

*Зарак Али Хан<sup>1</sup>,*

магистр, студент предаспирантуры;

*Ирфан Хамза<sup>2</sup>,*

магистр, студент аспирантуры;

*Игнатьева Дарья Александровна<sup>3</sup>,*

канд. физ.-мат. наук, старший педагог доп. образования

## О МЕТОДАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ЕТАР

Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого,

<sup>1</sup>zarakalikhan37@gmail.com, <sup>2</sup>hamzairfan19@gmail.com,

<sup>3</sup>ignatyeva.daria92@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе был проведен анализ методов релейной защиты ключевых элементов (генераторов, трансформаторов и сборных шин) на модели электростанции, разработанной в программе ETAP. Были проанализированы проектные параметры и потенциальные угрозы для каждого из рассматриваемых элементов. На основе комплексного анализа требований к надежности, чувствительности, эксплуатационным характеристикам и специфических угроз, были предложены и обоснованы методы релейной защиты для каждого типа элемента. Исследование подтвердило важность применения адекватных методов защиты для обеспечения надежности и безопасности функционирования электростанции.

**Ключевые слова:** безопасность электроснабжения, защита ключевого оборудования электростанции, релейная защита, ETAP моделирование.

*Khan Zarak Ali<sup>1</sup>,*

MSc, pre-postgraduate student;

*Hamza Irfan<sup>2</sup>,*

MSc, postgraduate student;

*Daria A. Ignateva<sup>3</sup>,*

PhD in Physics and Mathematics,  
Senior lecturer of vocational training

# METHODS OF RELAY PROTECTION FOR KEY POWER PLANT COMPONENTS USING THE ETAP MODEL

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,

<sup>1</sup>zarakalikhan37@gmail.com, <sup>2</sup>hamzairfan19@gmail.com,

<sup>3</sup>ignatyeva.daria92@gmail.com

**Abstract.** In this paper, the analysis of relay protection methods for key elements (generators, transformers and busbars) was carried out on a power plant model developed in the ETAP program. The design parameters and potential threats for each of the considered elements were analyzed. Based on a comprehensive analysis of the requirements for reliability, sensitivity, operational characteristics and specific threats, relay protection methods for each type of element were proposed and substantiated. The study confirmed the importance of using adequate protection methods to ensure the reliability and safety of the power plant.

**Key words:** electricity supply safety, key power plant equipment protection, relay protection, ETAP simulation.

## ВВЕДЕНИЕ

Бесперебойное и безопасное электроснабжение – это фундамент экономического и социального прогресса современного общества. Электроэнергетические системы представляют собой сложные интегрированные комплексы, объединяющие генерирующие, передающие и распределяющие устройства, именно их взаимосвязь делает уязвимой всю систему. Любое нарушение их нормального режима работы может приводить к серьезным последствиям, варьирующимся от локальных сбоев до масштабных аварий, сопровождающихся существенным экономическим ущербом, а также угрозой безопасности потребителей [1, 2].

Одной из первостепенных задач для обеспечения надежности функционирования электроэнергетических систем является защита ключевого оборудования электростанции. В зависимости от параметров и потенциальных угроз, характерных для каждого элемента энергосистемы, разработаны и активно применяются различные методы релейной защиты [3 – 6]. Их задача – автоматически выявить и отключить поврежденное оборудование,

Таблица 1  
Методы релейной защиты элементов электростанции

Элемент электростанции	Основная защита	Дополнительная защита
Генераторы	Дифференциальная защита	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Защита от междупитковых замыканий, перегрузки повышения/понижения напряжения, потери возбуждения, обратной мощности, несимметрии;</li> <li>- Газовая защита;</li> <li>- Защита от замыканий на землю.</li> </ul>
Трансформаторы	Дифференциальная защита, газовая защита	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Максимальная токовая защита, токовая отсечка;</li> <li>- Защита от перегрузки, повышения/понижения напряжения;</li> <li>- Защита от замыканий на землю.</li> </ul>
Сборные шины	Дифференциальная защита	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Защита от перенапряжений;</li> <li>- Токовая отсечка.</li> </ul>

предотвращая распространение аварий и поддерживая стабильность работы всей системы. В табл. 1 представлены основные и дополнительные методы защиты, применяемые для защиты каждого элемента.

Выбор основной защиты обусловлен высокой чувствительностью и способностью быстро обнаруживать повреждения внутри защищаемого элемента. Дополнительные защиты предохраниют от специфических видов повреждений/неисправностей или аномальных режимов работы, которые не выявляются основной защитой. Координация работы всех видов защит обеспечивает селективность, т.е. позволяет отключить только неисправный участок сети, избегая отключения другого оборудования [7].

Целью данной работы является определение возможных методов релейной защиты ключевых элементов (генераторов, трансформаторов и сборных шин), необходимых для обеспечения надежности и безопасности функционирования представленной модели электростанции с учетом проектных параметров и потенциальных угроз, характерных для каждого элемента.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена схема, смоделированная с помощью программы анализа электрических переходных процессов (ETAP), на которой представлены основные элементы электростанции, которые являются основными объектами защиты: генераторы, трансформаторы и сборные шины.

Для модели электростанции, возможные сценарии работы которой описаны в [8] предложены методы защиты основных элементов электростанции. Выбор методов защиты обусловлен комплексным анализом потенциальных угроз и технических характеристик, предъявляемых к каждому элементу электростанции, а также специфических требований к надежности и чувствительности (табл. 2).

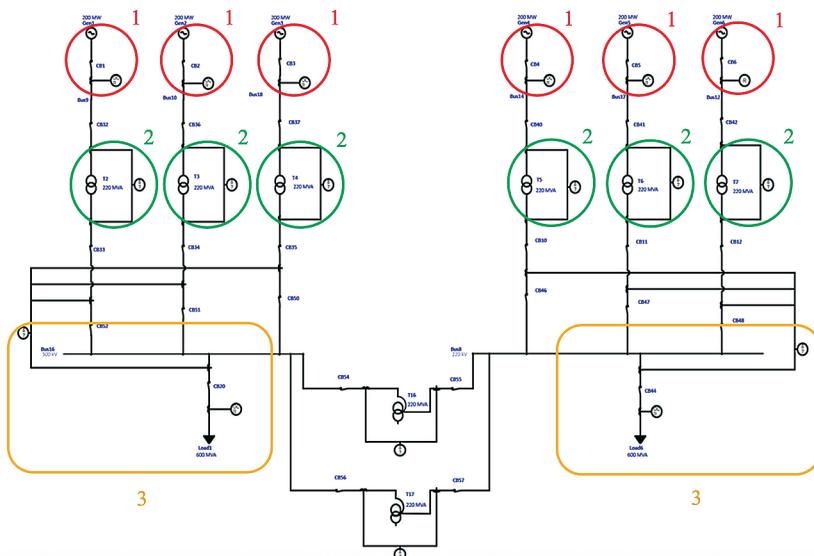


Таблица 2

**Технические характеристики и потенциальные угрозы элементов  
для модели ЕТАР электростанции**

Элемент электростанции	Основные характеристики		Потенциальные угрозы
Генераторы	Активная мощность ( $P$ )	300 – 500 МВт	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Перегрев обмоток (охлаждение, перегрузка).</li> <li>- Короткие замыкания (внутренние/внешние).</li> <li>- Механические повреждения (ротор, подшипники, вибрации).</li> <li>- Деградация изоляции.</li> <li>- Проблемы с системой возбуждения.</li> </ul>
	Реактивная мощность ( $Q$ )	150 – 250 МВАр	
	Напряжение ( $U$ )	15 – 24 кВ	
	Ток ( $I$ )	10 000 – 20 000 А	
	Частота ( $f$ )	50 Гц	
	КПД (%)	98,5 – 99,0%	
Трансформаторы	Полная мощность ( $S$ )	400 – 630 МВА	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Перегрев (охлаждение, перегрузка, снижение уровня масла).</li> <li>- Короткие замыкания (внутренние/внешние).</li> <li>- Пробой изоляции (старение масла, увлажнение).</li> <li>- Проблемы с охлаждающей жидкостью (утечки, ухудшение качества).</li> <li>- Деградация вводов.</li> </ul>
	Напряжение первичной обмотки ( $U_1$ )	15 – 24 кВ	
	Напряжение вторичной обмотки ( $U_2$ )	110 – 750 кВ	
	Ток первичной обмотки ( $I_1$ )	12 000 – 19 000 А	
	Ток вторичной обмотки ( $I_2$ )	300 – 3 300 А	
	Потери холостого хода ( $P_{xx}$ )	80 – 160 кВт	
	Потери короткого замыкания ( $P_{k3}$ )	650 – 1100 кВт	
	Напряжение короткого замыкания ( $U_{k3}$ )	12 – 14%	

Окончание табл. 2

Элемент электростанции	Основные характеристики		Потенциальные угрозы
Сборные шины	Номинальное напряжение ( $U_{\text{ном}}$ )	220 кВ / 500 кВ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Короткие замыкания (межфазные, на землю, пробой изоляции).</li> <li>- Перегрев (плохие контакты, загрязнение, перегрузка).</li> <li>- Механические повреждения (излом, деформация).</li> <li>- Деградация изоляции.</li> </ul>
	Номинальный ток ( $I_{\text{ном}}$ )	4000 – 6300 А	
	Ток термической стойкости ( $I_{\text{терм}}$ )	40 кА (3 сек) / 63 кА (1 сек)	
	Ток электро-динамической стойкости ( $I_{\text{дин}}$ )	102 кА / 160 кА	

Для обеспечения надежной и безопасной работы представленной модели электростанции, а также для сохранения ее проектных параметров в различных режимах работы требуется эффективное функционирование систем защиты ключевых элементов. К этим системам защиты предъявляются специфические требования, обусловленные конструктивными особенностями и предполагаемыми режимами работы каждого элемента, представленных как в российских нормативных документах [9], так международных [10]. Далее будут рассмотрены выбранные методы защиты генераторов, трансформаторов и сборных шин, необходимые для корректной работы представленной модели.

*Задача генератора:* для обеспечения надежной и безопасной работы генератора важен контроль сверхтоков в обмотках генератора. Предложенная защита от перегрузки по току основана на использовании специализированных реле (например, реле максимального тока с выдержкой времени, реле мгновенной токовой отсечки), запрограммированных на срабатывание при определённых пороговых значениях тока, что позволяет защитить генератор от коротких замыканий, перегрузок и других нештатных ситуаций

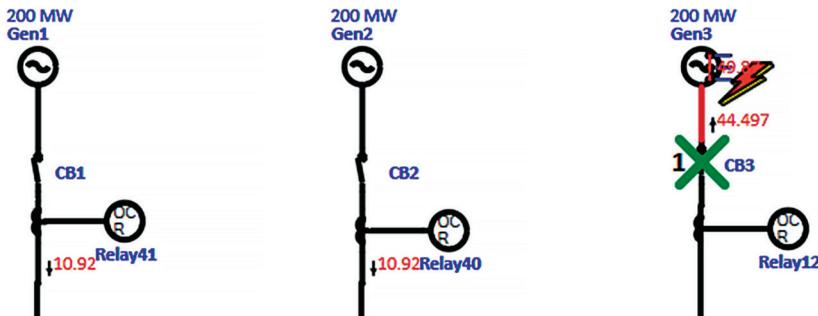


Рис. 2. Защита генератора

(рис. 2). Основная цель защиты от сверхтоков – предотвращение повреждений генератора, обусловленных чрезмерным тепловыделением и разрушением изоляции, что является следствием протекания токов, превышающих номинальные значения.

*Защита трансформатора:* в рамках данной работы для силовых трансформаторов выбрана дифференциальная защита (рис. 3). Данный метод основан на сравнении токов, поступающих на вход и выход обмоток трансформатора, и выявляет любой дисбаланс, который может указывать на его внутреннюю неисправность. Дифференциальная защита обеспечивает высокую чувствительность и быструю изоляцию неисправного участка трансформатора, предотвращая дальнейшие повреждения и обеспечивая защиту всей энергосистемы.

*Защита сборных шин:* для сборных шин распределительной сети была также выбрана дифференциальная защита (рис. 4). Эта схема защиты предназначена для поддержания непрерывности электроснабжения, обнаружения внутренних неисправностей в шинах и быстрой изоляции неисправного участка. Принцип действия заключается в сравнении входящих и выходящих токов из зоны сборных шин. В случае обнаружения дисбаланса, указывающего на неисправность внутри зоны сборных шин, срабатывают автоматические выключатели, предотвращая каскадные отказы и обеспечивая работоспособность остальной части сети.

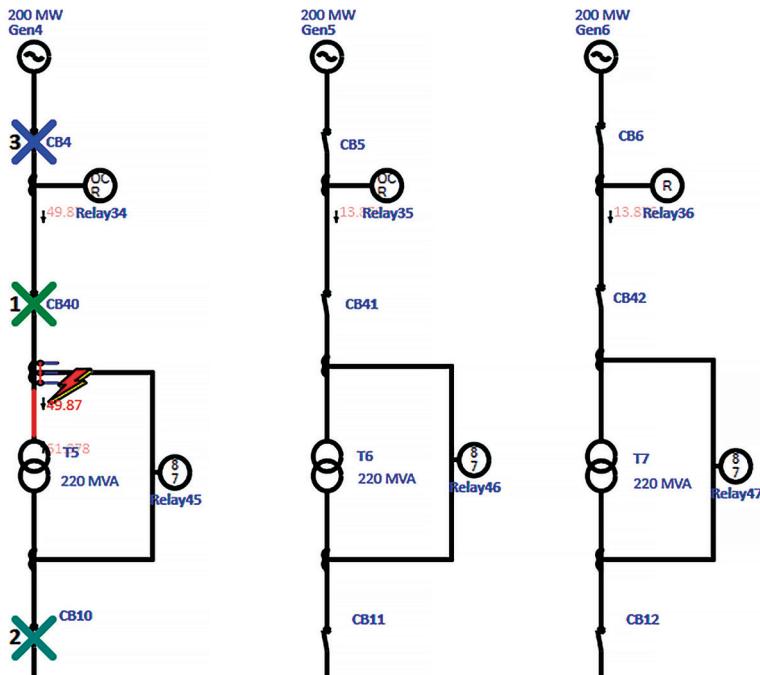


Рис. 3. Защита трансформатора

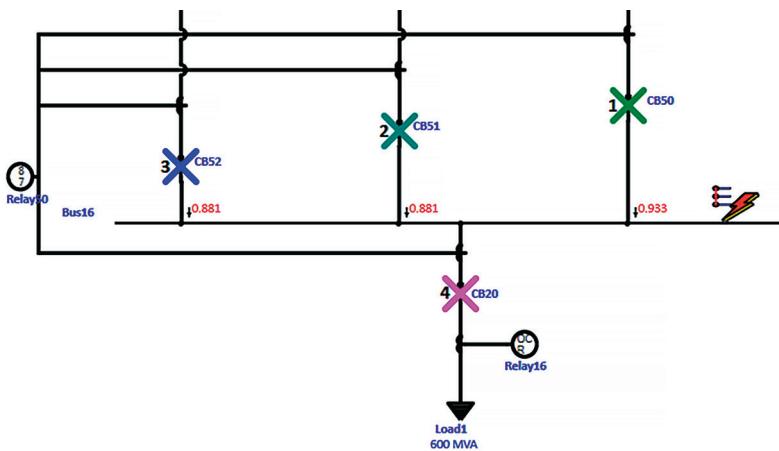


Рис. 4. Защита сборных шин

## Выводы

Современные системы релейной защиты позволяют реализовать сложные алгоритмы защиты, которые направлены на минимизацию рисков возникновения аварийных ситуаций путем: минимизации времени КЗ на оборудование, селективного отключения поврежденного участка, автоматического восстановления электроснабжения. Они также предоставляют возможность дистанционного мониторинга и управления, что повышает эффективность эксплуатации электроэнергетических систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jain R., Velaga Y.N., Prabakar K., Baggu M., Schneider K. Modern trends in power system protection for distribution grid with high DER penetration, e-Prime. Advances in Electrical Engineering. Electronics and Energy, 2022. Vol. 2. 100080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100080>
2. Savon I., Vorontsova O., Chernenko O. Development of international co-operation in power engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 709. 044058. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044058
3. Blackburn J.L., Domin T.J. Protective Relaying: Principles and Applications (3rd ed.). CRC Press, 2006. 664 p. DOI: 10.1201/9781420017847
4. Majeed A.A., Altaie A.S., Abderrahim M., Alkhazraji A. A Review of Protection Schemes for Electrical Distribution Networks with Green Distributed Generation. Energies, 2023. 16(22). 7587. DOI: 10.3390/en16227587
5. Morrison R. Advanced Protection Systems for Electrical Power Generation. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2016. 11(3). 89 p. DOI: 10.2139/ssrn.5002128
6. Копьев В.Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 153 с. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GRECHVV/Academicactivity/Relayprotection/Tab1/RelayProtection.pdf>
7. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с. URL: <https://www.elec.ru/files/2014/01/24/Relejnaja-zaschita-energeticheskikh-sistem.pdf>
8. Zarak Ali K., Ignateva D.A. Comparative load flow study for different power plant configurations in ETAP // Открываем мир науки. Сборник научных материалов IV Международной научно-практической конференции иностранных слушателей подготовительных отделений

вузов. Казань, 17 мая 2025 г. / Ред. Д.Р. Валеева, Е.Д. Шимкович, Г.З. Макаева, А.А. Ершова. Казань: Изд-во Казанского университета, 2025. 33 – 34. URL: [https://dspace.kpfu.ru/xmlui/viewer?file=185312;Otkryvaem\\_mir\\_nauki\\_2025.pdf&sequence=3&isAllowed=y](https://dspace.kpfu.ru/xmlui/viewer?file=185312;Otkryvaem_mir_nauki_2025.pdf&sequence=3&isAllowed=y)

9. Правила устройства электроустановок (все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий по состоянию на 2025 год) [Электронный ресурс]. Москва: ЭНAC, 2019. 672 с. URL: <https://en-res.ru/stati/ruje-aktualnost.html>

10. IEC 60255-187-1-2021 Measuring relays and protection equipment. Part 187-1: Functional requirements for differential protection - Restrained and unrestrained differential protection of motors, generators and transformers. International Electrotechnical Commission, 2021. 422 p. URL: <https://docs.cntd.ru/document/608251128>