

5. Evstafev, I.N. Informatsionnye problemy vnedreniia sistem upravleniia tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontami / I.N. Evstafev // Avtomatizatsiia v promyshlennosti. – 2007. – No. 10. – S. 15-18.

6. Nino, T.P. Kak organizovat tekhnicheskii servis MTP v sovremennykh usloviakh / T.P. Nino // Inzhenerno-tekhnicheskoe obespechenie APK. Referativnyi zhurnal. – 2010. – No. 3. – S. 894-901.

7. Nino, T.P. Tendentsii mashinno-tekhnologicheskoi modernizatsii selskogo khoziaistva / T.P. Nino // Inzhenerno-tekhnicheskoe obespechenie APK. Referativnyi zhurnal. – 2011. – No.1. – S. 78-80.

8. Rozalieva, M.A. MTS: opyt i problemy. / M.A. Rozalieva, V.Iu. Rozaliev, T.D. Naumova // Ekonomika selskogo khoziaistva Rossii. – 2001. – No. 2. – S. 8.

9. Burak, P.I. O tekhnicheskome servise mashin i oborudovaniia selskokhoziaistvennogo

naznacheniiia / P.I. Burak // Vestnik RGAZU. – 2007. – No. 2. – S. 26-28.

10. Zolotareva, I.A. Mirovoi opyt gosudarstvennogo regulirovaniia selskogo khoziaistva v regionakh / I.A. Zolotareva // Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii. – 2010. – No. 1. – S. 34-37.

11. Obsluzhivanie selskokhoziaistvennoi tekhniki firmami i dilerami SShA. – Moskva: GOSNITI, 1977. – 143 s.

12. Krasnoshchekov, I.V. Innovatsionnoe razvitie selskokhoziaistvennogo proizvodstva Rossii / I.V. Krasnoshchekov. – Moskva: FGNU «Rosinformagrotekh», 2009. – 388 s.

13. Savchenko, O.F. Informatsionnoe obespechenie ekspertizy sostoianiia dvigatelei / O.F. Savchenko, V.V. Alt, I.P. Dobroliubov. – Novosibirsk: SibFTI, 2001. – 223 s.

14. Nyrova, H.H. Dogovory tekhnicheskogo konsultirovaniia i tekhnicheskogo obsluzhivaniia v prave KNR / H.H. Nyrova // Innovatsii. – 2006. – No. 6. – S. 108-110.



УДК 621.311  
DOI: 10.53083/1996-4277-2022-210-4-119-124

**А.А. Сошников, Е.В. Титов**  
**A.A. Soshnikov, E.V. Titov**

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ АПК  
НА ПОЖАРНУЮ ОПАСНОСТЬ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

**INFLUENCE OF STRUCTURAL-PARAMETRIC CHARACTERISTICS  
OF THE PROTECTION OF AGRICULTURAL ELECTRICAL NETWORKS AGAINST FIRE HAZARD  
OF SHORT CIRCUITS**

**Ключевые слова:** низковольтная электрическая сеть, короткое замыкание, электрическая дуга, автоматический выключатель, предохранитель, критерии оценки пожарной опасности, система защиты, коэффициент незащищенности, методика выбора защиты, эффективность защиты.

**Keywords:** low-voltage electrical network, short circuit, electric arc, circuit breakers, fuse box, fire hazard evaluation criterion, protection system, coefficient of insecurity, protection selection method, protection effectiveness.

Рассмотрена технология оценки эффективности снижения пожарной опасности коротких замыканий в электрических сетях низкого напряжения системами защиты с различными структурно-параметрическими характеристиками с учетом возможности повышения уровня аварийных токов за счет изменения параметров внешних и внутренних электрических сетей. Обосновано направление решения проблемы повышения эффективности защиты с использованием подхода, дополняющего настройку под расчетные значения токов короткого замыкания и предусматривающего их увеличение до уровня, при котором предохранители срабатывают быстрее, чем происходит перегорание проводов, а зона срабатывания автоматических выключателей смещается в область чувствительности электромагнитных расцепителей. Установлена возможность существенного снижения пожарной опасности коротких замыканий при использовании автоматических выключателей с характеристикой типа **B** за исключением отдельных ситуаций, обусловленных необходимостью повышения их номинальных токов и сечений электропроводки для отстройки от пусковых токов электродвигателей. Для повышения эффективности защиты автоматическими выключателями и предохранителями рекомендовано предусматривать при проектировании и внедрять в процессе эксплуатации систем электропитания мероприятия по повышению уровня токов короткого замыкания. Отмечена целесообразность использования устройств защитного отключения, обеспечивающих снижение пожарной опасности до 8 раз и более, независимо от уровня аварийных токов. Определен подход к выбору системы защиты на объекте электропитания по результатам оценки ее эффективности с учетом экономических показателей предлагаемых технических решений.

This paper discusses the technology for evaluating the effectiveness of reducing the fire hazard of short circuits in low-voltage electrical networks by protection systems with various structural-parametric characteristics taking into account the possibility of increasing the level of emergency electric currents by changing the parameters of external and internal electrical networks. The direction of solving the problem of increasing the effectiveness of protection using a new approach is substantiated. This approach complements the adjustment for the calculated values of short circuit currents and provides of increase of short circuit currents to a level at which fuses are triggered faster than wire burnout occurs. In this case, the zone of response of the circuit breaker is shifted to the area of sensitivity of the electromagnetic disconnectors. The possibility of a significant reduction of the fire hazard of short circuits when using circuit breakers with a type B characteristic is determined. The exceptions are certain situations that are characterized by the need of increasing their rated currents and wiring sections for detuning from the starting currents of electric motors. To increase the effectiveness of protection using circuit breakers and fuses box, it is advised to provide for measures to increase the level of short circuit currents during the design and implementation of power supply systems during operation. This paper proves the expediency of using protective shutdown devices that reduce fire danger up to 8 times or more regardless of the level of emergency currents. The paper also describes an approach to choosing a protection system at an electricity supply facility based on the results of evaluating its effectiveness taking into account the economic indicators of the proposed technical solutions.

**Сошников Александр Андреевич**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: aa@soshnikov.info.

**Титов Евгений Владимирович**, д.т.н., доцент, вед. научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: 888tev888@mail.ru.

**Soshnikov Aleksandr Andreevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: aa@soshnikov.info.

**Titov Evgeniy Vladimirovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Leading Researcher, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: 888tev888@mail.ru.

### Введение

Действующие методики [1] выбора автоматических выключателей и предохранителей в сетях низкого напряжения не учитывают воздействие на электропроводку возникающей при коротком замыкании (КЗ) электрической дуги. Из-за низкого уровня токов КЗ в электрических сетях АПК дуга может пережечь электропроводку быстрее, чем сработает защита, снижающая опасность пожароопасных процессов [2, 3].

Для защиты внутренних электрических сетей на объектах АПК до сих пор используется устаревшая модификация автоматических выключателей серии АЕ, особенностью которых является низкая чувствительность электромагнитных расцепителей. Замена таких выключателей на более чувствительные серии ВА с характеристиками **C** и **B** улучшает действие защиты. Кроме того, эффективно контролировать аварийные режимы, связанные с КЗ на открытые проводя-

щие части (на корпус), позволяют устройства защитного отключения (УЗО). Целесообразность их использования не только для защиты от электропоражений с учетом физиологических параметров человека, но и для предупреждения пожаров от токов утечки через изоляцию и КЗ получила мировое признание и отражена в нормативных документах [4-6]. Поэтому проектные решения систем защиты низковольтных сетей в ряде случаев предусматривают сочетание всех трех типов защитных аппаратов. Однако, как показывают проведенные расчеты, низкий уровень аварийных токов в сельских сетях исключает полное решение проблемы снижения пожарной опасности КЗ как при защите автоматическими выключателями, так и предохранителями, даже в сочетании с УЗО [3].

Эффективность электрической защиты повышается при увеличении токов короткого замыкания. В частности, при защите автоматическими выключателями максимальное снижение пожарной опасности достигается в случае превышения аварийным током порога срабатывания электромагнитных расцепителей [7].

**Целью** исследований является оценка эффективности снижения пожарной опасности системами электрической защиты с различными структурно-параметрическими характеристиками с учетом возможности повышения уровня токов КЗ за счет изменения параметров электрических сетей [3, 7].

#### Объекты и методы

Необходимо иметь в виду, что даже реализация совокупности мероприятий по повышению токов КЗ не гарантирует достижения их значений до уровня, обеспечивающего надежное срабатывание предохранителей и ЭР всей линейки номинальных токов применяемых аппаратов [3]. Поэтому целесообразно использовать разработанный в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова подход к оценке пожарной опасности КЗ [8] по специаль-

ным критериям, к которым относятся, в частности:

- коэффициент незащищенности, определяющий долю пережигаемой части участков сети;
- интегральный показатель пожарной опасности КЗ, характеризующий условную вероятность пожара в заданном диапазоне времени вследствие пережога электропроводки до срабатывания защиты.

Эффективный вариант системы электрической защиты с заданными структурой и параметрами выбирается по результатам расчета показателей пожарной опасности КЗ с учетом возможности повышения уровня аварийных токов и экономических показателей.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Технология выбора и оценки эффективности системы электрической защиты с различными структурно-параметрическими характеристиками рассмотрена для распределительного электрического щита производственного объекта АПК с аппаратами защиты четырех радиальных трехфазных линий одинаковой длины с алюминиевыми проводами, получающего питание по воздушной линии от трансформаторной подстанции мощностью 250 кВА. Нагрузка линий представлена электрическим нагревателем мощностью 10 кВт (линия 1) и тремя асинхронными электродвигателями мощностью 4 кВт (линия 2), 5,5 кВт (линия 3) и 7,5 кВт (линия 4). Расчетные параметры внутренней сети для трех вариантов системы электрической защиты (автоматическими выключателями серии ВА с характеристиками типа **С** и **В**, а также предохранителями серии ПР-2) представлены в таблице 1.

Следует отметить, что различие выбранных сечений проводов и номинальных токов аппаратов защиты для рассмотренных вариантов обусловлено необходимостью отстройки от пусковых токов асинхронных электродвигателей.

Таблица 1

*Расчетные параметры внутренней сети для трех вариантов системы защиты*

Тип защиты	Линия 1		Линия 2		Линия 3		Линия 4	
	сеч. провода, мм <sup>2</sup>	ном. ток аппарата защиты, А	сеч. провода, мм <sup>2</sup>	ном. ток аппарата защиты, А	сеч. провода, мм <sup>2</sup>	ном. ток аппарата защиты, А	сеч. провода, мм <sup>2</sup>	ном. ток аппарата защиты, А
ВА 61F29-3С	4	20	4	16	4	20	6	25
ВА 61F29-3В	4	20	6	25	10	32	10	40
Предохранитель ПР-2	6	20	4	15	6	20	10	35

Результаты расчета с помощью программы СКЭД-380 [8] времени срабатывания защиты при однофазном КЗ в конце линии по каждому из вариантов представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что нормированное время срабатывания защиты (до 0,4 с для внутренних радиальных сетей [6]) обеспечивается только для одной линии (2) первой системы защиты и для трех линий (1, 2, 3) второй системы. При этом эффективность защиты линии 4 выключателем с характеристикой **В** ниже, чем для менее чувствительного выключателя с характеристикой **С**.

Для оценки пожарной опасности КЗ в таблице 3 представлены результаты расчета коэффициентов незащищенности при однофазных КЗ для каждого варианта защиты.

Наибольшая эффективность защиты достигается на линиях 1, 2, 3 при использовании выключателей с характеристикой **В** и на линии 2 для выключателей с характеристикой **С**. На всей протяженности этих линий защита срабатывает до перегрева проводов. Значения коэффициен-

тов незащищенности 0,74 и 1 характеризуют высокую пожарную опасность КЗ. В первом случае защита эффективна только на 26 % протяженности линий, а во втором она вообще не ограничивает развитие пожароопасного процесса.

Результаты расчета интегрального показателя пожарной опасности по вариантам защиты для заданных значений вероятности возникновения однофазных, двухфазных, трехфазных КЗ и КЗ на открытые проводящие части (на корпус) соответственно: 0,03; 0,04; 0,015; 0,2 приведены в таблице 4.

Анализ результатов расчетов показывает, что наименьшая вероятность возникновения пожара в течение года хотя бы от одного вида КЗ достигается для выключателей с характеристикой **В**. Эта вероятность повышается в 2,5 раза для выключателей с характеристикой **С** и в 4,7 раза для предохранителей. При этом использование УЗО снижает вероятность пожара от 3 до 8 раз в зависимости от варианта защиты.

Таблица 2

**Расчетное время срабатывания защиты при однофазном КЗ в конце линий по вариантам системы защиты**

Тип защиты	Время срабатывания защиты, с			
	линия 1	линия 2	линия 3	линия 4
ВА 61F29-3С	2,9	0,01	2,9	4,15
ВА 61F29-3В	0,01	0,01	0,01	9,1
Предохранитель ПР-2	2,76	1,36	2,76	8,2

Таблица 3

**Расчетные значения коэффициентов незащищенности при однофазных КЗ по вариантам системы защиты**

Тип защиты	Коэффициент незащищенности			
	линия 1	линия 2	линия 3	линия 4
ВА 61F29-3С	0,74	0	0,74	1
ВА 61F29-3В	0	0	0	1
Предохранитель ПР-2	1	1	1	1

Таблица 4

**Расчетные значения интегрального показателя пожарной опасности КЗ по вариантам системы защиты**

Тип защиты	Интегральный показатель пожарной опасности КЗ	
	для исходного варианта системы защиты	при дополнительном использовании УЗО
ВА 61F29-3С	0,14	0,019
ВА 61F29-3В	0,057	0,007
Предохранитель ПР-2	0,266	0,083

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о высокой эффективности выключателей с характеристикой **B**, особенно при их сочетании с УЗО. Однако при наличии динамической нагрузки использование таких выключателей приводит к неоднозначному результату и в некоторых случаях может не только не улучшать, но и ухудшать эффективность защиты. Поэтому решение о возможности применения выключателей с характеристикой **B** должно базироваться на результатах уточнения параметров сети и оценки расчетного времени срабатывания при однофазных КЗ.

В наименьшей степени снижается пожарная опасность КЗ в рассмотренном примере при защите предохранителями. Интегральный показатель пожарной опасности почти в 2 раза выше, чем при защите выключателями с характеристикой **C**.

Для повышения эффективности использования выключателей с характеристикой **C** и предохранителей можно рекомендовать мероприятия по повышению уровня токов КЗ. Например, при замене воздушной линии внешней сети на СИП с одновременным повышением сечения проводов на одну ступень расчетное время срабатывания выключателей с характеристикой **C** при однофазном КЗ в конце линии снижается для всех четырех линий до 0,01 с. При этом интегральный показатель пожарной опасности КЗ принимает нулевое значение, даже при отсутствии УЗО.

Окончательный выбор системы защиты на объекте электроснабжения производится по результатам оценки эффективности снижения пожарной опасности КЗ с учетом экономических показателей предлагаемых технических решений.

### Выводы

1. Высокая пожарная опасность КЗ в электрических сетях до 1000 В АПК обусловлена низким уровнем аварийных токов, при котором пережог электропроводки возникающей электрической дугой может происходить до срабатывания защиты, что эквивалентно ее отсутствию.

2. Существенное снижение пожарной опасности КЗ в сетях со статической нагрузкой достигается при использовании автоматических выключателей серии ВА с характеристикой **B** взамен выключателей с характеристикой **C** и выключателей серии АЕ. Однако при наличии

динамической нагрузки применение таких выключателей приводит к неоднозначному результату и в некоторых случаях может не только не улучшать, но и ухудшать эффективность защиты из-за необходимости повышения номинальных токов и сечений электропроводки для отстройки от пусковых токов электродвигателей. Поэтому решение о возможности применения выключателей с характеристикой **B** должно базироваться на результатах уточнения параметров сети и оценки расчетного времени срабатывания при однофазных КЗ.

3. Для повышения эффективности защиты автоматическими выключателями и предохранителями целесообразно предусматривать при проектировании и внедрять в процессе эксплуатации систем электроснабжения мероприятия по повышению уровня токов КЗ за счет изменения параметров внешних и внутренних электрических сетей.

4. Независимо от уровня токов КЗ снижение пожарной опасности до 8 раз и более обеспечивает использование УЗО. При этом окончательный выбор системы защиты на объекте электроснабжения производится по результатам оценки ее эффективности с учетом экономических показателей предлагаемых технических решений.

### Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с. – Текст: непосредственный.
2. Смелков, Г. И. Пожарная безопасность электропроводок / Г. И. Смелков. – Москва: ООО «Кабель», 2009. – 328 с. – ISBN 978-5-9901554-2-8. – Текст: непосредственный.
3. Обеспечение эффективной защиты от коротких замыканий внутренних сетей объектов АПК / А. А. Сошников, О. Н. Дробязко, Б. С. Компанец, А. В. Цукановэ – Текст: непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 3. – С. 54-57.
4. Boron, S., Heyduk, A., Joostberens, J., Pielot, J. (2016). Empirical Model of a Human Body Resistance at a Hand-to-Hand DC Flow. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 22 (4), 26-31. DOI: 10.5755/j01.eie.22.4.15910. (дата обращения: 11.01.2022). – Режим доступа: свободный.

5. Gierlotka, S. (2011). Metody badan impedancji ciala czlowieka. *Wiadomosci elektrotechniczne*, 8: 18-20.

6. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html/> (дата обращения: 11.01.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

7. Сошников, А. А. Перспективные направления улучшения функциональных показателей систем сельского электроснабжения / А. А. Сошников, Б. С. Компанец. – Текст: непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции; под редакцией О. В. Пилипенко, А. Н. Качанова, Ю. С. Степанова. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2015. – С. 50-53.

8. Куликова, Л. В. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов / Л. В. Куликова, О. К. Никольский, А. А. Сошников. – 4-е изд., стер. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 404 с. – ISBN 978-5-4499-1175-9. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44365216> (дата обращения: 10.01.2022). – Режим доступа: для зарегистрированных пользователей. – Текст: электронный.

### References

1. Pravila ustroistva elektroustanovok / Minenergo SSSR. – 6-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Energoatomizdat, 1987. – 648 s.

2. Smelkov, G.I. Pozharnaia bezopasnost elektroprovodok. – Moskva: ООО «Kabel», 2009. – 328 s.

3. Soshnikov, A.A. Obespechenie effektivnoi zashchity ot korotkikh замыkaniy vnutrennikh setei obiektov APK / A.A. Soshnikov, O.N. Drobiazko, B.S. Kompaneets, A.V. Tsukanov // Dostizheniia nauki i tekhniki APK. – 2017. – Т. 31. – No. 3. – S. 54-57.

4. Boron, S., Heyduk, A., Joostberens, J., Pielot, J. (2016). Empirical Model of a Human Body Resistance at a Hand-to-Hand DC Flow. *Elektronika I Ir Elektrotechnika*, 22 (4), 26-31. DOI: 10.5755/j01.eie.22.4.15910. (data obrashcheniia: 11.01.2022).

5. Gierlotka, S. (2011). Metody badan impedancji ciala czlowieka. *Wiadomosci elektrotechniczne*, 8: 18-20.

6. PUE 7. Pravila ustroistva elektroustanovok. Izdanie 7. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html/> (data obrashcheniia: 11.01.2022). – Rezhim dostupa: svobodnyi.

7. Soshnikov, A.A. Perspektivnye napravleniia uluchsheniia funktsionalnykh pokazatelei sistem selskogo elektrosnabzheniia / A.A. Soshnikov, B.S. Kompaneets // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek: materialy XIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii; pod redaktsiei O.V. Pilipenko, A.N. Kachanova, Iu.S. Stepanova. – Орел: Gosuniversitet-UNPK, 2015. – S. 50 -53.

8. Kulikova, L.V. Osnovy elektromagnitnoi sovместimosti: uchebnik dlia vuzov / L.V. Kulikova, O.K. Nikolskii, A.A. Soshnikov. – izd. 4-e, ster. – Moskva; Berlin: Direkt-Media, 2020. – 404 s. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44365216> (data obrashcheniia: 10.01.2022). – Rezhim dostupa: dlia zaregistrirovannykh polzovatelei.

