

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2135>**Е. Ж. Казбеков¹, *Ю. А. Леньков²**^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1014-7081>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0006-6742>*e-mail: lenkov.u44@gmail.com

О МЕТОДАХ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЯМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье представлен обзор современных подходов к предотвращению и управлению авариями в электроэнергетических системах с акцентом на каскадные аварии. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена ростом масштабов и социально-экономических последствий крупных аварий, а также недостаточной проработанностью сценариев множественных отказов в существующих технических решениях. На основе анализа публикаций, проведенного с помощью искусственного интеллекта, посвящённых расследованию крупных каскадных аварий, установлено, что значительная их часть вызвана сочетанием отказов релейной защиты и выключателей, перегрузками и ошибками персонала. Показано, что большинство существующих методов управления аварийными режимами ориентированы на снижение вероятности возникновения коротких замыканий, на диспетчерское управление уже развившимися аварийными процессами и на повышение надёжности функционирования релейной защиты и её адаптацию к условиям работы. При этом только на неё и возлагается автоматическая локализация аварий на ранних стадиях их развития. Однако, как следует из приведенного анализа, этого совершенно недостаточно. Полученные результаты позволяют обосновать целесообразность разработки устройств противоаварийной автоматики, ориентированных на локализацию каскадных аварий в режиме реального времени, и сформулировать приблизительные требования к ней.

Ключевые слова: каскадные аварии, локализация повреждений, релейная защита, выключатели, наложение отказов, противоаварийная автоматика.

Введение

Крупные аварии в электроэнергетических системах на протяжении последних десятилетий остаются одной из наиболее острых проблем энергетики. Первой аварией подобного масштаба считается блэкаут 1965 года в энергосистеме США, в результате которого электроснабжение было нарушено на территории штата Нью-Йорк и части Канады, а число затронутых потребителей превысило 30 млн человек. В дальнейшем подобные события стали происходить всё чаще и характеризовались возрастающим масштабом последствий. За последние двадцать лет зафиксировано пятнадцать крупных аварий, тогда как за предыдущие сорок лет их количество составляло двенадцать, при этом суммарное число пострадавших возросло более чем в три раза и достигло 2,7 млрд человек [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9].

Характерной особенностью большинства аварий является каскадный характер. Анализ причин показывает, что в большинстве случаев их развитие связано не с одиночными повреждениями, а с наложением нескольких неблагоприятных факторов. К таким факторам относятся отказы релейной защиты, неисправности высоковольтных выключателей, перегрузки элементов сети, а также ошибки оперативного персонала. Особый интерес представляет группа аварий, начинавшихся с одновременных отказов релейной защиты и выключателей на одной линии электропередачи в схемах распределительных устройств электрических станций и подстанций. Подобный сценарий наблюдался в 25 % рассмотренных крупных каскадных аварий. Несмотря на зафиксированную роль множественных отказов в развитии системных аварий, в практике проектирования и эксплуатации электроэнергетических объектов такие ситуации традиционно рассматриваются как маловероятные. Частично это объясняется тем, что значительный ущерб от масштабных аварий зачастую списывается на воздействие внешних факторов или стихийных явлений.

Обзор публикаций в базах данных Scopus и Web of Science, а также патентная проработка показывают, что в открытых источниках не представлено работ, посвященных вопросам локализации аварий, вызванных наложением отказов релейной защиты и выключателей. В большинстве работ рассматриваются либо меры предотвращения отдельных отказов, либо методы диспетчерского управления аварийными режимами. В международных исследовательских проектах, ориентированных на повышение безопасности энергетических объектов, включая атомные электростанции, возможность одновременных отказов релейной защиты также не рассматривается [10].

На практике управление развитием аварийных ситуаций в энергосистемах в значительной степени возлагается на релейную защиту и оперативный персонал. Однако при возникновении сложных аварий, сопровождающихся большим количеством противоречивой и неполной информации, возможности диспетчера по своевременной локализации повреждений оказываются ограниченными. Известны случаи, когда даже при относительно большой продолжительности аварийного процесса оператор не успевал принять эффективные меры по предотвращению его развития, что приводило к значительным последствиям для энергосистемы [11].

В связи с изложенным, актуальной является задача анализа существующих подходов к предотвращению и управлению авариями в электроэнергетических системах, обусловленных множественными отказами. Особый интерес представляет оценка возможностей уже предложенных технических и организационных решений с точки зрения их применимости для быстрого ограничения зоны аварии в момент её зарождения. Настоящая работа носит обзорный характер и направлена на систематизацию современных методов, а также на выявление их ограничений в условиях наложения отказов релейной защиты и высоковольтных выключателей.

Материалы и методы

Методической основой исследования являлся аналитический обзор и сравнительный анализ. При анализе публикаций особое внимание уделялось методам, ориентированным на практическое применение в схемах распределительных устройств электрических станций и подстанций. Оценка эффективности рассматриваемых подходов проводилась с учётом их способности ограничивать зону аварии при возникновении коротких замыканий на линиях электропередачи в условиях одновременных отказов релейной защиты и выключателей. Также анализировались ограничения существующих решений, связанные с необходимостью участия оперативного персонала, объёмом исходной информации и временными задержками при принятии решений.

Результаты и обсуждение

Значительная часть исследований направлена на предотвращение первичных повреждений, прежде всего коротких замыканий на линиях электропередачи. В ряде работ показано, что внешние воздействия, такие как пожары, могут существенно увеличивать вероятность пробоя изоляции и возникновения коротких замыканий, а снижение риска таких событий возможно за счёт оптимизации параметров линий электропередачи и условий их размещения [12]. Подобные меры способны уменьшить общее число первичных повреждений и, тем самым, снизить вероятность запуска

каскадного процесса. Однако данные подходы не решают проблему развития аварии в случае, если короткое замыкание всё же произошло при неблагоприятном сочетании отказов релейной защиты.

Надежность при наложении отказов в релейной защите в какой-то мере может быть обеспечена дублированием, если это целесообразно. Но на линиях сверхвысокого напряжения это делается не всегда, причем трансформаторы тока и устройства отбора напряжения, выполненные с помощью конденсаторов связи и реакторов, от которых получает информацию релейная защита (РЗ), не дублируются из-за громоздкости, веса и сложностей монтажа. Это сводит эффект от дублирования самих аппаратов РЗ к минимуму.

Другим направлением исследований является повышение надёжности функционирования РЗ. В ряде публикаций предлагаются модели оценки деградации защитных устройств, позволяющие выявлять снижение их надёжности и учитывать это при эксплуатации [13]. Также рассматриваются методы координации реле и адаптивные алгоритмы защиты, направленные на повышение быстродействия и устойчивости работы релейной защиты в изменяющихся режимах энергосистемы [14; 15]. Безусловным достоинством таких подходов является снижение вероятности отказов РЗ и ложных срабатываний. Вместе с тем даже при использовании современных адаптивных алгоритмов полностью исключить отказы защит не представляется возможным, особенно с учётом старения оборудования и воздействия внешних факторов.

Отдельную группу составляют методы, ориентированные на выявление и оценку множественных отказов. В работах, основанных на статистическом анализе аварийных режимов, предлагаются подходы к мониторингу состояния энергосистемы и выявлению признаков повышенного риска развития аварийных ситуаций [16]. Также рассматриваются методы краткосрочной оценки риска наложения отказов, учитывающие неопределённость поведения релейной защиты в экстремальных условиях [17]. Эти исследования подчёркивают, что вероятность множественных отказов не является пренебрежимо малой и может возрастать в определённых режимах работы энергосистемы. Однако предлагаемые методы в основном носят диагностический или прогностический характер и не обеспечивают автоматического ограничения зоны аварии в момент её возникновения.

Существенное внимание уделяется вопросам диспетчерского и автоматизированного управления аварийными режимами. За последние десятилетия разработано значительное число теоретических моделей и алгоритмов превентивного управления, направленных на повышение

устойчивости энергосистемы и снижение последствий возможных аварий. Наибольший практический интерес представляют решения, доведённые до опытной или промышленной эксплуатации, реализованные, в частности, в энергосистемах Италии, Кореи и Китая [18; 19; 20]. Эти системы позволяют повысить информированность диспетчерского персонала и оптимизировать управляющие воздействия в аварийных ситуациях. Тем не менее их эффективность во многом зависит от корректности исходных данных и скорости принятия решений, а также предполагает активное участие оператора.

Обобщение рассмотренных результатов показывает, что существующие методы управления авариями в электроэнергетике либо направлены на снижение вероятности отдельных отказов, либо ориентированы на диспетчерское управление уже развившимися аварийными процессами. В условиях наложения отказов РЗ и высоковольтных выключателей такие подходы оказываются недостаточно эффективными, поскольку не обеспечивают быстрого автоматического ограничения зоны повреждения в момент зарождения аварии. Это подтверждается анализом реальных каскадных аварий, при которых даже относительно кратковременные задержки в принятии решений приводили к существенному расширению зоны отключений и росту ущерба [11].

Из изложенного следует, что назрела необходимость создать противоаварийную автоматику, способную локализовать аварии, вызванные наложениями отказов РЗ и выключателей, а также перегрузками, возникающими после отключения коротких замыканий (КЗ). Рассмотрим какими свойствами должна обладать автоматика для решения первой из этих задач.

При отказе релейной защиты КЗ на присоединении открытого распределительного устройства продолжается до тех пор, пока не будет отключено от резервной защиты питающего это КЗ неповрежденного присоединения (на электрической станции это все работающие блоки генератор-трансформатор, а на электроподстанции – питающие линии), и электростанция или электроподстанция погасают, и авария в энергосистеме разрастается, так как перегружаются неповрежденные блоки и линии электропередач других электростанций. Поэтому гипотетическое устройство автоматики должно успеть выявить и КЗ, и повреждения в РЗ, а затем успеть отключить неповрежденные выключатели поврежденного присоединения до срабатывания резервных защит питающих присоединений, то есть обладать определенным быстродействием. При этом оно должно отключать только выключатели поврежденного присоединения, то есть обладать свойством селективности. Понятно, что оно должно быть надежным, чтобы выполнять свои функции и чувствительным, чтобы воспринимать контролируемые параметры.

Автоматика должна строиться таким образом, чтобы не мешать работе РЗ и не нужно было бы её переделывать. Но при этом её алгоритмы функционирования должны реализовываться как на микропроцессорах для возможности встраиваться в цифровые подстанции, так и на интегральных элементах, чтобы легче сопрягаться с большим количеством все еще находящихся в эксплуатации защит, выполненных на этих элементах. В связи с тем, что обсуждаемая гипотетическая противоаварийная автоматика по существу будет выполнять одновременно роль релейной защиты и диагностики её неисправностей в момент КЗ, при её построении нужно обратить особое внимание на обеспечение надежности.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №АР23489689).

Выводы

Проведённый обзор показал, что, несмотря на развитие методов повышения надёжности оборудования, релейной защиты и диспетчерского управления, проблема локализации каскадных аварий остаётся нерешённой. Существенным ограничением существующих подходов является их ориентация либо на предотвращение одиночных отказов, либо на управление уже развившимися аварийными процессами, без учёта сценариев одновременных отказов релейной защиты и высоковольтных выключателей. В этой связи актуальной является разработка устройств противоаварийной автоматики, предназначенных для локализации каскадных аварий на ранних стадиях аварийного процесса и способных функционировать в режиме реального времени независимо от действий оперативного персонала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Vieira, X.** The March 11th 1999 Blackout: Short-Term Measures to Improve System Security and Overview of the Reports Prepared by the International Experts // CIGRÉ Session, SC 39 Workshop on Large Disturbances. – Paris, 2000.

2 **Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R.** Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance // IEEE Transactions on Power Systems, 2005. – Vol. 20. – P. 1922–1928.

3 **Younas, M. W., Qureshi, S. A.** Analysis of blackout of national grid system of Pakistan in 2006 and the application of PSS and FACTS controllers as remedial measures // International Conference on Electrical Engineering, 2007. – P. 1–6.

4 **Xue, Y., Xiao, S.** Generalized congestion of power systems: insights from the massive blackouts in India // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013. – Vol. 1. – P. 91–100.

5 **Lai, L. L., Zhang, H., Lai, C. S., Xu, F. Y., Mishra, S.** Investigation on July 2012 Indian blackout // *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2013. – P. 92–97.

6 **Kabir, A., Hasan Sajeeb, M., Islam, N., Chowdhury, H.** Frequency transient analysis of countrywide blackout of Bangladesh power system on 1st November // *International Conference on Advances in Electrical Engineering*, 2015. – P. 267–270.

7 **Praminta, S. M., Wiguna, S., Pramana, A.** Blackout restoration plan in Jakarta power grid // *International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power*, 2020. – P. 295–300.

8 National Electric Power Regulatory Authority (NEPRA). Inquiry report regarding total power system collapse on 9 January 2021. – Islamabad, 2021.

9 National Electric Power Regulatory Authority (NEPRA). State of inquiry report on total power blackout in the country on 23 January 2023. – Islamabad, 2023.

10 **Hermesmeier, S., Iglesias, R., Herranz, L. E.** Review of current severe accident management (SAM) approaches for nuclear power plants in Europe. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.

11 Federal Energy Regulatory Commission (FERC), North American Electric Reliability Corporation (NERC). Arizona–Southern California outages on September 8, 2011: causes and recommendations. – 2012.

12 **Sayarshad, H. R., Ghorbanloo, R.** Evaluating the resilience of electrical power line outages caused by wildfires // *Reliability Engineering & System Safety*, 2023. – Vol. 240. – P. 109–588.

13 **Xiang, S.** A reliability evaluation method for electromagnetic relays based on a novel degradation-threshold-shock model with two-sided failure thresholds // *Reliability Engineering & System Safety*, 2023. – Vol. 240. – P. 109549.

14 **Purwar, E., Vishwakarma, D. N., Singh, S. P.** A novel constraints reduction-based optimal relay coordination method considering variable operational status of distribution system with DGs // *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017. – Vol. 10. – P. 889–898.

15 **Zhang, N., Kezunovic, M.** A real time fault analysis tool for monitoring operation of transmission line protective relay // *Electric Power Systems Research*, 2007. – Vol. 77. – P. 361–370.

16 **Chen, Q.** Fault tracking method for relay protection devices // *Energies*, 2021. – Vol. 14. – P. 2723.

17 **Wang, J.** Short-term multiple fault risk assessment for power systems considering unexpected actions of protection system under weather disasters // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024. – Vol. 162. – P. 110254.

18 **Jung, J.** Multiple hypotheses and their credibility in on-line fault diagnosis // IEEE Transactions on Power Delivery, 2001. – Vol. 16. – P. 225–230.

19 **Lee, H. J., Ahn, B. S., Park, Y. M.** A fault diagnosis expert system for distribution substations // IEEE Transactions on Power Delivery, 2000. – Vol. 15. – P. 92–97.

20 **Guo, W.** An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers // IEEE Transactions on Power Delivery, 2010. – Vol. 25. – P. 1393–1401.

Поступило в редакцию 16.02.26.

Поступило с исправлениями 06.03.26.

Принято в печать 22.05.26.

*Е. Ж. Казбеков¹, *Ю. А. Леньков²*

^{1,2}Торайғыров университет,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

16.02.26 ж. баспаға түсті.

06.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ АВАРИЯЛАРДЫ БАСҚАРУ ӘДІСТЕРІ ТУРАЛЫ

Мақалада электр энергетикалық жүйелердегі апаттардың алдын алу және оларды басқару бойынша заманауи тәсілдерге шолу жасалып, негізгі назар каскадтық апаттарға аударылған. Қарастырылып отырған тақырыптың өзектілігі ірі апаттардың ауқымы мен әлеуметтік-экономикалық салдарының артуымен, сондай-ақ қолданыстағы техникалық шешімдерде көптік істен шығу сценарийлерінің жеткіліксіз пысықталуымен негізделеді. Жасанды интеллект көмегімен жүргізілген, ірі каскадтық апаттарды тергеуге арналған жарияланымдарды талдау негізінде олардың елеулі бөлігі релейлік қорғаныс пен ажыратқыштардың істен шығуларының үйлесуінен, жүктемелердің артуынан және персонал қателіктерінен туындайтыны анықталды. Қолданыстағы апаттық режимдерді

басқару әдістерінің басым бөлігі қысқа тұйықталулардың пайда болу ықтималдығын төмендетуге, дамып кеткен апаттық процестерді диспетчерлік басқаруға, сондай-ақ релейлік қорғаныстың жұмыс істеу сенімділігін арттыруға және оны жұмыс жағдайларына бейімдеуге бағытталғаны көрсетілді. Бұл ретте апаттардың дамуындағы бастапқы кезеңдерде оларды автоматты түрде локализациялау міндеті тек релейлік қорғанысқа ғана жүктеледі. Алайда жүргізілген талдау көрсеткендей, бұл жеткіліксіз. Алынған нәтижелер каскадтық апаттарды нақты уақыт режимінде локализациялауға бағытталған апатқа қарсы автоматика құрылғыларын әзірлеудің орындылығын негіздеуге және оларға қойылатын шамамен талаптарды тұжырымадауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: каскадтық апаттар, зақымдануларды локализациялау, релейлік қорғаныс, ажыратқыштар, істен шығулардың наложениесі, апатқа қарсы автоматика.

*Ye. Zh. Kazbekov¹, *Yu. A. Len'kov²*

^{1,2}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 16.02.26.

Received in revised form 06.03.26.

Accepted for publication 22.05.26.

ON METHODS OF EMERGENCY MANAGEMENT IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

The paper presents a review of modern approaches to the prevention and management of emergencies in electric power systems, with an emphasis on cascading failures. The relevance of the topic under consideration is determined by the growing scale and socio-economic consequences of major accidents, as well as by the insufficient elaboration of multiple-failure scenarios in existing technical solutions. Based on an analysis of publications devoted to the investigation of major cascading failures, carried out using artificial intelligence tools, it has been established that a significant proportion of such events are caused by a combination of relay protection and circuit breaker failures, overloads, and personnel errors. It is shown that most existing methods for managing emergency operating conditions are focused on reducing the probability of short-circuit occurrence, on dispatcher control of already developed emergency

processes, and on improving the reliability of relay protection operation and its adaptation to operating conditions. At the same time, automatic localization of failures at the early stages of their development is assigned exclusively to relay protection. However, as follows from the presented analysis, this is clearly insufficient. The obtained results make it possible to substantiate the expediency of developing emergency automation devices aimed at localizing cascading failures in real time and to formulate approximate requirements for such devices.

Keywords: cascading failures, fault localization, relay protection, circuit breakers, overlapping failures, emergency automation.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz