

**Н. Г. ДЖУМАМУХАМБЕТОВ<sup>1\*</sup>, В. А. ЯШКОВ<sup>2</sup>, Д. У. КУЛЬЖАНОВ<sup>2</sup>,  
Н. М. САРСЕНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НАО Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,  
г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup>НАО Атырауский Университет нефти и газа им. С. Утебаева,  
г. Атырау, Казахстан

## **ЖИВУЧЕСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В УСЛОВИЯХ РЕЗКОКОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА АТЫРАУСКОГО РЕГИОНА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

*В работе приведены определения живучести, классификация каскадных аварий, имеющих место при ошибочных действиях персонала и низкой надежности автоматических устройств, показатели живучести: вероятность появления каскадных аварий, средняя длительность и средняя глубина провалов напряжения. Приведена функция надежности персонала, качество управления которого является одним из факторов, определяющих живучесть систем электропередач.*

**Ключевые слова:** каскадные аварии, живучесть, отказ, автоматическое включение резерва, оперативно-диспетчерское управление, короткие замыкания, электроэнергетическая система, вероятность появления каскадных аварий.

**Введение.** Живучесть является единичным свойством комплексного свойства надежности электроэнергетических систем, Методы исследования, показатели и критерии живучести в настоящее время недостаточно разработаны. Существует ряд определений понятия "живучесть". В [1] под живучестью понимают способность системы противостоять возмущениям, не контролируемым системной автоматикой. В [2] живучесть связывают с системными авариями, сопровождающимися каскадным развитием возмущения. В [3] живучесть оценивается цепочечными авариями системного характера. В [4] дано развернутое определение живучести как свойства системы противостоять крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым отключением потребителей. В [1] утверждается, что живучесть можно характеризовать как способность системы противостоять возмущениям. В настоящее время также расходятся мнения исследователей относительно существования закономерностей, которые обуславливают живучесть. Так, в [5] причиной нарушения живучести признается воздействие на систему внешних по отношению к ней факторов, которые носят преднамеренный характер. Указывается, что вероятностные методы в этих условиях неприменимы и не имеют смысла. В [6] приводятся соображения о вероятностном характере возмущения при каскадных авариях.

Все концепции живучести, развиваемые в работах В.А. Веникова, Ю.Н. Руденко, В.Г. Китушина, Ю.А. Фокина и ряда других исследователей, базируются на признании факта наличия первоначального отказа и массового отключения потребителей в результате снижения уровня живучести. Расхождения вызваны различными оценками

---

\* E-mail корреспондирующего автора: [nasikhan\\_d@mail.ru](mailto:nasikhan_d@mail.ru)

первоначального отказа и его природы: крупное возмущение или среднее, детерминированное или вероятностного характера, а также разным подходом к оценке причин, вызывающих столь значительное нарушение работы системы. В [7] первоначальный отказ – это феномен, для описания которого не хватает вероятностно-временных характеристик надежности. В этом плане можно отметить ураганы, смерчи и другие природные явления, проявляющиеся на большой территории и с катастрофическими последствиями. В работах ВГПИ и НИИ "Энергосеть проект" первоначальный отказ – это множество внешних воздействий, одновременно обрушивающихся на систему. Следует отметить, что большинство исследователей придерживаются мнения, что первоначальный – это крупное возмущение, но его последствия определяются не столько его величиной, сколько возможностью развития аварии.

Видимо, все три перечисленных типа первоначальных отказов могут быть предметом исследования. Но это указывает лишь на невозможность разработки универсальной теории живучести базе единого математического аппарата.

**Методы и материалы.** Современные промышленные комплексы с непрерывными технологическими процессами чувствительны к кратковременным нарушениям электропитания (НЭ). Эти нарушения могут быть обусловлены аварийными возмущениями (короткие замыкания, перегрузки и др.), создающими динамический режим, что вызывает необходимость установить границы динамической устойчивости узла схемы.

Наиболее сложными для изучения динамических режимов являются каскадные аварии (КА), которые обычно связывают с живучестью.

В электроэнергетике под живучестью объекта понимается: свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей.

Наиболее развернутое определение живучести дано в [8], где под живучестью системы как комплексным свойством надёжности понимается противостояние крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым отключением потребителей или возможности нарушения связности систем промышленного электропитания (СПЭС), которую можно определить как ядро с совокупностью узлов нагрузки и линией связи.

Опыт эксплуатации СПЭС показывает, что узлы электрической нагрузки (сборные шины, места подключения к магистральным линиям, трехобмоточные трансформаторы) оказывает значительное влияние на надёжность функционирования СПЭС, т.к. могут вызвать отключение основных элементов СПЭС – воздушных линий (ВЛ) и к значительному ущербу.

Под живучестью узла нагрузки понимается способность потребителей и их автоматических средств защиты противодействовать возмущениям, которые могут привести к аварийному его отключению.

Кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Московского энергетического института (МЭИ) разработано быстродействующие автоматические включения резерва (БАВР), основанного на современной микропроцессорной элементной базе, и позволяющие с появлением быстродействующих вакуумных и элегазовых выключателей, обеспечить непрерывное электроснабжение путем переключения на резервный источник питания за время не более 65 мс.

Все концепции живучести, развиваемые в работах, базируются на признании факта наличия первоначального отказа и массового отключения потребителей в результате снижения уровня живучести. Расхождения вызваны различными оценками первоначального отказа и его природы: крупное возмущение или среднее, детерминированное или вероятностного характера, а также разным подходом к оценке причин, вызывающих столь значительное нарушение работы системы.

Следует отметить, что большинство исследователей в области живучести придерживаются мнения о том, что первоначальный отказ — это крупное возмущение, но его последствия определяются не столько его величиной, сколько возможностью развития аварии.

Последствия каскада аварий (КА) определяют их классификацию по характерным событиям, масштабу и причинами (табл. 1).

Таблица 1 – Классификация каскадных аварий

Виды	Причины	Последствия
1. Системные	1. Нарушения в работе УРЗиА	Нарушение баланса мощностей в СЭС
	2. Ошибочные действия эксплуатационного персонала	
	3. Стихийные явления	
2. Локальные	1. Наложение отказов ряда элементов схемы	Нарушения в отдельных районах ЭЭС и СПЭС
	2. Наложение отказов элементов схемы на нарушение режима работы её оборудования, которые устраняются УРЗА	

Как следует отличать от аварии, связанной с потерей устойчивости? Каскадный процесс может не закончиться потерей устойчивости по напряжению. В зависимости от неоднородности сети, процесс может остановиться после отключения нескольких элементов сети в допустимой области режимов, но может и закончиться потерей устойчивости.

Степень расстройств функционирования технологических процессов и установок при нарушении электроснабжения (НЭ) называют глубокой. Глубина цепочной аварии зависит от места появления и числа отключившихся защитного коммутационного аппарата (ЗКА), через которые протекал сквозной аварийный ток и привел в действие релейную защиту (РЗ). Ее можно характеризовать числом ложно отключившихся неповрежденных потребителей (секций мин) либо их убытками, которые связаны с недоотпуском электроэнергии, простым и расстройством технологических циклов.

Показателем живучести может служить частота появления системных цепочных аварий (ЦА) с различной глубиной НЭ. Частота их возникновения при КЗ в защищаемом элементе сети и отказов в срабатывании ряда ЗКА, через которые протекал сквозной аварийный ток, определяется по формуле:

$$F = \frac{1}{2^m} \sum_{j=1}^n \lambda_j \prod_{i=1}^m T_i^2 \omega_i \quad (1)$$

$\lambda_j$  – где параметр потока независимых КЗ в элементе сети;  $\omega_i$  – параметр потока отказов в срабатывании  $i$ -го ЗКА;  $T_i$  – интервал времени между диагностикой системы отключения  $i$ -го ЗКА, вместе с его РЗ или системой АВР;  $m$  – число ЗКА, через которые протекал сквозной аварийный ток или число секционных коммутационных аппаратов с АВР, отказавших во включении;  $n$  – число единиц электрооборудование, получавших электроэнергию от данного узла нагрузки.

Формула (1) справедлива при выполнении двух условий:

1. Интервалы времени между появлениями короткого замыкания (КЗ) в элементе сети и интервалы времени между отказами в срабатывании ЗКА не противоречат экспоненциальным функциям распределения вероятностей с параметрами соответственно  $\lambda_j$  и  $\omega_i$ ;

$$2. T_i \omega_i < 0,1$$

Формула (1) имеет следующие допущения

– устройства управления релейной защитой (УРЗ) могут выходить из строя только тогда, когда они находятся в режиме ожидания;

– к моменту реагирования на повреждения в сети РЗ является работоспособной.

Отказы в схемах РЗ и приводе выключателя выявляются и устраняются в результате абсолютно надежной диагностики, под отказом в срабатывании ЗКА понимается такой, который приводит к отказу в отключении поврежденного элемента сети при КЗ в зоне действия его РЗ.

В случае, если сроки диагностики систем отключения ЗКА будут одинаковы (т.е.  $T_i = T, i = 1, \dots, m$ ), формула (2) будет иметь вид

$$F = \frac{1}{2^m} \sum_{j=1}^n \lambda_j T^{2m} \prod_{i=1}^m \omega_i^2 \quad (2)$$

Вероятность появления КА (или потеря живучести узла нагрузки) в течении времени  $t$  можно определить по выражению

$$Q(t) = 1 - e^{-Ht}, \quad (3)$$

Если  $Ht < 0,1$ , то  $Q(t) \approx Ht$ .

Кроме вероятности появления КА, набор показателей живучести узла схемы должен включать среднюю длительность ( $c$ ) и среднюю глубину провалов напряжения.

Важным фактором обеспечения живучести системы является оперативно-диспетчерское управление (ОДУ), а основными причинами построения системы ОДУ является разграничение функции и ответственности оперативно-диспетчерского персонала (ОДП) всех ступеней управления по ведению нормальных режимов, ликвидации НЭ и строжайшая дисциплина вероятность появления отказов по вине ОДП в интервале времени определится как

$$P \cdot (E_2/E_1) = \lambda(t) \Delta t, \quad (4)$$

где  $E_2$  – событие, состоящее в появлении ошибки ОДП в интервале времени  $[t_1, t + \Delta t]$ ;  $E_1$  – событие, состоящее в безошибочной работе ОДП в течение времени  $t$ ;  $\lambda(t)$  – частота появления ошибок по вине ОДП в момент (аналогично параметру потока отказов в классической теории надежности).

Функция надежности (ФН) ОДП подчиняется экспоненциальному закону и имеет вид:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \omega(t) dt} \tag{5}$$

По аналогии с классической теорией надёжность ОДП определяется как вероятность успешного выполнения им возложенных функции на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы. Тогда ошибкой (отказом) ОДП можно считать как невыполнение поставленной задачи, которое привело к повреждению оборудования, аппаратуры, имущества или нарушению технологии запланированных операций.

Ошибки по вине ОДП могут возникнуть в следующих случаях:

- ОДП стремится к достижению ошибочной цели;
- поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действия ОДП;

ОДП;

- ОДП не принимает никаких действий, когда его участие необходимо.

Уровни распределения ошибок ОДП приведены на рис 1.

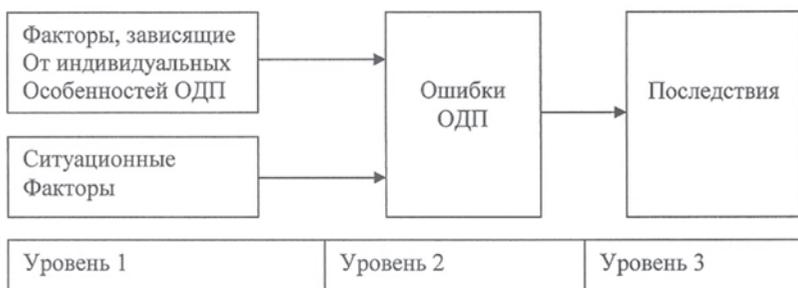


Рисунок 1 – Уровни ошибок ОДП

Виды отказов ОДП и их причины и пути снижения отказов приведены в табл. 2

Таблица 2 – Виды отказов ОДП, причины отказов и пути снижения отказов

Виды отказов	Причины отказов	Пути снижения отказов
1. Закономерные	Низкий уровень знаний ОДП инструкции, директивных указаний.	Лекции и экзамены по ПТБ, ТБ и производственным инструкциям
2. Случайные	Низкий уровень внимания, четкости и дисциплины в работе	Инструктажи, собеседования, противоаварийные тренировки
3. Независимые	1. Недостаточный уровень оснащения рабочего места (доступность к аппаратам управления, освещения и др.)	Повышение уровня оснащения
	2. Недостаточное стимулирование ОДП	Ввод или пересмотр систем стимулирования, позволяющих достигнуть оптимального качества работы

**Результаты и их обсуждение.** Большое разнообразие каскадных отказов потребовало осуществить их классификацию. К настоящему времени выполнен и опубликован ряд работ, посвященных этому вопросу. В [9,10,11] приведены обобщенные данные о нарушениях нормального режима с их подразделением на простые и сложные случаи единичных отказов, а также каскадные нарушения. Авторы отмечают, что каскадные нарушения составляют 8% общего количества нарушений нормального режима. В [6, 12,13,14] осуществлена классификация системных каскадных аварии по характерным событиям. События подразделены на две группы. К первой группе отнесены события, связанные с изменением состояния и структуры системы в результате отказов в работе основного оборудования системы. Ко второй группе отнесены события, являвшиеся причинами изменения состояния электроэнергетических систем.

По охвату территории и масштабу каскадные аварии подразделены на системные и локальные. К системным авариям отнесены аварии, приводящие к нарушению баланса мощности в энергосистеме. В результате системных каскадных аварий дефицитная энергосистема отделяется от питающей, ее электрические станции работают на выделенную нагрузку. К локальным каскадным авариям отнесены аварии, затрагивающие только отдельные районы энергосистемы,

Системные каскадные аварии по причинам, которые их вызывают, были подразделены на три группы. К первой отнесены каскадные аварии, связанные с несогласованной работой автоматики автоматического повторного включения, автоматической частотной разгрузки, делительной частотной защиты, ложным срабатыванием устройств релейной защиты, неверным выбором выдержки автоматического включения. Ко второй группе отнесены аварии, вызываемые неправильными действиями эксплуатационного персонала. К третьей группе отнесены каскадные аварии, вызываемые стихийными явлениями, например, смерчем. Подобная классификация указывает на основную причину аварии и возможный способ ее устранения.

Локальные каскадные аварии по причинам, которые их вызывали, были подразделены на две группы. К первой отнесены схемные каскадные аварии – аварии, вызываемые наложением отказов ряда элементов схемы. Ко второй группе отнесены аварии, представляющие собой наложение отказа элемента схемы сети на нарушение режима работы ее оборудования, которое устраняется устройствами релейной защиты и автоматики.

**Заключение.** Анализ по каскадным авариям позволил установить известную повторяемость не причин, а путей развития аварий, что дало основание для формирования показателей живучести. Общим для нарушения живучести и безотказности является первоначальный отказ – единичная авария. Показатели живучести единичных каскадных аварий могут нормироваться в пределах ЕЭС, что позволит оценивать уровень живучести в каждой конкретной энергосистеме. Методы исследования живучести электроэнергетической системы (ЭЭС) должны быть тесно увязаны с определением показателей живучести. Если под живучестью понимать как противостояние крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым отключением потребителей, то качество оперативно диспетчерского управления СПЭС, способствующее снижению или ограничению этому развитию, можно отнести к одному из основных факторов, определяющему живучесть СПЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Киргушин В.Г., Кобец Б.Б. К вопросу о формализации понятия живучести электроэнергетических систем//Сб. статей. Методические вопросы исследования больших систем энергетики Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1980 Вып. 20. С. 15-23
- 2 Воропай Н.И. О живучести ЭЭС // Надежность ЭЭС. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 2000
- 3 Воропай Н.И. и др. Модели и методы исследования режимной надежности ЭЭС // Надежность систем энергетики. Новосибирск: Наука, 2014
- 4 Алгоритмы живучести и самовосстановления интеллектуальной ЭЭС. Воропай Н.И. и др. ИСЭМ СО АН, 2015
- 5 Ушаков И.А. О живучести территориально распределенных систем // Сб. статей. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1980. Вып. 20. С.10-14.
- 6 Гук Ю.Б., Карпов В.В. Факторный ретроспективный анализ живучести // Сб. статей. Методические вопросы исследования больших систем энергетики. Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1980. Вып. 20. С.15-23.
- 7 Веников В.А., Фокин Ю.А., Пономаренко И.С., Харченко А.М. Исследование надежности систем электроснабжения // Электричество. 1988. № 3. С.1 –7.
- 8 Воропай Н.И., Микитов В.И., Руденко Ю.Н. Сравнительное исследование живучести условных вариантов развития электроэнергетических систем // Сб. статей. Методические вопросы исследования надежности систем энергетики. Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1980. Вып. 20.
- 9 Китушин В.Г., Кобец Б.Б., К вопросу о формализации понятия живучести электроэнергетических систем//Сб. статей. Методические вопросы исследования больших систем энергетики Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1980. Вып. 20. С.15-23.
- 10 Ершов М.С., Егоров А.В., Трифионов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. – 319 с.: ил.
- 11 Негвицкий М. и др. Интеллектуальная система для предотвращения крупных аварий в ЭЭС // Электричество, 2014
- 12 В.И. Свешников, Ф.А. Кушнарев. Надежность электроэнергетических систем при аварийном понижении частоты и напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1996. –160 с. ил.
- 13 Джумахамбетов Н.Г., Яшков В.А., Ершов М.С. Качество промышленного электроснабжения. -Германия, монография, изд-во «LAP», 2015. – 151с.
- 14 Яшков В.А., Сабирова Г.М., Гильманов Д.Н. Обеспечение живучести систем промышленного электроснабжения качеством оперативно-диспетчерского управления // Национальный конгресс по энергетике. Том IV 2014.

## REFERENCES

- 1 Kirtushin V.G., Kobets B.B. On the issue of formalization of the concept of survivability of electric power systems//Collection of articles. Methodological issues of the study of large energy systems Irkutsk: SEI SB of the USSR Academy of Sciences, 1980 Issue 20. pp. 15-23
- 2 Voropai N.I. About the survivability of the EES // Reliability of the EES. Reference book. Moscow: Energoatomizdat, 2000
- 3 Voropai N.I. et al. Models and methods of investigation of the regime reliability of the EES // Reliability of energy systems. Novosibirsk: Nauka, 2014
- 4 Algorithms of survivability and self-healing of intellectual EPS. Voropai N.I. et al. ISEM SO AN, 2015

5 Ushakov I.A. On the survivability of geographically distributed systems // Collection of articles. Methodological issues of reliability research of large power systems Irkutsk: SEI SB of the USSR Academy of Sciences. 1980. Issue 20. pp.10-14.

6 Guk Yu.B., Karpov V.V. Factor retrospective analysis of survivability // Collection of articles. Methodological issues of the study of large energy systems. Irkutsk: SEI SB of the USSR Academy of Sciences. 1980. Issue 20. pp.15-23.

7 Venikov V.A., Fokin Yu.A., Ponomarenko I.S., Kharchenko A.M. Study of reliability of power supply systems // Electricity. 1988. No. 3. pp. 1-7.

8 Voropai N.I., Mikitov V.I., Rudenko Yu.N. Comparative study of survivability of conditional variants of development of electric power systems // Collection of articles. Methodological issues of energy systems reliability research. Irkutsk: SEI SB of the USSR Academy of Sciences. 1980. Issue 20.

9 Kitushin V.G., Kobets B.B., On the question of formalization of the concept of survivability of electric power systems//Collection of articles. Methodological issues of the study of large energy systems Irkutsk: SEI SB of the USSR Academy of Sciences. 1980. Issue 20. C.15-23.

10 Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Stability of industrial electrotechnical systems. - M.: Publishing House Nedra LLC, 2010. - 319 p.: ill.

11 Negvitsky M. et al. Intelligent system for preventing major accidents in the power plant // Electricity, 2014

12 V.I. Sveshnikov, F.A. Kushnarev. Reliability of electric power systems in case of emergency lowering of frequency and voltage. - M.: Energoatomizdat, 1996. -160 p. il.

13 Dzhumamukhambetov N.G., Yashkov V.A., Ershov M.S. Quality of industrial power supply. -Germany, monograph, publishing house "LAP", 2015. - 151c.

14 Yashkov V.A., Sabirova G.M., Gilmanov D.N. Ensuring the survivability of industrial power supply systems by the quality of operational dispatch management // National Congress on Energy. Volume IV 2014.

***Н. Г. ЖҰМАМҰХАМБЕТОВ<sup>1</sup>, В. А. ЯШКОВ<sup>2</sup>, Д. Ұ. ҚҰЛЖАНОВ<sup>2</sup>,  
Н. М. СӘРСЕНОВ<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup>ҰАО С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті,  
Нұр-Сұлтан, Қазақстан*

*<sup>2</sup>ҰАО С.Утебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті,  
Атырау, Қазақстан*

*Қазақстан Республикасы Атырау өңірінің күрт континентальды климаты жағдайында электр беру жүйелерінің өміршеңдігі*

*Жұмыста өміршеңдік анықтамалары, персоналдың қате әрекеті және автоматты құрылғылардың сенімділігі төмен болған кезде орын алған каскадты авариялардың жіктелуі, өміршеңдік көрсеткіштері: каскадты авариялардың пайда болу ықтималдығы, кернеудің орташа ұзақтығы және орташа тереңдігі келтірілген. Басқару сапасы электр беру жүйелерінің өміршеңдігін анықтайтын факторлардың бірі болып табылатын қызметкерлердің сенімділік функциясы келтірілген.*

***Түйін сөздер:** каскадты авариялар, өміршеңдік, істен шығу, резервті автоматты қосу, жедел-диспетчерлік басқару, қысқа тұйықталулар, электр энергетикалық жүйе, каскадты авариялардың пайда болу ықтималдығы*

**N. G. DZHUMAMUKHAMBETOV<sup>1</sup>, V. A. YASHKOV<sup>2</sup>,  
D. U. KULZHANOV<sup>2</sup>, N. M. SARSYENOV<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>NAO S.Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

*<sup>2</sup>NAO Atyrau Utebayev University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan*

**SURVIVABILITY OF POWER TRANSMISSION SYSTEMS IN THE  
CONDITIONS OF THE SHARPLY CONTINENTAL CLIMATE  
OF THE ATYRAU REGION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

*The paper provides definitions of survivability, classification of cascade accidents that occur with erroneous actions of personnel and low reliability of automatic devices, survivability indicators: the probability of occurrence of cascade accidents, the average duration and average depth of voltage failures. The reliability function of personnel whose management quality is one of the factors determining the survivability of power transmission systems is given.*

**Key words:** *cascade accidents, survivability, failure, automatic activation of the reserve, operational dispatch control, short circuits, electric power system, probability of occurrence of cascade accidents.*