

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

УДК 621.316.925.1

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_04

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА  
ЛОГИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УСТРОЙСТВ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ****А.Л. Куликов**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
Ниžний Новгород, Россия  
ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

**А.А. Лоскутов**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
Ниžний Новгород, Россия  
ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

**А.Б. Лоскутов**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
Ниžний Новгород, Россия  
ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Представлена актуальная задача разработки новых методов цифровой релейной защиты, обладающих высокими показателями технического совершенства и полностью соответствующих требованиям стандарта МЭК 61850. Предлагается метод организации логической части многопараметрической релейной защиты, улучшающий ее чувствительность. Метод основан на критерии минимизации среднего риска принятия решения и решении задачи абстрактного синтеза теории автоматов. Рассмотрено применение предлагаемого метода на примере многомерной релейной защиты с пятью пусковыми органами и реализацией имитационного моделирования в программном комплексе *Matlab/Simulink*.

**Ключевые слова:** аварийные режимы, бинарные сигналы, короткое замыкание, критерий Байеса, логическая часть, моделирование, пусковой орган, релейная защита, синтез, чувствительность.

**Для цитирования:** Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Лоскутов А.Б. Метод автоматизированного синтеза логической части для повышения чувствительности устройств релейной защиты // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 4-16. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_04

# THE METHOD OF AUTOMATED SYNTHESIS OF LOGICAL PART TO INCREASE THE SENSITIVITY OF RELAY PROTECTION DEVICES

**A.L. Kulikov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

**A.A. Loskutov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

**A.B. Loskutov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

**Abstract.** The task of developing new methods of digital relay protection, which have high indicators of technical perfection and fully comply with the requirements of IEC 61850, is urgent. A method of organizing the logical part of multiparameter relay protection, improving its sensitivity, is proposed. The method is based on the criteria of minimizing the average risk of decision-making and solving the problem of abstract synthesis of automata theory. The application of the proposed method on the example of multidimensional relay protection with five measuring fault detector and the implementation of simulation in the *Matlab/Simulink* is considered.

**Keywords:** short circuit, relay protection, emergency modes, Bayes criterion, binary signals, logic part, synthesis, sensitivity, simulation, measuring fault detector.

**For citation:** A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and A.B. Loskutov, “The method of automated synthesis of logical part to increase the sensitivity of relay protection devices”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-16, 2021.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_04

## I. Введение

В соответствии с Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью [1], разработанной в 2011 г., и Концепцией цифровой трансформации электросетевого комплекса до 2030 года, утвержденной советом директоров ПАО «Россети» 21.12.2018 г. [2], требуется создание технологической, нормативной и производственной базы с целью массового внедрения в энергетическую

отрасль инновационного высокоэффективного продукта – необслуживаемых модульных самодиагностируемых электрических подстанций и станций («цифровых подстанций») [3].

Под цифровой подстанцией (ЦПС) понимается подстанция с высоким уровнем автоматизации управления технологическими процессами, оснащенная развитыми информационно-технологическими и управляющими системами и средствами (АСУТП / ССПИ, АИИС КУЭ, РЗА, ПА, РАС, ОМП и др.), в которой все процессы информационного обмена между элементами подстанции, с внешними системами, а также управление работой подстанции осуществляются в цифровом виде на основе протоколов МЭК. При этом и первичное силовое оборудование ЦПС, и компоненты информационно-технологических и управляющих систем должны быть функционально и конструктивно ориентированы на поддержку цифрового обмена данными. Предпочтительной является взаимная интеграция всех или части перечисленных ранее систем с обеспечением применения централизованных, децентрализованных и гибридных принципов построения систем защиты, управления и автоматики.

Массовый переход от электромеханической элементной базы на микропроцессорную создает предпосылки для разработки новых методов организации релейной защиты (РЗ) и повышения показателей технического совершенства. Несмотря на то, что цифровые технологии получают все большее распространение, в том числе и на подстанциях [4, 5], принципы функционирования РЗ, методы ее организации остаются в своем большинстве заимствованными от электромеханических реле.

Современные электрические сети представляют собой сложные, многоконтурные системы, в которых количество источников питания и новых активных элементов существенно увеличилось. Непрерывное развитие новых технологий (возобновляемые источники энергии, *FACTS* и другие), внедрение цифровой техники приводят к усложнению режимов энергетических систем и повышают требования к чувствительности РЗ.

## **II. Актуальность синтеза логической части устройств релейной защиты**

Проблема распознаваемости аварийных режимов, в большинстве случаев, существует в защитах дальнего резервирования. Причинами этого являются схожесть токов короткого замыкания (*KЗ*) за резервируемыми трансформаторами с токами нагрузки, бросками намагничивающих токов, токами пуска и самозапуска мощных электродвигателей и токами коммутации батарей конденсаторов. Также на чувствительность влияет наличие переходных сопротивлений в месте повреждения и малые уровни напряжения симметричных составляющих на шинах в месте установки защит при удаленных повреждениях [6].

Известны методы повышения распознаваемости аварийных режимов, основанные на применении многомерной (многопараметрической) РЗ [7-14]. Однако достижение высокой чувствительности этими методами связано с реализацией сложных процедур сопоставления областей нормальных и аварийных режимов многомерного пространства признаков срабатывания РЗ.

Следует отметить, что подходы для организации логической части «специальных схем защиты» (*Special Protection Schemes (SPS)*) [15] и «резервируемых защит» (*Protection Redundancy*) [16] используют избыточность для обеспечения высоких показателей технического совершенства и могут быть применены для повышения чувствительности многомерной (многопараметрической) РЗ.

### III. Цель исследования

Повышение чувствительности РЗ возможно за счет совместного использования более чем одного параметра (действующее значение тока, амплитуда напряжения и другие) как источника информации [7-14]. Для этого в терминале РЗ реализуется несколько одномерных пусковых органов (ПО). Однако важным является способ объединения сигналов отдельных ПО, который увеличивает распознаваемость аварийных режимов. При этом за счет сочетания сигналов на выходах отдельных ПО и эффекта многомерности может быть достигнуто увеличение чувствительности РЗ.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка автоматизированного метода организации логического органа (ЛО) РЗ для объединения результатов функционирования отдельных ПО в интересах повышения чувствительности многомерной РЗ.

Для реализации предлагаемого технического решения используются статистический подход, включающий формирование законов распределения признаков срабатывания РЗ, критерий минимизации среднего риска принятия решения, а также методы дискретной математики и теории автоматов.

### IV. Постановка задачи

Средствами накопления статистических данных для «обучения» релейной защиты служат имитационные модели энергообъектов [17]. Для реализации нового метода цифровой РЗ, основанного на статистическом подходе, необходимо знать вероятностные характеристики каждого ПО в отдельности [7]. Для этого исследуется имитационная модель смежной воздушной линии (ВЛ 2) электропередачи 220 кВ с учетом размещения РЗ в начале ВЛ1 (рис. 1), реализованная в *Matlab/Simulink* (рис. 2).

Для получения требуемой статистики по режимам работы модели сети параметры элементов необходимо разделить на фиксированные и интервальные (табл. 1), варьируемые в заданных диапазонах. Индексами «1»

и «0» отмечены параметры прямой и нулевой последовательностей.

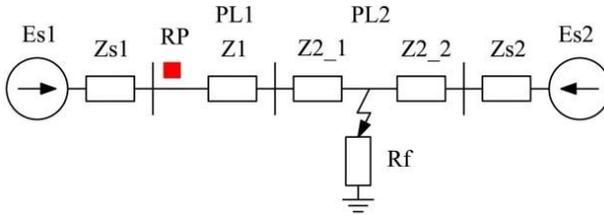


Рис. 1. Схема замещения моделируемого участка сети  
Fig. 1. Equivalent circuit of the simulated network section

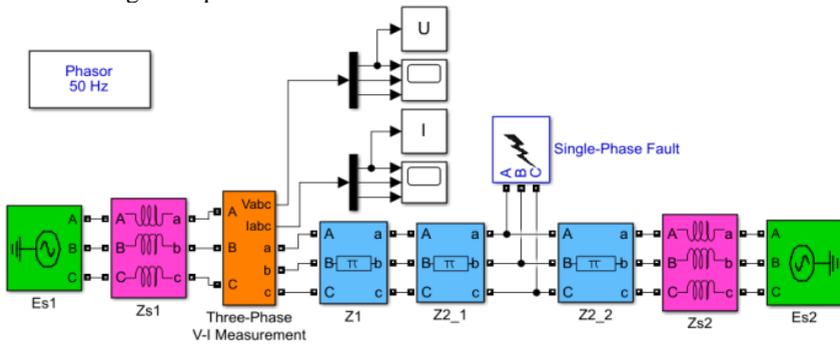


Рис. 2. Имитационная модель участка сети в Matlab/Simulink  
Fig. 2. Simulation model of a network section in Matlab / Simulink

Таблица 1.  
Параметры элементов модели

Table 1.  
Parameters of model elements

Фиксированные		Интервальные		Интервальные		Интервальные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$U_{\text{ном}}$ , кВ	220	$R_1^{1,2}$ , Ом/км	0,13 ( $\pm 0,1$ )	$X_1^{s1}$ , Ом	37,1 ( $\pm 2$ )	$\delta$ , °	-20°... 20°
$L_1$ , км	100	$R_0^{1,2}$ , Ом/км	0,28 ( $\pm 0,1$ )	$X_0^{s1}$ , Ом	35 ( $\pm 2$ )	$K_1$	0,95...1,05
$L_2$ , км	80	$X_1^{1,2}$ , Ом/км	0,43 ( $\pm 0,2$ )	$R_1^{s2}$ , Ом	8,37 ( $\pm 1$ )	$K_2$	0,95...1,05
$b_1^{1,2}$ , См/км	$j2,58 \cdot 10^{-6}$	$X_0^{1,2}$ , Ом/км	0,1328 ( $\pm 0,2$ )	$R_0^{s2}$ , Ом	5,13 ( $\pm 1$ )	$R_f$ , Ом	0,1...40
$b_0^{1,2}$ , См/км	$j1,78 \cdot 10^{-6}$	$R_f^{s1}$ , Ом	9,3 ( $\pm 1$ )	$X_1^{s2}$ , Ом	33,48 ( $\pm 2$ )	$I_{\text{line}}$	0,0001...0,9999
$U_{\text{ном}}$ , кВ	220	$R_0^{s1}$ , Ом	5,7 ( $\pm 1$ )	$X_0^{s2}$ , Ом	31,5 ( $\pm 2$ )		

В табл. 1 вошли следующие коэффициенты, задающие диапазон изменения напряжения энергосистем и угла фазового сдвига между ними:

$$k_1 = \frac{E_{s1}}{U_{ном}}; k_2 = \frac{E_{s2}}{U_{ном}}; \delta = \arg \frac{E_{s1}}{E_{s2}}. \quad (1)$$

При моделировании проводилось 10 000 итераций однофазных коротких замыканий вдоль смежной линии электропередачи (ВЛ2).

Защита РЗ должна быть чувствительна при однофазных КЗ в резервной зоне (зона ВЛ2). Моделирование проведено с учетом пяти одномерных пусковых органов исследуемой РЗ: ПО1 – по абсолютному значению тока; ПО2 – по абсолютному значению напряжения; ПО3 – по фазе между током и напряжением; ПО4 – по реактивной мощности; ПО5 – по активной мощности. Для отображения измерений РЗ по каждому ПО были построены графики плотности вероятности распределения параметров режимов (рис. 3). На этих графиках горизонтальные оси представляют собой измерения наблюдаемых параметров ПО в допустимых и аварийных режимах в резервной зоне (смежной линии ВЛ2). В зависимости от чувствительности ПО большей или меньшей будет степень пересечения плотностей вероятности допустимых и аварийных режимов. Это определяет возможности по распознаванию текущего режима РЗ.

#### **V. Предлагаемый метод**

Для объединения сигналов от различных ПО предполагается сведение задачи распознавания аварийных режимов каждого ПО к бинарной (двухгипотезной) статистической задаче [11-14]. При этом осуществляется проверка двух гипотез:  $H_0$  – означает, что на вход ПО поступил измеряемый сигнал, характерный для нормального режима (на выходе выдается логический 0);  $H_1$  – означает, что на вход ПО поступил измеряемый сигнал, характерный для аварийного режима (на выходе выдается логическая 1).

#### **VI. Определение параметров срабатывания РЗ для областей допустимых и аварийных режимов**

Правильное решение бинарной задачи может обеспечить соответствующее задание уставочных значений, разделяющих области допустимых и аварийных режимов. Главным требованием при определении уставок является недопущение срабатывания защиты во всех возможных нормальных режимах (рис. 3) [11-14]. Байесовский критерий принятия решений позволяет обеспечить полную отстройку от всех допустимых режимов [18]. Для каждого ПО были определены и проверены гипотезы: если измерение попадает в область допустимых режимов, то принимается гипотеза  $H_0$ ; если измерение попадает в область аварийных режимов (факт наличия КЗ), то принимается гипотеза  $H_1$ .

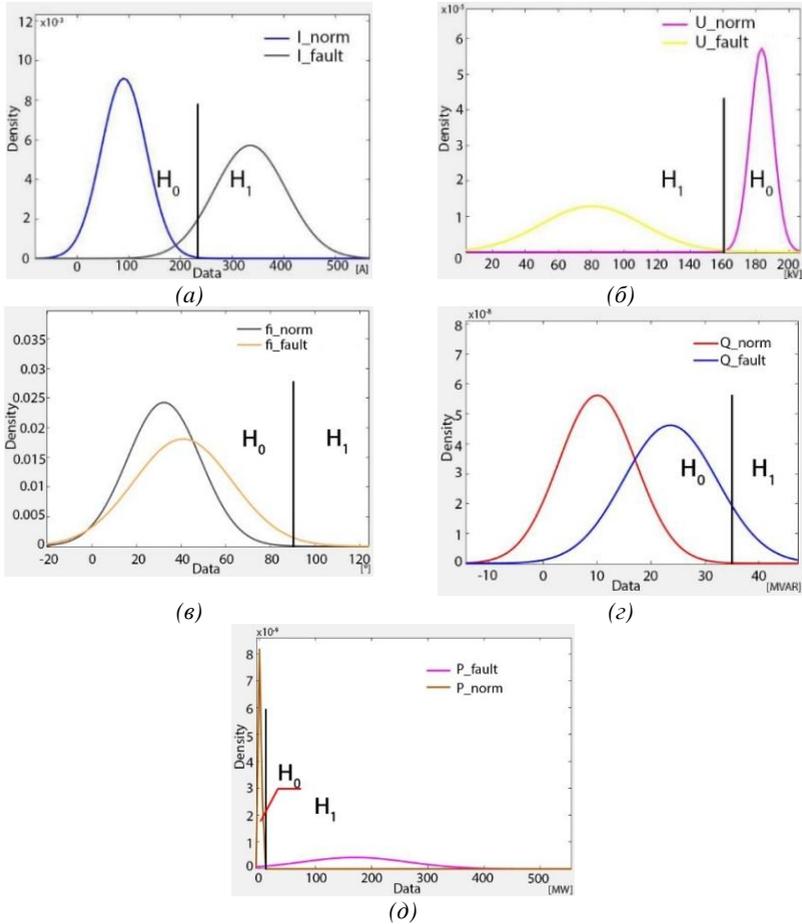


Рис. 3. Определение уставочных значений при Байесовском критерии принятия решений:

ПО1 – по абсолютному значению тока (а), ПО2 – по абсолютному значению напряжения (б), ПО3 – по фазе между током и напряжением (в), ПО4 – по реактивной мощности (г), ПО5 – по активной мощности (д)

Fig. 3. Determination of setpoints with Bayesian decision criterion:

PO1 – by the absolute value of the current (a), PO2 – by absolute voltage value (б), PO3 – by phase between current and voltage (в), PO4 – by reactive power (г), PO5 – by active power (д)

Выбор параметров срабатывания позволяет оценить уровень чувствительности каждого ПО. При этом  $p_1$  – это вероятность срабатывания РЗ

при КЗ. Вероятность того, что РЗ не сработает при КЗ, равна  $q_1 = 1 - p_1$ . Согласно основному требованию при выборе уставок (недопущение срабатывания защиты в нормальных режимах) вероятность срабатывания РЗ при гипотезе  $H_0$  равна  $p_0 = 0$ , а вероятность несрабатывания при гипотезе  $H_0$  равна  $q_0 = 1$ . Вероятности распознавания каждым ПО при заданных уставочных значениях сведены в табл. 2.

Таблица 2.  
Вероятности чувствительности пусковых органов

Table 2.  
Probabilities of the sensitivity of the measuring fault detectors

Пусковой орган	Параметр	$p_1$ (о.е.)	$p_1$ (%)	$q_1$ (о.е.)	$q_1$ (%)
ПО1 – по абсол. значению тока	$I_m$	0,8801	88,01	0,1199	11,99
ПО2 – по абсол. значению напряжения	$U_m$	0,9893	98,93	0,0107	1,07
ПО3 – по фазе между током и напряжением	$\varphi$	0,02	2	0,98	98
ПО4 – по реактивной мощности	$Q$	0,0799	7,99	0,9201	92,01
ПО5 – по активной мощности	$P$	0,7358	73,58	0,2642	26,42

## VII. Метод объединения сигналов ПО для повышения чувствительности РЗ

Предложенный метод организации ЛО основан на применении теории автоматов и включает решение задачи абстрактного синтеза конечного дискретного автомата [19]. Целесообразно организовать ЛО из двух сегментов. К первому относятся  $2^p - 1$  логических элементов ( $p$  – количество ПО). Второй сегмент представлен одним логическим элементом «ИЛИ». В состав операций элементов первого сегмента входит логическое отрицание («НЕ») и логическое умножение («И»). Каждый логический элемент первого сегмента включает совокупность прямых и инверсных входов. Для пяти ПО их число составляет  $2^5 - 1 = 31$ , вместо  $2^5 = 32$ , потому что отсутствует логический элемент «И» со всеми инверсными входами. Входная комбинация из одних нулей от ПО1-ПО5 существует только в нормальных режимах, поэтому соответствующий логический элемент в схеме на рис. 4 отсутствует.

Число возможных сочетаний бинарных сигналов ПО равно  $2^p$ . Для случая использования пяти ПО число комбинаций равно 32. Комбинации могут иметь произвольное число нулей и единиц. Например, первая комбинация – это комбинация всех нулей, последняя – всех единиц, а остальные все возможные комбинации – нули и единицы (табл. 3).

Предположим, что  $X_i = (X_1^i, X_2^i, \dots, X_k^i, \dots, X_p^i)$  – это вектор, представляющий собой совокупность бинарных случайных величин (0 или 1) с выхода каждого ПО. В зависимости от логического элемента в первом сегменте соответствующие сигналы из выборки вектора  $X_i$  сначала будут преобразованы (инвертированы), а потом объединены (операция «И»). Выходные сигналы логических элементов первого сегмента объединяются внутри второго сегмента по правилу «ИЛИ». Вектор выходных сигналов автоматов первого сегмента отображается как  $Y_i = (y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_m)$ , где  $i = 1 \dots n$ ,  $k = 1..m$ ,  $n$  – количество наблюдаемых режимов (итераций),  $m = 2^P - 1$  – количество логических элементов первого сегмента. Выход автомата второго сегмента дает ожидаемый сигнал, необходимый для принятия решения – «1» или «0» (срабатывание или не срабатывание РЗ). Структурная схема логической части объединения сигналов, реализующая алгоритм, изображена на рис. 4.

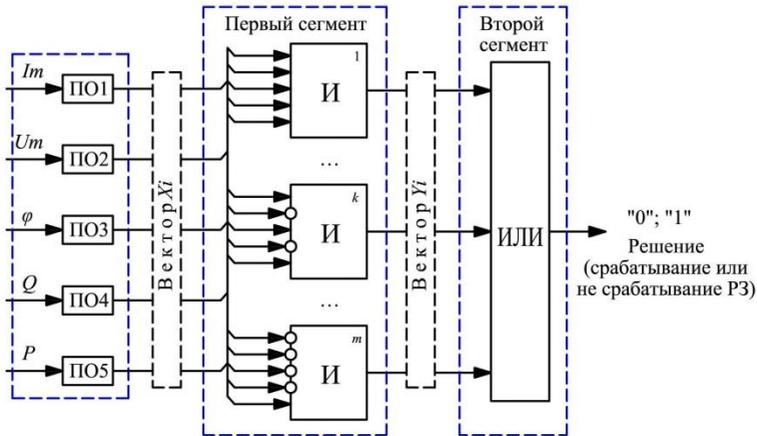


Рис. 4. Структурная схема логической части объединения сигналов ПО  
Fig. 4. Block diagram of the logical part of combining the signals of measuring fault detectors

Анализ работы логической части (рис. 4) показал, что при такой организации логики РЗ срабатывание хотя бы одного пускового органа, который отстроен от нормального режима, приводит к срабатыванию устройств РЗ. При этом чувствительность устройства РЗ будет определяться наибольшей чувствительностью из набора ПО1 - ПО5. Дополнительно возможно повышение надежности. Варьируя условия срабатывания ПО, можно добиться требуемых эксплуатационных показателей и адаптировать функционирование устройств РЗ к схемно-режимной ситуации.

Таблица 3.  
Возможные сочетания бинарных сигналов от ПО

Table 3.  
Possible combinations of binary signals from measuring fault detectors

№ комбинации	ПО1 – по абсолютному значению тока	ПО2 – по абсолютному значению напряжения	ПО3 – по фазе между током и напряжением	ПО4 – по реактивной мощности	ПО5 – по активной мощности
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	1
...	...	...	...	...	...
31	1	1	1	1	0
32	1	1	1	1	1

### VIII. Выводы

Предложен метод организации логического органа многопараметрической релейной защиты с целью улучшения чувствительности. Метод основан на результатах имитационного моделирования, критерии Байеса и теории автоматов.

Рассмотренный пример многомерной РЗ с пятью ПО показал, что при применении разработанного метода объединения бинарных сигналов вероятность распознавания КЗ с переходным сопротивлением в резервной зоне РЗ увеличилась с 98,93 % (по ПО2 табл. 2) до 99,99 % по сравнению с самым чувствительным пусковым органом.

Предложенный метод обеспечил увеличение распознаваемости КЗ в резервной зоне защиты с 2 % до 99,99 % по сравнению с традиционным объединением бинарных сигналов логической операцией «И».

Модельные эксперименты обосновали использование многомерности с целью улучшения чувствительности РЗ и подтвердили положительный эффект от нового подхода к организации логической части многомерной РЗ.

© Куликов А.Л., 2021

© Лоскутов А.А., 2021

© Лоскутов А.Б., 2021

Поступила в редакцию 27.08.2021

Received 27.08.2021

### Библиографический список

- [1] Фортов В.Е., Макаров А.А. Концепция интеллектуальной энергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: НТЦ ФСК ЕЭС, 2012. – 235 с.

- [2] Концепция «Цифровая трансформация 2030». [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosseti.ru/investment/Kontsepsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/investment/Kontsepsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf) (дата обращения 05.07.2021).
- [3] Зинин В.М., Подлесный А.М., Карантаев В.Г. Цифровая подстанция – объект критической инфраструктуры // Автоматизация и IT в энергетике. 2017. № 4 (93). С. 28-32.
- [4] Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-27. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_1\_9
- [5] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Пелевин П.С. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов // Электричество. 2018. № 3. С. 11-17. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-3-11-17
- [6] Нагай И.В., Нагай В.И. Построение многопараметрических резервных защит электрических распределительных сетей 6–110 кВ // Энергетик. 2013. № 2. С. 18-21.
- [7] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В., Кержаев Д.В., Романов Ю.В. Многомерная релейная защита. Ч. 1. Теоретические предпосылки // Электричество. 2009. № 10. С. 17-25.
- [8] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалина И.С., Романов Ю.В. Эффекты многомерности в релейной защите // Электричество. 2011. № 9. С. 48а-54.
- [9] Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В., Воронов П.И. Обучаемая релейная защита. Ч. 2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры // Электричество. 2012. № 3. С. 12-18.
- [10] Иванов С.В., Лямец Ю.Я. Метод информационного анализа. Ч. 2. Распознавание замыканий в заданной зоне двухцепной электропередачи // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2016. № 1. С. 47-57.
- [11] Шарьгин М.В., Куликов А.Л. Объединение сигналов совокупности отдельных пусковых органов релейной защиты // Электрические станции. 2018. № 9 (1046). С. 42-49.
- [12] Куликов А.Л., Шарьгин М.В. Применение статистических критериев распознавания режима релейной защиты сетей электроснабжения // Электротехника. 2019. № 2. С. 58-64.
- [13] Sharygin M.V., Kulikov A.L. Statistical methods of mode recognition in relay protection and automation of power supply networks // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. No. 2. P. 235-241. DOI: 10.1007/s10749-018-0938-9
- [14] Лоскутов А.А., Пелевин П.С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // Электричество. 2020. № 5. С. 12-18. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [15] McCalley J., Oluwaseyi O., Krishnan V., Dai R., Singh C., Jiang K. System protection schemes: limitations, risks, and management. Final project report. PSERC project S-35. PSERC, 2010. – 136 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1946.3842
- [16] Protection System Reliability. Redundancy of Protection System Elements. North American electric reliability corporation. A Technical Paper. 2008. – 59 p.
- [17] Kulikov A.L., Loskutov A.A., Mitrovic M. Method of automated synthesis of the logic part of relay protection device which increases its sensitivity // IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643, 012124. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012124

- [18] Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. М.: Советское радио, 1972. – 744 с.
- [19] Гуренко В.В. Введение в теорию автоматов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 63 с.

### References

- [1] V.E. Fortov and A.A. Makarov, *Koncepciya intellektual'noj energeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoy set'yu [The concept of an intelligent energy system in Russia with an active-adaptive grid]*. Moscow: JSC FGC UES, 2012 (in Russian).
- [2] *Koncepciya «Cifrovaya transformatsiya 2030» [Concept “Digital Transformation 2030”]*. [Electronic resource]. [Online]. Available at: [https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf). [Accessed: May 5, 2021] (in Russian).
- [3] V.M. Zinin, A.M. Podlesny, V.G. Karantaev. “Digital substation - object of critical infrastructure”, *Avtomatizatsiya i IT v Energetike [Automation and IT in the energy sector]*, no. 4 (93), pp. 28-32, 2017 (in Russian).
- [4] Loskutov A.B. “Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1 (1), pp. 9–27, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_1\_9
- [5] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and P.S. Pelevin, “Algorithm for identifying the faulty section in combined cable and overhead power lines based on surge portrait recognition”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 11–17, 2018. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-3-11-17
- [6] I.V. Nagay and V.I. Nagay, “Postroyeniye mnogoparametricheskikh rezervnykh zashchit elektricheskikh raspredelitel'nykh setey 6–110 kV [Construction of multi-parameter backup protections for electrical distribution networks 6-110 kV]”, *Energetik*, no. 2, pp 18-21, 2013 (in Russian)
- [7] Yu.Ya. Lyamets, G.S. Nudel'man, D.V. Zinov'yev, D.V. Kerzhayev and Yu.V. Romanov, “Mnogomernaya reley'naya zashchita. Ch.1. Teoreticheskiye predposylki [Multidimensional relay protection. Part 1. Theoretical background]”, *Elektrichestvo*, no. 10, pp. 17-25, 2009 (in Russian).
- [8] Yu.Ya. Lyamets, G.S. Nudel'man, I.S. Podshivalina and Yu.V. Romanov, “Effekty mnogomernosti v reley'noy zashchite [Effects of multidimensionality in relay protection]”, *Elektrichestvo*, no. 9, pp. 48a-54, 2011 (in Russian)
- [9] Yu.Ya. Lyamets, M.V. Martynov, G.S. Nudel'man, Yu.V. Romanov and P.I. Voronov, “Obuchayemaya reley'naya zashchita. Ch. 2. Informatsionnyy portret mnogo-modul'noy raspoznayushchey struktury [Teachable relay protection. Part 2. Information portrait of a multi-module recognizing structure]”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 12–18, 2012 (in Russian)
- [10] S.V. Ivanov and Y.Y. Lyamets, “Informational analysis method. P. 2. Fault identification in a given zone of double-circuit power line”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 47–57, 2016.
- [11] M.V. Sharygin and A.L. Kulikov, “Combining the signals of a set of separate relay protection starters”, *Electrical stations*, no. 9, pp. 42–49, 2018.

- [12] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Using of statistical criteria for recognition of regimes of relay protection of power supply systems", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 58–64, 2019.
- [13] M.V. Sharygin and A.L. Kulikov, "Statistical methods of mode recognition in relay protection and automation of power supply networks", *Power Technology and Engineering*, vol. 52, no. 2, pp. 235-241, 2018. DOI: 10.1007/s10749-018-0938-9
- [14] A.A. Loskutov, P.S. Pelevin and M. Mitrovich, "Development of the logic part for intelligent multiparametric relay protection", *Elektrichestvo*, no. 5. pp. 12–18, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [15] J. McCalley, O. Oluwaseyi, V. Krishnan, R. Dai, C. Singh and K. Jiang, "System protection schemes: limitations, risks, and management", PSERC, USA, Final project report. PSERC project S-35, 2010. DOI: 10.13140/RG.2.1.1946.3842
- [16] "Protection System Reliability. Redundancy of Protection System Elements", North American electric reliability corporation. Technical Paper, 2008.
- [17] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and M. Mitrovic, "Method of automated synthesis of the logic part of relay protection device which increases its sensitivity", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 643, paper no. 012124, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012124
- [18] H. Van Trees, *Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsii. Tom 1. Teoriya obnaruzheniya, otsenok i lineynoy modulyatsii [The theory of detection, estimation and modulation. Vol. 1. Detection, Estimation and Linear Modulation Theory]*. Moscow: Sovetskoye radio, 1972 (in Russian).
- [19] V.V. Gurenko, *Vvedeniye v teoriyu avtomatov [Introduction to automata theory]*. Moscow: MGТУ n.a. N.E. Bauman, 2013 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Куликов Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Лоскутов Антон Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Лоскутов Алексей Борисович**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Aleksandr L. Kulikov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Anton A. Loskutov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Aleksey B. Loskutov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.