетей среднего и высокого напряжения. Однако для низковольтных сельских сетей 0,4 кВ применение этого подхода ограничивается доступностью исходных данных. Для реальных линий часто отсутствуют достоверные параметры нулевой последовательности, а сопротивление PEN- или нулевого проводника зависит от материала, сечения, фактической длины, качества соединений и состояния контактных участков.

Объекты и методы

Объектом исследования является участок сельской электрической сети 0,4 кВ, питаемый от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ. Расчетная схема включает трансформатор, одну или несколько питающих линий и расчетную точку короткого замыкания в конце линии. Такой вариант соответствует распространенной радиальной схеме электроснабжения производственных и вспомогательных объектов сельскохозяйственного назначения, а также расчетным схемам, применяемым при моделировании аварийных режимов в сельских сетях 0,4 кВ [9-12].

Методика расчета основана на определении сопротивлений элементов сети, приведенных к стороне низшего напряжения трансформатора. Для трансформатора учитываются номинальная мощность $S_{\text{н}}$, В·А; напряжение низшей стороны $U_{\text{нн}}$, кВ; напряжение короткого замыкания u_k, %; потери короткого замыкания P_k, кВт; справочное сопротивление $Z_{\text{т}}/3$, кОм, используемое при расчете однофазного короткого замыкания. Для линии учитываются длина L, км; удельное электрическое сопротивление проводников ρ, Ом·м; площадь поперечного сечения фазного и нулевого проводников $S_{\text{ф}}$ и S_0, м²; удельное индуктивное сопротивление x_0, Ом/м; количество параллельных кабелей n. Принятая последовательность вычислений соответствует нормативной логике расчета токов короткого замыкания и проверке защит низковольтных электроустановок [4-6].

Примечание к единицам измерения. В расчетных выражениях (1)-(11) все величины предварительно приводятся к единицам СИ: напряжение – В, мощность – В·А и Вт, ток – А, сопротивление – Ом, длина – м, площадь поперечного сечения – м², удельное электрическое сопротивление – Ом·м, удельное индуктивное сопротивление – Ом/м. В тексте и таблицах для компактного представления допускается использование кратных и дольных единиц СИ (кВ, кВ·А, кВт, кОм, кА, км, мм²); перед подстановкой в формулы выполняется перевод в базовые единицы СИ:

$$Z_{т} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{нн}^2}{S_{н}}, \quad (1)$$

$$R_{т} = P_k \cdot \frac{U_{нн}^2}{S_{н}^2}, \quad (2)$$

$$X_{т} = \sqrt{Z_{т}^2 - R_{т}^2}. \quad (3)$$

Активное сопротивление проводника определяется по удельному сопротивлению материала:

$$R_l = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м;

L – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения проводника, м².

Индуктивное сопротивление участка определяется по выражению:

$$X_l = x_0 \cdot L, \quad (5)$$

где x_0 – удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/м.

Для трехфазного короткого замыкания учитывается сопротивление трансформатора и фазного проводника:

$$R_{\Sigma} = R_{т} + \sum R_{\phi}; X_{\Sigma} = X_{т} + \sum X_{\phi}; \quad Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad (6)$$

$$I_{k3} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \quad (7)$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{k3}. \quad (8)$$

При однофазном коротком замыкании расчет выполняется по сопротивлению петли «фаза-ноль»:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_{\phi} + R_0)^2 + (X_{\phi} + X_0)^2}, \quad (9)$$

$$I_{k1} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi-н} + Z_{т}/3}. \quad (10)$$

Такое дополнение необходимо для эксплуатационной оценки, поскольку фактическое повреждение в сети 0,4 кВ не всегда является идеальным металлическим контактом:

$$I_{k1}(R_{п}) = \frac{U_{\phi}}{\left(\frac{Z_{т}}{3} + \sqrt{(R_{\phi} + R_0 + R_{п})^2 + (X_{\phi} + X_0)^2}\right)}, \quad (11)$$

где $R_{п}$ – переходное сопротивление в месте повреждения, Ом.

При $R_{п} = 0$ выражение (11) соответствует расчету однофазного короткого замыкания. При увеличении $R_{п}$ расчетный ток I_{k1} уменьшается, поэтому учет данного параметра особенно важен при эксплуатационной проверке чувствительности защитных аппаратов в удаленных точках сельских сетей 0,4 кВ.

Алгоритм реализован в виде программы на языке Python (рис. 1). В программе предусмотрены справочники удельных сопротивлений проводников, справочные значения сопротивления трансформаторов, проверка корректности исходных данных, расчет сопротивлений, учет переходного сопротивления и формирование текстового отчета. Общая структура расчетно-программной методики представлена на рисунке 2.

Экспериментальная часть

Для проверки программы использован контрольный пример сельской сети 0,4 кВ. В качестве источника принят трансформатор мощностью 250 кВ. А с напряжением низшей стороны 0,4 кВ. Напряжение короткого замыкания составляет 4,5%, потери короткого замыкания – 3,7 кВт, справочное значение $Z_{т/3}$ – 0,000104 кОм. Линия выполнена проводниками сечением 50 мм², длина расчетного участка составляет 0,300 км. В расчетах использованы приведенные к единицам СИ значения: для фазного проводника $\rho_{ф} = 4{,}1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, для нулевого проводника $\rho_0 = 4{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $L = 300$ м; $S_{ф} = S_0 = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ м²; $x_0 = 6{,}0 \cdot 10^{-5}$ Ом/м. Использование трансформатора 250 кВ·А и протяженной линии 0,4 кВ соответствует типовым расчетным условиям, применяемым в работах по моделированию аварийных режимов сельских низковольтных сетей [9-11].

Исходные данные контрольного расчета приведены в таблице 1. Они отражают типовой случай, при котором ток однофазного короткого замыкания определяется не только параметрами трансформатора, но и сопротивлением протяженной низковольтной линии. При этом проверка однофазных, двухфазных и несимметричных аварийных режимов рассматривается в современных исследованиях как важное условие повышения защищенности сельских сетей 0,4 кВ [10-12].

Программная реализация выполнена по модульному принципу. Первый модуль задает паспортные параметры трансформатора и вычисляет его активную, индуктивную и полную составляющие сопротивления. Второй модуль описывает участок линии и рассчитывает сопро-

тивления фазного и нулевого проводников. Третий модуль формирует суммарные сопротивления и определяет I_{k3}, $i_{уд}$ и I_{k1}. Такое построение позволяет изменять число расчетных участков, задавать разные материалы проводников, учитывать параллельную прокладку кабелей, переходное сопротивление в месте повреждения и повторять расчет для различных вариантов реконструкции сети.

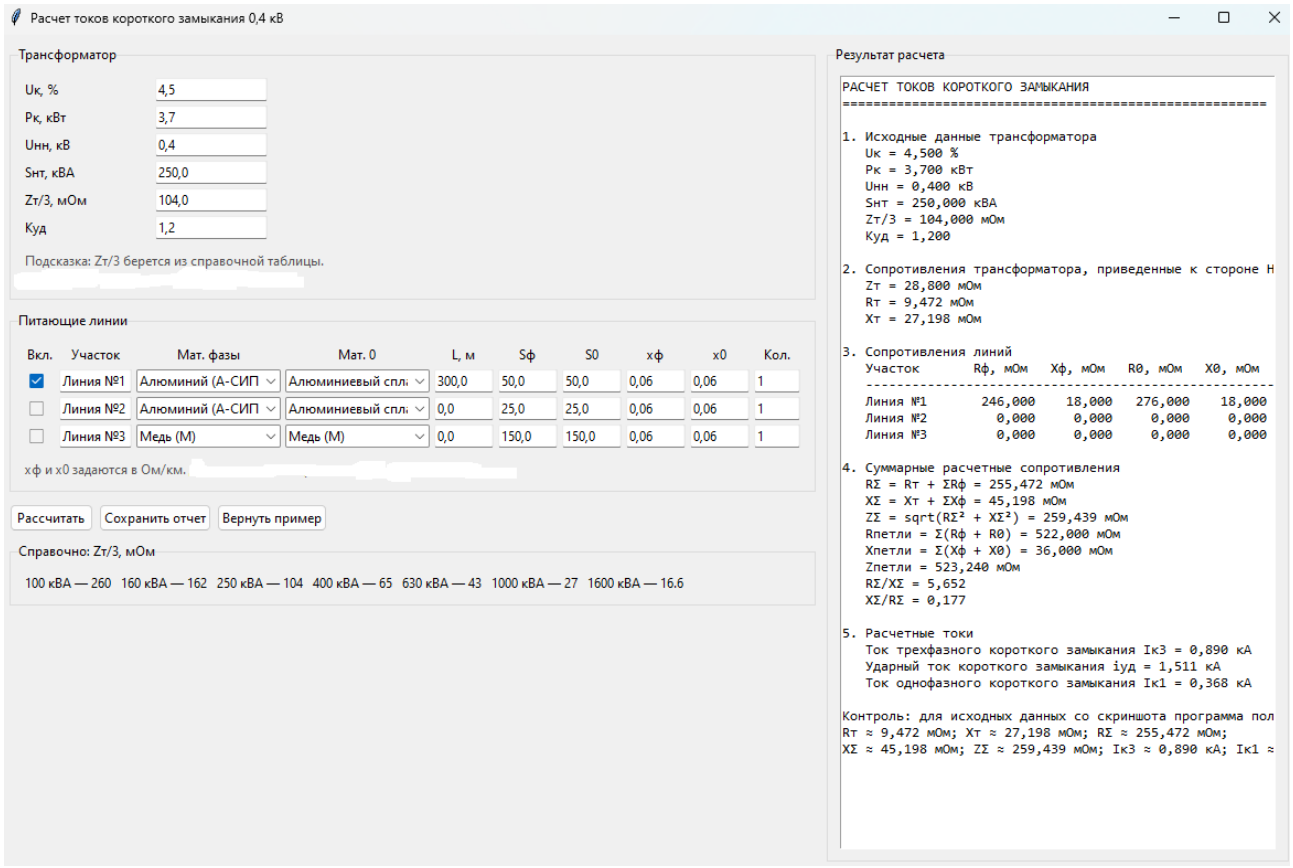

Рис. 1. Программный модуль «Расчет токов короткого замыкания 0,4 кВ»

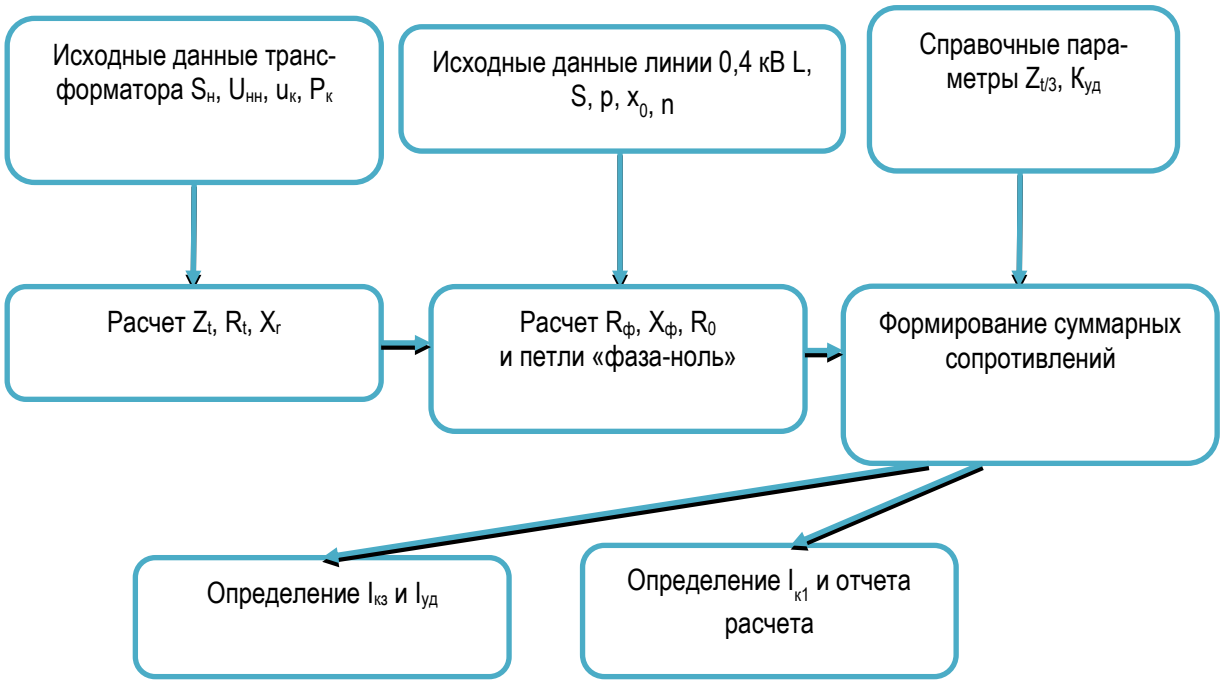

Рис. 2. Структура расчетно-программной методики определения токов короткого замыкания

Таблица 1

Исходные данные контрольного расчета

Параметр	Обозначение	Значение
Номинальная мощность трансформатора, В·А	$S_н$	$2{,}50 \cdot 10^5$
Напряжение низшей стороны, В	$U_{нн}$	400
Напряжение короткого замыкания, %	u_k	4,5
Потери короткого замыкания, Вт	P_k	3700
Справочное сопротивление трансформатора, Ом	$Z_{т/3}$	0,104
Длина линии, м	L	300
Площадь поперечного сечения фазного и нулевого проводников, м²	$S_ф$; S_0	$5{,}0 \cdot 10^{-5}$; $5{,}0 \cdot 10^{-5}$
Удельное электрическое сопротивление фазного проводника, Ом·м	$\rho_ф$	$4{,}1 \cdot 10^{-8}$
Удельное электрическое сопротивление нулевого проводника, Ом·м	ρ_0	$4{,}6 \cdot 10^{-8}$
Удельное индуктивное сопротивление, Ом/м	x_0	$6{,}0 \cdot 10^{-5}$

Результаты исследований и их обсуждение

Расчет для принятого трансформатора дал полное сопротивление $Z_т$ = $2{,}8800 \cdot 10^{-5}$ кОм. Его активная составляющая равна $R_т$ = $9{,}4720 \cdot 10^{-6}$ кОм, а индуктивная составляющая $X_т$ = $2{,}7198 \cdot 10^{-5}$ кОм. Для линии длиной 0,300 км при сечении фазного проводника 50 мм² получены R_ϕ = $2{,}46000 \cdot 10^{-4}$ кОм и X_ϕ = $1{,}8000 \cdot 10^{-5}$ кОм. Нулевой проводник при тех же геометрических параметрах имеет большее активное сопротивление: R_0 = $2{,}76000 \cdot 10^{-4}$ кОм; его индуктивное сопротивление принято равным x_0 = $1{,}8000 \cdot 10^{-5}$ кОм.

Суммарное активное сопротивление до точки трехфазного короткого замыкания составило $2{,}55472 \cdot 10^{-4}$ кОм, суммарное индуктивное сопротивление – $4{,}5198 \cdot 10^{-5}$ кОм. Полное расчетное сопротивление Z_Σ равно $2{,}59439 \cdot 10^{-4}$ кОм. Расчетный ток трехфазного короткого замыкания составил 0,890 кА, ударный ток – 1,511 кА. Сопротивление петли «фаза-ноль» достигло $5{,}23240 \cdot 10^{-4}$ кОм, а ток однофазного короткого замыкания – 0,368 кА. Основные результаты приведены в таблице 2.

Для расширенной верификации алгоритма расчет выполнен не только для контрольного трансформатора мощностью 250 кВ·А, но и для вариантов с трансформаторами 100 и 630 кВ·А. В каждом варианте использовались разные длины линий и сечения проводников. Контрольное сопоставление выполнялось с независимым табличным пересчетом по тем же расчетным выражениям; расхождение между программным и контрольным расчетом не превышало 0,2%, что связано с округлением промежуточных сопротивлений.

Расширенная проверка показала, что алгоритм корректно работает в разных диапазонах мощности трансформатора и сопротивления линии. При этом увеличение мощности трансформатора не всегда приводит к росту минимального однофазного тока: итоговое значение определяется совместным влиянием сопротивления трансформатора, длины линии и сопротивления нулевого проводника.

Таблица 2

Результаты контрольного расчета для линии длиной 0,300 км

Расчетный показатель	Значение
Полное сопротивление трансформатора $Z_т$, кОм	$2{,}8800 \cdot 10^{-5}$
Активное сопротивление трансформатора $R_т$, кОм	$9{,}4720 \cdot 10^{-6}$
Индуктивное сопротивление трансформатора $X_т$, кОм	$2{,}7198 \cdot 10^{-5}$
Активное сопротивление фазного проводника $R_ф$, кОм	$2{,}46000 \cdot 10^{-4}$
Активное сопротивление нулевого проводника R_0, кОм	$2{,}76000 \cdot 10^{-4}$
Суммарное сопротивление Z_Σ, кОм	$2{,}59439 \cdot 10^{-4}$
Сопротивление петли «фаза-ноль» $Z_{ф\text{-}н}$, кОм	$5{,}23240 \cdot 10^{-4}$
Ток трехфазного короткого замыкания $I_{к3}$, кА	0,890
Ударный ток $i_{уд}$, кА	1,511
Ток однофазного короткого замыкания $I_{к1}$, кА	0,368

Таблица 3

Верификация программы на расчетных вариантах сети 0,4 кВ

Вариант	$S_н$, кВ·А	L, км	$S_ф/S_0$, мм²	Материал проводников	I_{k3}, кА	I_{k1}, кА
1	100	0,200	25/25	А-СИП / АС-СИ	0,628	0,241
2	250	0,300	50/50	А-СИП / АС-СИ	0,890	0,368
3	630	0,400	70/70	Al / Al	1,090	0,505

Для оценки чувствительности расчетных токов к изменению протяженности линии выполнен параметрический расчет при длине участка от 0,050 до 0,500 км. Сечение проводников, материал и параметры трансформатора оставались неизменными. Результаты приведены в таблице 4 и на рисунке 3.

Результаты, приведенные в таблице 4, показывают устойчивое снижение расчетных токов по мере удаления точки повреждения от трансформаторной подстанции. При росте длины участка с 0,050 до 0,500 км ток трехфазного короткого замыкания уменьшился с 3,926 до 0,546 кА. Однофазный ток за тот же интервал снизился с 1,208 до 0,237 кА. Для практической проверки защиты важна не только кратность снижения, но и абсолютный уровень тока: на дальнем конце линии именно однофазное повреждение становится расчетно неблагоприятным режимом. Такой характер зависимости согласуется с результатами исследований, посвященных моделированию однофазных коротких замыканий в сельских сетях 0,4 кВ [9, 10].

Таблица 4

Влияние длины линии на расчетные токи короткого замыкания

Длина линии, км	$Z_Σ$, кОм	$Z_{ф-н}$, кОм	I_{k3}, кА	I_{k1}, кА
0,050	$5,8816·10^{-5}$	$8,7207·10^{-5}$	3,926	1,208
0,100	$9,7310·10^{-5}$	$1,74413·10^{-4}$	2,373	0,829
0,150	$1,37328·10^{-4}$	$2,61620·10^{-4}$	1,682	0,632
0,200	$1,77845·10^{-4}$	$3,48827·10^{-4}$	1,299	0,510
0,250	$2,18584·10^{-4}$	$4,36033·10^{-4}$	1,057	0,428
0,300	$2,59439·10^{-4}$	$5,23240·10^{-4}$	0,890	0,368
0,350	$3,00364·10^{-4}$	$6,10447·10^{-4}$	0,769	0,323
0,400	$3,41334·10^{-4}$	$6,97653·10^{-4}$	0,677	0,288
0,450	$3,82333·10^{-4}$	$7,84860·10^{-4}$	0,604	0,260
0,500	$4,23354·10^{-4}$	$8,72067·10^{-4}$	0,546	0,237

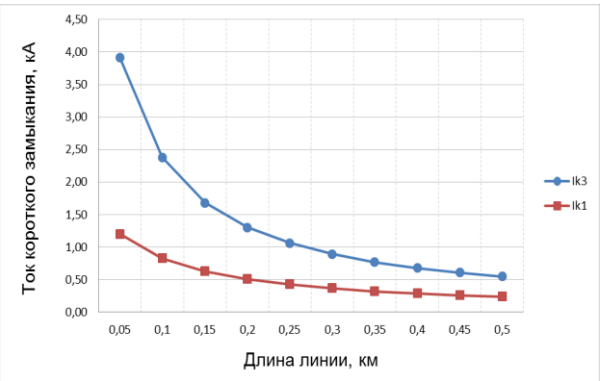

Рис. 3. Диаграмма изменения токов трехфазного и однофазного короткого замыкания при увеличении длины линии

Полученная зависимость объясняется преобладанием активного сопротивления проводников в низковольтной линии. В контрольном варианте при длине 0,300 км активное сопротивление фазного проводника равно $2,46000·10^{-4}$ кОм, тогда как его индуктивная составляющая – $1,8000·10^{-5}$ кОм. Изменение сечения проводника, выбор материала и уменьшение длины отходящей линии отражаются не только на падении напряжения в нормальном режиме, но и на способности защитного аппарата отключить удаленное повреждение за допустимое время.

Дополнительно выполнена оценка влияния переходного сопротивления в месте однофазного повреждения. Для базового варианта с линией 0,300 км расчет металлического замыкания дает I_{k1} = 0,368 кА. При наличии переходного сопротивления в контакте ток заметно уменьша-

ется, что ухудшает условия срабатывания защитной аппаратуры.

Расчет показывает, что переходное сопротивление 0,0001 кОм снижает ток однофазного короткого замыкания на 13,7%, а сопротивление 0,0002 кОм – на 24,1%. Следовательно, расчет только металлического замыкания дает верхнюю оценку тока. При эксплуатационной проверке удаленных участков сети целесообразно рассматривать дополнительный сценарий с переходным сопротивлением, особенно для контактных соединений, воздушных вводов и старых участков линии.

Таблица 5

Влияние переходного сопротивления в месте повреждения на ток однофазного короткого замыкания

$R_п$, кОм	$Z_{ф-н}(R_п)$, кОм	I_{k1}, кА	Снижение I_{k1}, %
0	$5{,}23240 \cdot 10^{-4}$	0,368	0
$5{,}0 \cdot 10^{-5}$	$5{,}73132 \cdot 10^{-4}$	0,341	7,4
$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$6{,}23041 \cdot 10^{-4}$	0,318	13,7
$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$7{,}22897 \cdot 10^{-4}$	0,279	24,1

Таблица 6

Оценка влияния погрешностей исходных данных на расчетные токи в базовом варианте

Изменяемый параметр	Возмущение, %	I_{k3}, кА	I_{k1}, кА	Изменение I_{k1}, %
Длина линии L	+10	0,813	0,340	-7,7
Длина линии L	-10	0,983	0,402	+9,1
Удельное сопротивление проводников	+10	0,814	0,340	-7,7
Удельное сопротивление проводников	-10	0,982	0,402	+9,1
Сечение проводников	-10	0,806	0,337	-8,4
Сечение проводников	+10	0,973	0,398	+8,2
Потери КЗ трансформатора P_k	+10	0,887	0,368	0,0
Напряжение КЗ трансформатора u_k	+5	0,889	0,368	0,0

Наиболее чувствительными входными параметрами для удаленной точки являются длина линии, удельное активное сопротивление и сечение проводников. Изменение каждого из этих параметров на 10% меняет I_{k1} примерно на 7,7-9,1%. Влияние паспортных параметров трансформатора на однофазный ток в рассматриваемой удаленной точке значительно меньше, поскольку в суммарном сопротивлении преобладает петля линии. Удельное сопротивление грунта в принятой расчетной схеме TN-C непосредственно не используется; его влияние может быть учтено через переходное или добавочное сопротивление при анализе повреждений с участием земли и повторных заземлений.

Полученные результаты подтверждают, что оценку режимов короткого замыкания в сетях 0,4 кВ объектов АПК нельзя ограничивать расчетом тока на шинах трансформаторной подстанции. Для корректной проверки защиты необходимо анализировать удаленные точки линии, учитывать фактический материал проводников, сечение нулевого проводника и сопротивление петли «фаза-ноль». Это особенно важно для реконструируемых линий, где часть участков может быть выполнена проводниками разных марок и с разным сроком эксплуатации. Связь между параметрами низковольтных линий, надежностью электроснабжения и аварийностью сельских сетей подтверждается статистическими и расчетными исследованиями последних лет [4-6, 11].

Научно-практический результат работы заключается в уточнении расчетной процедуры для сельских сетей 0,4 кВ: минимальный ток однофазного короткого замыкания рассматривается не как производная от мощности трансформатора, а как функция сопротивления фазного проводника, нулевого проводника, переходного сопротивления и длины линии. Расчет показал, что при допущении одинакового сопротивления фазного и нулевого проводников ток Ik1 для контрольного варианта завышается примерно на 5,0%, а при добавлении переходного сопротивления 0,0001 кОм снижается еще на 13,7%. Эти значения достаточны для того, чтобы повлиять на вывод о чувствительности защиты в удаленной точке сети.

Оценка технико-экономической эффективности. Оценка трудоемкости показывает преимущество программной реализации при вариантных расчетах. При ручном расчете одного варианта сети с заполнением таблиц сопротивлений и пересчетом токов требуется около 1,5-2,1 кс. В программе один вариант с формированием отчета занимает 0,12-0,24 кс. Для серии из 10 вариантов сокращение трудоемкости составляет приблизительно 14,4-18,0 кс инженерного времени. При условной стоимости инженерного часа 0,7 тыс. руб. прямой эффект только за счет снижения трудоемкости составляет около 2,8-3,5 тыс. руб. на один расчетный набор. Более существенный эффект связан с уменьшением риска ошибочного выбора защитного аппарата: при недооценке сопротивления петли «фаза-ноль» возможно несрабатывание защиты в удаленной точке, что приводит к простою электроприводов, насосных или вентиляционных установок объекта АПК.

Таблица 7

Оценочное сравнение трудоемкости ручного и программного расчета

Показатель	Ручной расчет	Программный расчет
Время на 1 вариант	1,5-2,1 кс	0,12-0,24 кс
Время на 10 вариантов	15,12-20,88 кс	1,08-2,52 кс
Снижение трудоемкости	-	Около 85-90%
Формирование отчета	Вручную	Автоматически

Заключение

Выполненное исследование позволило сформировать расчетно-программную методику, в которой ток однофазного короткого замыкания в сельской сети 0,4 кВ определяется с учетом фактического сопротивления фазного и нулевого проводников, длины линии, параметров трансформатора и переходного сопротивления в месте повреждения. По сравнению с расчетом только по параметрам трансформатора такая постановка дает более жесткую и практически значимую оценку минимального тока в удаленной точке линии.

Для контрольного варианта с трансформатором мощностью 250 кВ·А и линией 0,300 км установлено, что ток трехфазного короткого замыкания равен 0,890 кА, а ток однофазного короткого замыкания – 0,368 кА. При этом сопротивление петли «фаза-ноль» составляет $5{,}23240 \cdot 10^{-4}$ кОм и более чем в 18 раз превышает полное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне 0,4 кВ. Следовательно, для удаленных потребителей основным ограничивающим фактором является не мощность трансформаторной подстанции, а сопротивление отходящей линии и нулевого проводника.

Параметрический анализ показал, что при увеличении длины линии с 0,050 до 0,500 км ток однофазного короткого замыкания снижается с 1,208 до 0,237 кА. Учет переходного сопротивления 0,0001 кОм дополнительно уменьшает расчетный ток на 13,7%, а изменение длины, удельного сопротивления или сечения проводников на 10% изменяет Ik1 примерно на 8-9%. Эти результаты показывают, что при проверке чувствительности защиты в сетях 0,4 кВ необходимо выполнять не один расчет для номинальных данных, а серию расчетных сценариев с учетом возможного разброса эксплуатационных параметров.

Выводы

Предложенная методика дает научно-практический результат для задач специальности 4.3.2: установлено, что в протяженных сельских сетях 0,4 кВ минимальный ток однофазного короткого замыкания определяется главным образом сопротивлением петли «фаза-ноль», а не только паспортными параметрами трансформатора. Разработанный алгоритм позволяет выявлять участки, где снижение I_{k1} может привести к недостаточной чувствительности защитной аппаратуры, и обосновывать технические решения по увеличению сечения проводников, сокращению длины отходящих линий, уточнению настроек защиты или замене аппаратов. Применение программы сокращает трудоемкость серии расчетов примерно на 85-90%, что повышает воспроизводимость проектных и эксплуатационных проверок сетей электроснабжения объектов АПК.

Библиографический список

1. Виноградова, А. В. Анализ плановых и аварийных отключений в сельских электрических сетях 0,4 кВ / А. В. Виноградова, А. В. Вино-

градов. – DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51. – Текст: непосредственный // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Т. 71, № 3. – С. 44-51. – EDN VRFTOI.

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

3. Виноградова, А. В. Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учетом их причин / А. В. Виноградова. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-92-99. – Текст: непосредственный // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 92-99. – EDN HNXFHY.

4. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Москва: Изд-во стандартов, 1994. – 64 с. – Текст: непосредственный.

5. ГОСТ Р 50571.4.41-2022. Электроустановки низковольтные. Часть 4-41. Защита для обеспечения безопасности. Защита от поражения электрическим током. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 35 с. – Текст: непосредственный.

6. ГОСТ Р 50571.4.43-2012/МЭК 60364-4-43:2008. Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока. – Москва: Стандартинформ, 2014. – III. – 24 с. – Текст: непосредственный.

7. Применение гибридной сети для оценки технического состояния силового трансформатора / Д. В. Куделина, А. И. Кузьмичев, К. Р. Танцюра [и др.]. – DOI 10.37670/2073-0853-2025-116-6-110-118. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2025. – № 6 (116). – С. 110-118. – EDN DVEYDX.

8. Результаты хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле, полученных различными методами с применением искусственного интеллекта / И. В. Ворначева, О. М. Ларин, Н. В. Фастова [и др.]. – DOI 10.37670/2073-0853-2026-117-1-157-164. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2026. – № 1 (117). – С. 157-164. – EDN KGYLFZ.

9. Лансберг, А. А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания / А. А. Лансберг, А. В. Виноградов, А. А. Панфилов. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 14-28. – EDN WCTFZT.

10. Лансберг, А. А. Корректировка методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ / А. А. Лансберг, А. В. Виноградов. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 44-53.

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

12. Виноградов А. В., Лансберг А. А. Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ / А. В. Виноградов, А. А. Лансберг. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-3-90-99. – Текст: непосредственный // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 90-99.

References

1. Vinogradova A. V., Vinogradov A. V. Analiz planovykh i avariynykh otklyucheniy v selskikh elektricheskikh setyakh 0,4 kV // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. – 2024. – T. 71, No. 3. – S. 44-51. – DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-3-44-51.

2. Vinogradova A. V., Vinogradov A. V., Bukreev A. V. Udelnye pokazateli nadezhnosti elektricheskikh setey 0,4 kV // Agroinzheneriya. – 2024. – T. 26, No. 6. - S. 77-85. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85.

3. Vinogradova A. V. Koeffitsienty sezonnosti po kolichestvu i prodolzhitelnosti otklyucheniy v selskikh elektricheskikh setyakh s uchetom ikh prichin // Agroinzheneriya. – 2025. – T. 27, No. 2. – S. 92-99. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-92-99.

4. GOST 28249-93. Korotkie zamykaniya v elektroustanovkakh. Metody rascheta v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniem do 1 kV. – Moskva: Izdatelstvo standartov, 1994. – 64 s.

5. GOST R 50571.4.41-2022. Elektroustanovki nizkovoltnye. Chast 4-41. Zashchita dlya obespecheniya bezopasnosti. Zashchita ot porazheniya elektricheskim tokom. – Moskva: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022.

6. GOST R 50571.4.43-2012/MEK 60364-4-43:2008. Elektroustanovki nizkovoltnye. Chast 4-43. Trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti. Zashchita ot sverkhtoka. – Moskva: Standartinform, 2014. – III, 24 s.

7. Primenenie gibridnoy seti dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya silovogo transformatora / D. V. Kudelina, A. I. Kuzmichev, K. R. Tantsyura [i dr.] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – No. 6 (116). – S. 110-118. – DOI 10.37670/2073-0853-2025-116-6-110-118.

8. Rezultaty khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorennykh v transformatornom masle, poluchennykh razlichnymi metodami s primeneniem iskusstvennogo intellekta / I. V. Vornacheva, O. M. Larin, N. V. Fastova [i dr.] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2026. – No. 1 (117). – S. 157-164. – DOI 10.37670/2073-0853-2026-117-1-157-164.

9. Lansberg A. A., Vinogradov A. V., Panfilov A. A. Otsenka dostovernosti matematicheskoy modeli selskoy elektricheskoy seti 0,4 kV v MATLAB Simulink na primere issledovaniya ustanovivshegosya rezhima odnofaznogo korotkogo zamykaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. – 2023. – T. 25, No. 6. – S. 14-28. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.

10. Lansberg A. A., Vinogradov A. V. Korrektirovka metodov rascheta toka odnofaznogo korotkogo zamykaniya v selskoy elektricheskoy seti 0,4 kV // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. – 2024. – T. 26, No. 5. – S. 44-53. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53.

11. Lansberg A. A., Vinogradov A. V. Kompyuternoe modelirovanie rezhimov raboty elektricheskoy seti 0,4 kV s ustroystvom setevogo sektsionirovaniya // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – 2025. – T. 25, No. 2. – S. 5-16. – DOI 10.14529/power250201.

12. Vinogradov A. V., Lansberg A. A. Fizicheskoe modelirovanie raznykh vidov dvukhfaznykh korotkikh zamykaniy v selskoy elektricheskoy seti 0,4 kV // Agroinzheneriya. – 2025. – T. 27, No. 3. – S. 90-99. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-3-90-99.

✦ ✦ ✦

УДК 631.82.633.11
DOI: 10.53083/1996-4277-2026-265-11-96-102

Н.М. Иванов, **А.В. Шинделов, В.И. Беляев**
N.M. Ivanov, A.V. Shindelov, V.I. Belyaev

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРНОВОЙ СЕЯЛКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

IMPROVING THE DESIGN AND OPERATING PARAMETERS OF A SEED DRILL TO ENSURE A STABLE TECHNOLOGICAL PROCESS

Ключевые слова: *посев, сеялка, сошник, каток, междурядье, глубина заделки, всходы, качество и развитие посевов, сорняки.*

В настоящее время широко применяется при посеве зерновых культур рядовой посев сеялками, оснащёнными дисковыми сошниками. Применение при посеве зерновых 2-дисковых сошников, используемых практически на всех фонах в достаточно широком диапазоне почвенно-климатических зон, не исчерпало своих возможностей. Важная роль в технологическом процессе возделывания зерновых культур отводится посеву, где заделка семян сошниками должна проводиться на заданную глубину. В большинстве своем отечественные посевные агрегаты производят посев семян и внесение удобрений в один почвенный горизонт. Перспективным направлением следует считать разработку таких сошников, которые обеспечивают технологию посева в разные почвенные горизонты. Одной из задач развития во-