

УДК 621.316

Савина Наталья Викторовна

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

e-mail: nataly-savina@mail.ru**Ялама Дмитрий Евгеньевич**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия

e-mail: yaldischool@mail.ru**Savina Natalia Victorovna**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: nataly-savina@mail.ru**Yalama Dmitry Evgenievich**

Amur State University

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: yaldischool@mail.ru

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**IMPROVING THE RELIABILITY OF SWITCHGEARS OF ELECTRIC
POWER PLANTS BY IMPLEMENTING SMART TECHNOLOGIES**

Аннотация. В статье рассмотрен вариант повышения надежности функционирования распределительных устройств электрических станций путем их цифровизации. Аналитическим методом произведен расчет показателей надежности при традиционном и цифровом исполнении РУ.

Abstract. The article discusses the option of increasing the reliability of operation of switchgears of power plants through their digitalization. The analytical method was used to calculate reliability indicators for traditional and digital versions of the switchgears.

Ключевые слова: надежность, цифровизация, аналитический метод, недоотпуск электроэнергии, технологии, энергосистема.

Key words: reliability, digitalization, analytical method, undersupply of electricity, technologies, power system.

Введение

Генерация электроэнергии в России по итогам 2023 г. достигла 1151,6 млрд. кВт·ч, поднявшись на 1,1% относительно 2022-го. В целом за 2023 г. чистый прирост установленной мощности составил 563,11 МВт. По данным Минэнерго РФ, электропотребление в Рос-

сии в 2023 г. выросло на 1,4% – до 1140 млрд. кВт·ч. На 2024 год ведомство также прогнозирует рост электропотребления на 1,4-2% [7]. Прогноз динамики потребления электроэнергии по ЕЭС России на 2023-2028 гг. представлен на рис. 1. Как показал анализ, рост электропотребления в ощутимой мере опережает прирост генерации электроэнергии, в то время как существующая энергетическая инфраструктура в большинстве случаев перегружена, что усугубляет проблему обеспечения надежности электроснабжения.

Кроме того, более чем у половины используемого оборудования нормативный срок службы истек, что указывает на высокую вероятность его отказа. С экономической и технической точек зрения, невозможно одновременно заменить всё оборудование, что усугубляет проблему нормального функционирования энергетического сектора [1].

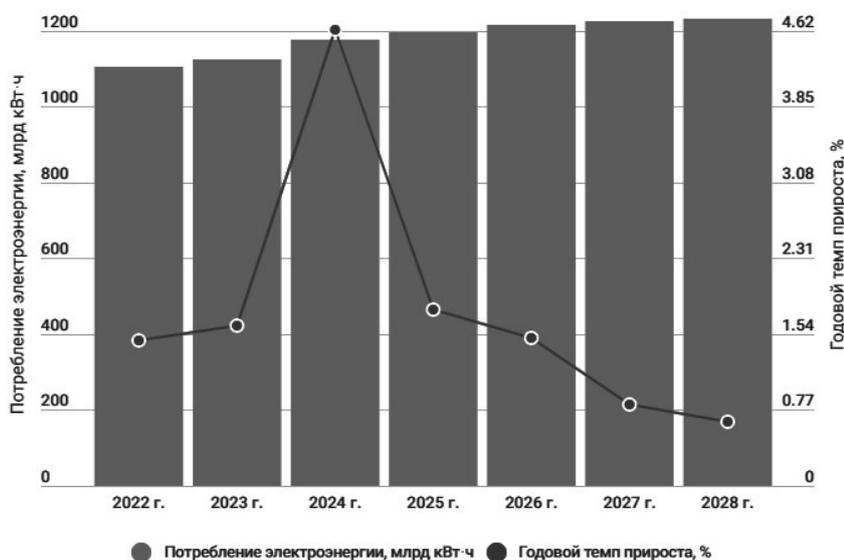


Рис. 1. Прогноз динамики потребления электроэнергии по ЕЭС России на 2023-2028 гг.

В качестве примера приведены данные об отказах на Бурейской ГЭС. За прошедшие 10 лет среднегодовое число дефектов составило более 70, а количество отказов оборудования по различным причинам – 16. Кроме того, примерно 30% вынужденных остановок энергоблоков на ГЭС связано с отказом оборудования в распределительных устройствах. Основная часть технологических нарушений наблюдается у электромеханического оборудования, около трети связано с тепломеханическим оборудованием, а остальные случаи обусловлены отказами устройств релейной защиты, автоматики и управления [6]. Отсюда следует, что повышение надежности функционирования распределительных устройств способно в ощутимой мере повысить надежность функционирования электрической станции в целом, а также электроснабжения потребителей.

В данной статье будем говорить о повышении надежности открытых распределительных устройств электрических станций за счет применения цифровых технологий.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

1) выбран метод расчета показателей надежности распределительных устройств электрических станций и его реализация на примере типового распределительного устройства;

2) выбраны цифровые технологии, обеспечивающие существенное повышение надежности распределительных устройств электрических станций;

3) оценена надежность типовых распределительных устройств с применением цифровых технологий на примере открытого распределительного устройства 220 кВ.

Выбор метода расчета показателей надежности распределительных устройств электрических станций и его реализация на примере типового распределительного устройства

Существует множество расчетных методов оценки уровня надежности – графический, на основе булевой алгебры, табличные. В данной статье оценка уровня надежности производится аналитическим методом, который нашел широкое применение в инженерной практике и основан на использовании теории вероятностей. Аналитический метод позволяет количественно оценить надежность электрической схемы любой сложности. Его сущность – определение количественных вероятностных значений показателей надежности для расчета случаев, к которым относятся: полное погашение схемы (состояние полного отказа), разрыв транзита; оценка возможных недоотпусков электроэнергии при частичных отказах схемы [2].

Реализация данного метода показана на примере типовой схемы распределительного устройства 220 кВ, как наиболее распространенной для электрических станций [8].

В соответствии с аналитическим методом составляется расчетная схема оценки надежности выдачи мощности в систему, приведенная на рис. 2.

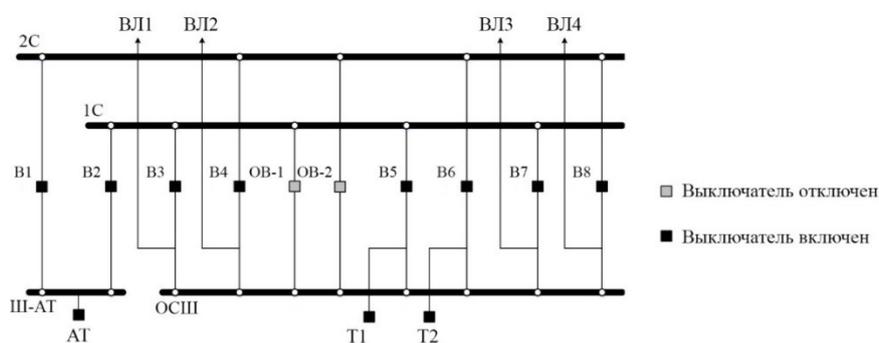


Рис. 2. Расчетная схема для оценки выдачи мощности в систему.

По расчетной схеме составляется схема замещения (рис. 3.).

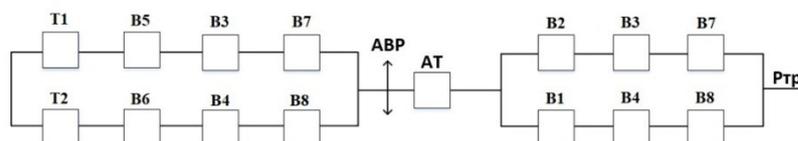


Рис. 3. Схема замещения.

Далее по алгоритму метода параллельно и последовательно соединенные элементы или цепочки схемы замещения заменяются одним эквивалентным, для которого определяют параметр потока отказа λ , время восстановления $t_{вс}$, вероятность отказа q_c . Показатели надежности выключателя определены по модели выключателя, с учетом смежных элементов.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока схема замещения не будет сведена к одному элементу. Основные этапы преобразования схемы замещения – на рис. 4 и 5.

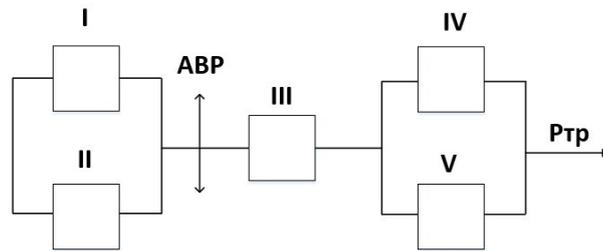


Рис. 4. Преобразование схемы замещения (этап 1).

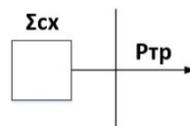


Рис. 5. Преобразование схемы замещения (этап 2).

Далее производится расчет основных показателей надежности элементов схемы замещения для выбранного расчетного случая по следующим формулам.

Последовательно соединение элементов схемы

Параметр потока отказов схемы с учетом преднамеренных отключений

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_i + \lambda_{np, нб}$$

(1)

Вероятность отказа схемы

$$q_c = \sum_1^n \lambda_i \cdot t_{Bi}$$

(2)

Среднее время восстановления схемы

$$\bar{t}_{Bc} = q_c / \lambda_c$$

(3)

Параллельное соединение элементов схемы

Параметр потока отказов схемы

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_i \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (\lambda_j t_{Bj} + \lambda_{npj} t_{npj}) \tag{4}$$

Средняя вероятность состояния отказа схемы

$$q_c = K_{II.C} = \prod_{i=1}^n \lambda_i \bar{t}_{Bi} + \prod_{i=1}^n K_{npi} \lambda_{npi} \bar{t}_{npi} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \lambda_j \bar{t}_{Bj} \tag{5}$$

$$K_{np} = 1 - e^{-\bar{t}_{npi} / \bar{t}_{Bжкв}} \tag{6}$$

Среднее время безотказной работы схемы

$$\bar{T}_c = \frac{1}{\lambda_c} \quad (7)$$

Расчетное время безотказной работы схемы при $\alpha = 0,1$

$$\bar{T}_p = -\ln(1-\alpha)\bar{T} \quad (8)$$

Среднее время восстановления схемы определяется по формуле (3).

Математическое ожидание количества недоотпуска электроэнергии в систему

$$W_{нед} = \bar{P}_{деф.р} p(\bar{P}_{деф.и})T \quad (9)$$

Для расчета надежности использовались справочные и эксплуатационные данные по надежности традиционного коммутационного оборудования, силовых трансформаторов и автотрансформатора связи, измерительных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, приведенные в табл. 1. Условные обозначения показателей надежности приняты по [2]. В табл. 1 также приведены результаты расчета показателей надежности ОРУ 220 кВ.

Таблица 1

Показатели надежности элементов и ОРУ-220 кВ

Параметр	Элемент								Система
	T_1, T_2	AT	B_{T1}	B_{T2}	B_{AT1}	B_{AT2}	$B_{БЛ1}, B_{БЛ2}$	$B_{БЛ3}, B_{БЛ4}$	ОРУ-220 кВ
$\lambda, \frac{1}{год}$	0,04	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	$14,81 \cdot 10^{-2}$
$\bar{t}_e, ч$	30	30	15	15	15	15	15	15	0,59
$\lambda_{np}, \frac{1}{год}$	0,086	0,086	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
$\bar{t}_{np}, ч$	80	80	65	65	65	65	65	65	
q_c									$9,96 \cdot 10^{-6}$
T_c									6,75
$T_{p c}$									0,7

Выбор цифровых технологий для повышения надежности электрических станций

В качестве альтернативы предлагается в типовом РУ 220 кВ вместо электромагнитных трансформаторов тока и напряжения применить высокоточные оптические комбинированные датчики тока и напряжения [9], вместо традиционных силовых выключателей – выключатели с цифровым управлением, ввести цифровую систему мониторинга состояния и самодиагностики. Предлагаемое цифровое оборудование существенно превосходит традиционное по показателям надежности, а также открывает доступ для использования широкого ряда других цифровых технологий, одной из которых является технология цифрового двойника – комплексного цифрового решения автоматизации планирования, мониторинга и самодиагностики режимов работы распределительных устройств электрических станций. В основе данной технологии заложена математическая модель станции, включающая технологию

ческую схему производства со всеми технологическими связями, особенностями и ограничениями режима, состоянием оборудования с привязкой к договорам на продажу электрической энергии. Таким образом, цифровой двойник позволяет решать не только технологические задачи оптимального распределения нагрузки и состояния оборудования в реальном времени, но и экономические, включая поиск оптимальных режимов работы, обеспечивающих получение максимума маржинальной прибыли [5].

Тогда РУ будет представлять собой единую экосистему передачи и обработки информации, а также самодиагностики, с высоким классом точности, что в свою очередь способствует повышению уровня надежности [3].

Применение данных цифровых технологий имеет ряд преимуществ [4]:

- 1) отсутствие эффекта насыщения у измерительных трансформаторов позволяет повысить эффективность алгоритмов защиты;
- 2) отсутствие масла в конструкции, не требующей обслуживания чувствительного элемента, способствует повышению безопасности персонала и инфраструктуры;
- 3) стабильно высокая точность оптических трансформаторов тока и напряжения, возможность высокой частоты дискретизации для записи переходных процессов;
- 4) может содержать встроенные измеритель мощности и качества электроэнергии;
- 5) переход от передачи информации по аналоговым и дискретным схемам к передаче информации в цифровом виде;
- 6) повышение качества обработки аналоговых сигналов для устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики;
- 7) единая надежная информационная среда электростанции;
- 8) расширенная диагностика и своевременный контроль работы оборудования;
- 9) снижение эксплуатационных расходов.

Комбинированный датчик тока и напряжения представлен на рис. 6.

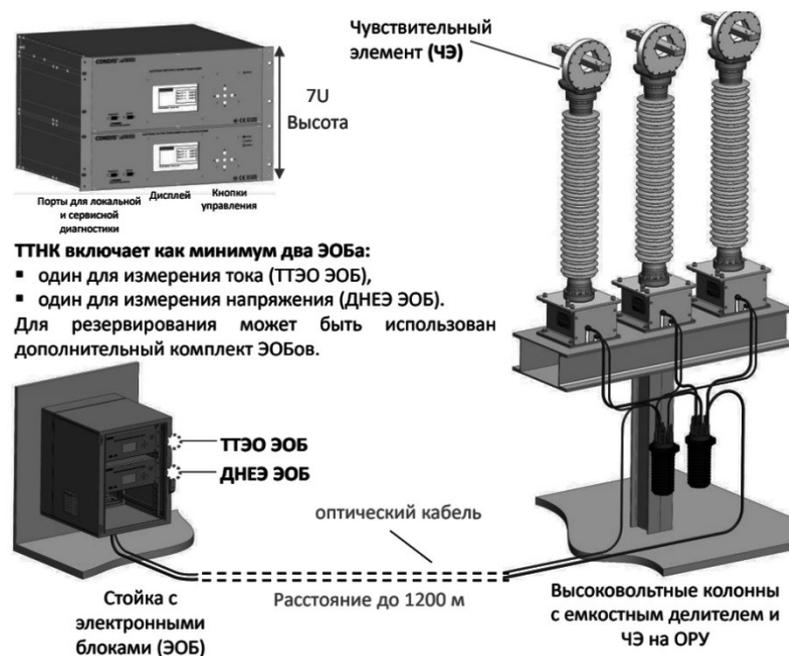


Рис. 6. Комбинированный датчик тока и напряжения.

**Расчет надежности типового распределительного устройства,
выполненного с применением цифровых технологий**

Цифровые технологии, принятые в схеме типового распределительного устройства, существенно улучшают показатели надежности его элементов, что видно из табл. 2. Показатели надежности элементов ОРУ с применением цифровых технологий приняты по [5]. Алгоритм расчета надежности не меняется, результаты расчета показателей надежности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели надежности элементов и цифрового ОРУ-220 кВ

Параметр	Элемент								Система ОРУ-220 кВ
	$T_1,$ T_2	AT	B_{T1}	B_{T2}	B_{AT1}	B_{AT2}	$B_{ВЛ1}$, $B_{ВЛ2}$	$B_{ВЛ3}$, $B_{ВЛ4}$	
$\lambda, \frac{1}{200}$	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	$14,23 \cdot 10^{-2}$
$\bar{t}_g, ч$	30	30	10	10	10	10	10	10	0,103
$\lambda_{np}, \frac{1}{200}$	0,086	0,086	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
$\bar{t}_{np}, ч$	80	80	60	60	60	60	60	60	
q_c									$1,68 \cdot 10^{-6}$
T_c									7,02
$T_{p c}$									0,73

Снижение математического ожидания количества недоотпуска электроэнергии в систему при применении цифровых технологий определяется по формуле

$$\Delta W_{нед} = \frac{W_{нед1} - W_{нед2}}{W_{нед1}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

Результаты расчетов математического ожидания количества недоотпуска электроэнергии в систему при выполнении ОРУ в традиционном и цифровом формате приведены в табл. 3. Здесь же показано снижение количества недоотпуска электроэнергии в систему при переходе на цифровые технологии.

Таблица 3

Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии в систему

Тип исполнения ОРУ 220 кВ	Недоотпуск электроэнергии в систему, $W_{нед.}$ МВт·ч	Ожидаемое сокращение недоотпус- ка электроэнергии в систему, %
Традиционный	314,09	83
Цифровой	52,98	

Расчетное значение ожидаемого сокращения недоотпуска электроэнергии составляет 83%, что свидетельствует о целесообразности применения выбранных цифровых технологий для повышения надежности электрических станций.

Заключение

В результате применения цифровых технологий (на примере типовой схемы распределительного устройства 220 кВ) были существенно улучшены показатели надежности коммутационного оборудования, а следовательно, надежность функционирования распределительного устройства в целом. Было достигнуто значительное снижение расчетного значения недоотпуска электроэнергии, что в свою очередь существенно снижает объем основного ущерба электрической станции, а также значительно повышает надежность электроснабжения потребителей.

1. Схема и программа развития электроэнергетики Единой энергетической системы России на период 2022-2028 годов.
2. Савина, Н.В. Надежность электроэнергетических систем – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. – 98 с.
3. Сравнение работы цифровых и аналоговых ТТ и ТН при опытах однофазного КЗ на ЦПС 500 кВ «Тобол» – [Электронный ресурс]: URL: https://profotech.ru/company/news/1296/?sphrase_id=999 (дата обращения 10.03.2024).
4. Analysis of integrated monitoring of HV – [Электронный ресурс]: URL: https://www.researchgate.net/publication/224321560_Analysis_of_integrated_monitoring_of_HV_electrical_equipment_in_power_system (дата обращения 09.03.2024)
5. A Novel Smart High-Voltage Circuit Breaker for Smart Grid Applications – [Электронный ресурс]: URL: https://www.researchgate.net/publication/220592818_A_Novel_Smart_High-Voltage_Circuit_Breaker_for_Smart_Grid_Applications (дата обращения 09.03.2024)
6. Исследование влияния отказов электрооборудования распределительных подстанций на надежность электроснабжения / А.И. Некрасов, П.Н. Подобедов, А.А. Некрасов, П.А. Масленников // Техника и оборудование для села. – 2019. – №7(265). – С. 22-29.
7. Министерство энергетики Российской Федерации. Официальный сайт. Ведомственный проект «Цифровая энергетика» [Электронный ресурс]: URL: <https://minenergo.gov.ru/node/14559> (дата обращения 19.03.2024).
8. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 КВ. Типовые решения /ОАО «ФСК ЕЭС» СТО-56947007-29.240.30.010-2008, 2007. – 132 с.
9. Измерительные трансформаторы АО «ПРОФОТЕК» – [Электронный ресурс]: URL: <https://www.profotech.ru/upload> (дата обращения 09.03.2024)