

## Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.311.001.57

doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-20-28

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Александр Николаевич Баранов<sup>1</sup>, Игорь Дмитриевич Мурашкин<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> ДонГТУ, г. Алчевск, Россия

<sup>1</sup> to\_anb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7111-9256>

<sup>2</sup> ols5566@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7205-0182>

**Аннотация.** Работа посвящена важнейшим элементам электроснабжения потребителей электроэнергии – трансформаторным подстанциям. Целью исследования являлся анализ работы автоматического ввода резерва при нарушении электроснабжения трансформаторной подстанции с использованием имитационных моделей. Для достижения поставленной цели был проведен аналитический обзор автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции. Разработана структурная схема трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва. Разработана методика анализа работы автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции. В программной среде MATLAB/Simulink разработаны имитационные модели трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва, устройства защиты от минимального напряжения, блока управления вводным выключателем и устройства автоматического ввода резерва. Получены таблицы истинности устройства защиты от минимального напряжения, блока управления вводным выключателем и устройства автоматического ввода резерва. Выполнен имитационный эксперимент по моделированию режима нарушения электропитания трансформаторной подстанции. Результатом эксперимента стали осциллограммы срабатывания автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции. В ходе моделирования режима нарушения электропитания установлено, что разработанная модель адекватно отражает работу автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции, а также может быть использована при эксплуатации электросетей и подготовке энерготехнического персонала.

**Ключевые слова:** моделирование энергосистем, трансформаторная подстанция, автоматический ввод резерва, защита от минимального напряжения, имитационная модель

**Для цитирования:** Баранов А.Н., Мурашкин И.Д. Моделирование автоматического ввода резерва трансформаторных подстанций // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №1 (31). С. 20-28. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-20-28.

Original article

Open Access Article

### SIMULATION OF AUTOMATIC STANDBY SWITCHING OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

Alexander N. Baranov<sup>1</sup>, Igor D. Murashkin<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Donbas State Technical University, Alchevsk, Russia

<sup>1</sup> to\_anb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7111-9256>

<sup>2</sup> ols5566@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7205-0182>

**Abstract.** The paper focuses on transformer substations as vital elements of power supply for electricity consumers. The aim of the study is to analyse the operation of automatic standby switching in cases of disrupting transformer substation power utilizing simulation models. To achieve this goal, the authors have conducted an analytical

overview of automatic standby switching for transformer substations; have designed a structural scheme of a transformer substation equipped with automatic standby switching; additionally, have developed a methodology for analysing the operation of automatic standby switching for transformer substations. Within the MATLAB/Simulink programming environment, the paper constructs simulation models for a transformer substation with automatic standby switching, a minimum voltage protection unit, an input circuit breaker control unit, and an automatic standby switching device. Truth tables are generated for the minimum voltage protection unit, the input circuit breaker control unit, and the automatic standby switching device. The authors have performed a simulation experiment to model the scenario of disrupting transformer substation power. The experimental outcome yields oscillograms illustrating the activation of the transformer substation automatic standby switching. While simulating the power disruption scenario, it is confirmed that the developed model accurately represents the operation of the transformer substation automatic standby switching and can be utilized in operating power grids and training energy technicians.

**Keywords:** power system modeling, transformer substation, automatic standby switching, minimum voltage protection, simulation model

**For citation:** Baranov A.N., Murashkin I.D. Simulation of Automatic Standby Switching of Transformer Substations. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 1 (31). pp. 20-28. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-20-28.

## Введение

Трансформаторная подстанция (ТП) – это электроустановка, предназначенная для приема, преобразования (повышения или понижения) и распределения напряжения в энергосистемах. Трансформаторные подстанции являются важнейшими элементами в электроснабжении потребителей электроэнергии. В энергосистемах периодически могут возникнуть аварийные и аномальные режимы работы, которые приводят к нарушению их работы. Для предотвращения подобных режимов электропитание ТП осуществляется от нескольких независимых источников электроэнергии, а также применяется автоматический ввод резерва (АВР) [1, 2].

Автоматический ввод резерва представляет собой комплекс устройств, который обладает определенным алгоритмом работы. Для проведения анализа логики работы АВР целесообразно применять имитационное моделирование. Это может быть полезно для обучения и тренировки энерготехнического персонала. С помощью имитационных моделей энерготехнический персонал может практиковать свои навыки для принятия решений в реальных условиях [3 – 5].

Целью данной статьи является анализ работы автоматического ввода резерва при нарушении электроснабжения трансформаторной подстанции с использованием имитационных моделей.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач: аналитического обзора АВР трансформаторных подстанций; разработки имитационной модели трансформаторной подстанции с АВР; разработки методики анализа работы АВР при нарушении электроснабжения трансформаторной подстанции.

### Аналитический обзор автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции

Автоматический ввод резерва – это автоматика, предназначенная для восстановления электроснабжения потребителей электроэнергии в случае отклонения напряжения электросети от заданных пределов. Восстановление электроснабжения потребителей осуществляется путем автоматического присоединения резервного источника электроэнергии [6].

По способу реализации схемы АВР разделяют на два типа: с явным резервированием и неявным резервированием [7]. В случае явного резервирования резервный источник электроэнергии в нормальном режиме работы обесточен и электроснабжение потребителей осуществляется от основного источника. В случае неявного резервирования в нормальном режиме работы основной и резервный источники электроэнергии находятся под нагрузкой [8 – 10]. На ТП в большинстве случаев используются АВР с неявным резервированием, поэтому в данной работе будет рассмотрен именно такой тип реализации автоматики.

Принцип работы АВР заключается в постоянном контроле уровня напряжения источников электроэнергии с помощью устройств защиты от минимального напряжения (ЗМН), которые включают в себя реле напряжения и реле времени. При падении напряжения

электросети ниже заданного уровня срабатывают реле напряжения. Затем срабатывают реле времени с определенной задержкой. После чего система автоматически переводит электроснабжение потребителей с основного источника на резервный [11, 12].

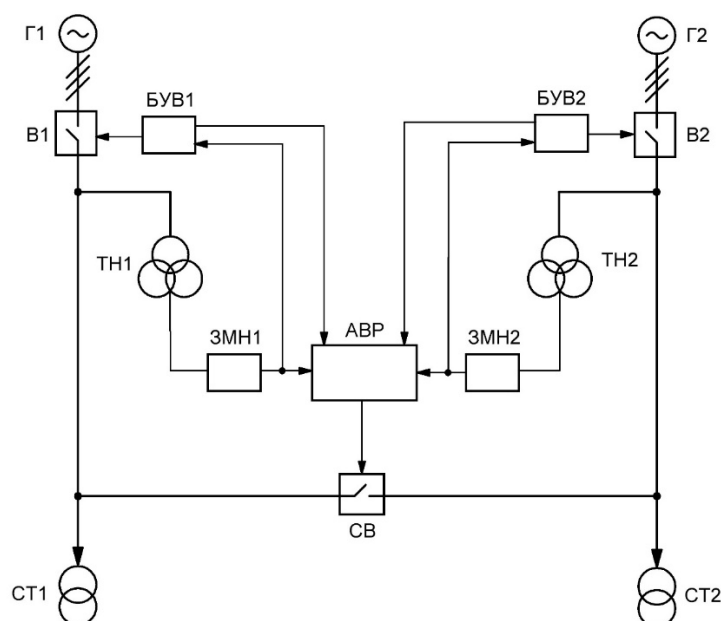
Основными условиями срабатывания автоматики АВР ТП являются [13, 14]:

- напряжение основного источника электроэнергии должно быть ниже допустимого;
- вводной выключатель основного источника электроэнергии должен быть отключен.

Также должна быть предусмотрена блокировка срабатывания ЗМН при ручном отключении вводного выключателя.

Стоит отметить, что для реализации АВР на подстанциях с рабочим напряжением 6 кВ и выше используются измерительные трансформаторы напряжения (ТН). Напряжение обмотки высокого напряжения таких трансформаторов – это рабочее напряжение электросети. Напряжение обмотки низкого напряжения принимается – 100 В [9, 15].

Исходя из вышеизложенной логики работы ТП с АВР, была разработана ее структурная схема, приведенная на рис. 1



**Рис. 1. Структурная схема трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва**

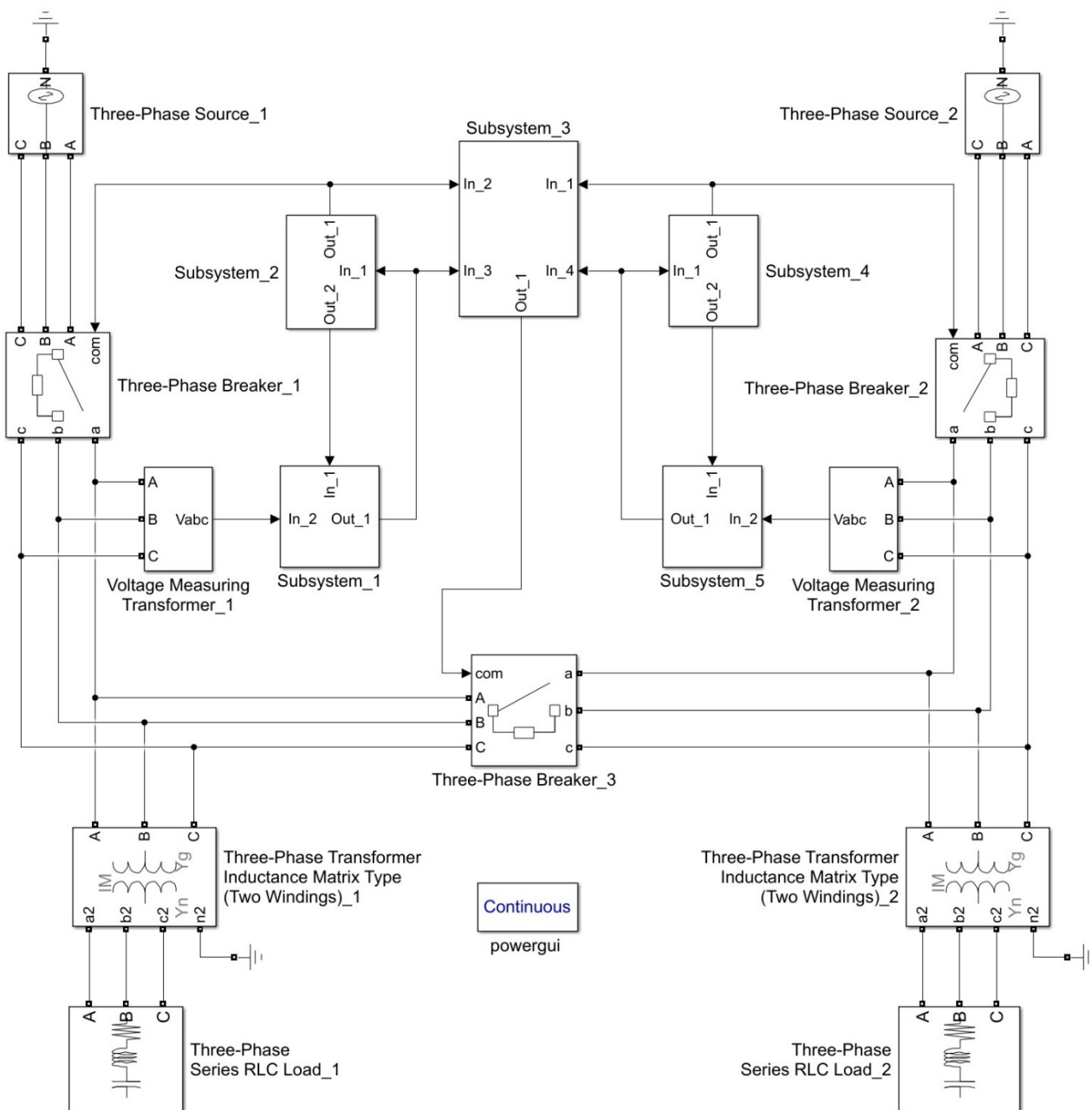
**Fig. 1. Block diagram of a transformer substation with automatic reserve input**

На схеме (рис. 1) используются следующие обозначения: Г1 и Г2 – источники электроэнергии; В1 и В2 – вводные выключатели; СВ – секционный выключатель; СТ1 и СТ2 – силовые трансформаторы; БУВ1 и БУВ2 – блоки управления вводными выключателями В1 и В2; ТН1 и ТН2 – измерительные трансформаторы напряжения; ЗМН1 и ЗМН2 – устройства защит от минимального напряжения; АВР – устройство АВР.

Схема работает следующим образом. От источников Г1 и Г2 через В1 и В2 осуществляется электроснабжение СТ1 и СТ2. К источникам Г1 и Г2 параллельно с СТ1 и СТ2 подключены обмотки высокого напряжения ТН1 и ТН2. С обмоток низкого напряжения ТН1 и ТН2 в устройства ЗМН1 и ЗМН2 поступают сигналы пропорциональные напряжению Г1 и Г2. Если величина напряжения ниже заданного уровня, то соответствующее устройство ЗМН выдает сигнал на отключение В1 или В2 и включение АВР. Также в блок АВР поступают сигналы о включенном или отключенном положении В1 и В2. Если все условия для срабатывания автоматического ввода резерва соблюдены, то устройство АВР выдает сигнал на включение СВ.

### **Разработка имитационной модели трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва**

На основе структурной схемы (рис. 1) в программной среде *MATLAB/Simulink* была разработана имитационная модель ТП с АВР. Модель приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Имитационная модель трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва**  
**Fig. 2. Simulation model of a transformer substation with automatic reserve input**

На имитационной модели (рис. 2) функциональные блоки обозначены следующим образом: *Three-Phase Source\_1* и *Three-Phase Source\_2* – источники электроэнергии; *Three-Phase Breaker\_1* и *Three-Phase Breaker\_2* – вводные выключатели; *Three-Phase Breaker\_3* – секционный выключатель; *Three-Phase V-I Measurement\_1* и *Three-Phase V-I Measurement\_2* – трансформаторы напряжения; *Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)\_1* и *Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)\_2* – силовые трансформаторы; *Three-Phase Series RLC Load\_1* и *Three-Phase Series RLC Load\_2* – нагрузки 0,4 кВ; *Subsystem\_1* и *Subsystem\_5* – логическая схема ЗМН; *Subsystem\_2* и *Subsystem\_4* – блоки управления вводными выключателями; *Subsystem\_3* – логическая схема АВР; *powergui* – служебный блок *Simulink*.

Для моделирования использовались следующие параметры: номинальное напряжение электросети – 6000 В; частота электросети – 50 Гц; номинальная мощность силовых трансформаторов – 1 000 000 ВА; напряжение нагрузки силовых трансформаторов – 380 В; напряжение срабатывания ЗМН – 3000 В; выдержка времени ЗМН – 2 с; выдержка времени АВР – 0,5 с.

Имитационная модель устройства ЗМН приведена на рис. 3.

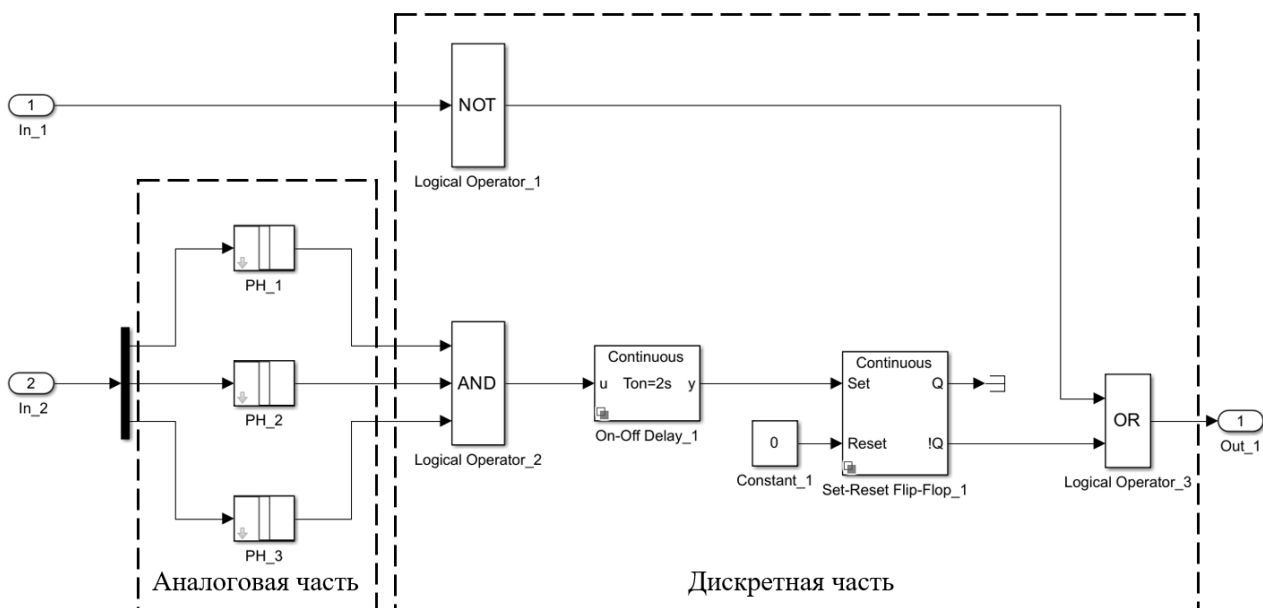


Рис. 3. Имитационная модель устройства защиты от минимального напряжения  
 Fig. 3. Simulation model of the minimum voltage protection device

Аналоговая часть модели устройства ЗМН работает следующим образом. На вход *In\_2* поступает сигнал пропорциональный напряжению между фазами электросети, который сравнивается с уставкой в блоках реле напряжения *PH\_1*, *PH\_2* и *PH\_3*. Если напряжение электросети меньше заданной уставки, то на выходах блоков реле появляется информация об их срабатывании – логические единицы, которые подаются в дискретную часть.

Алгоритм работы дискретной части модели устройства ЗМН приведен в табл. 1.

Таблица 1  
 Table 1

Таблица истинности устройства защиты от минимального напряжения  
 The truth table of the minimum voltage protection device

<i>In_1</i>	<i>AND</i>	<i>Set</i>	<i>!Q</i>	<i>Out_1</i>
0	0	0	1	1
0	1	1*	0*	1
1	0	0	0	1
1	1	1*	0*	0*

0\*, 1\* – значения после выдержки времени 2 с

Имитационная модель БУВ1 и БУВ2 приведена на рис. 4.

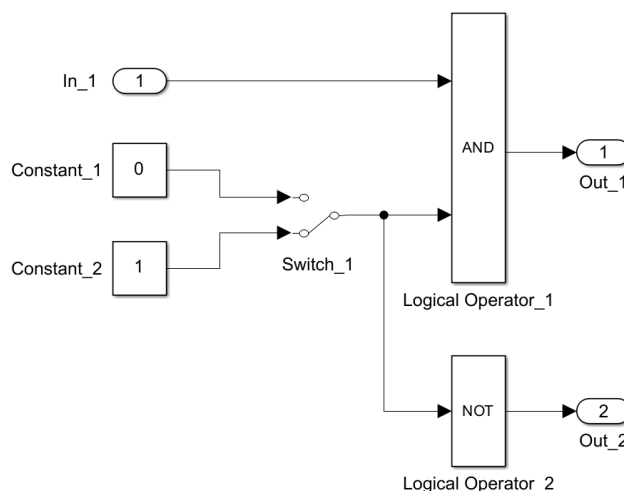


Рис. 4. Имитационная модель блока управления вводным выключателем  
 Fig. 4. Simulation model of the control unit of the input switch

Алгоритм работы моделей БУВ1 и БУВ2 приведен табл. 2.

Таблица истинности блока управления вводным выключателем  
*The truth table of the control unit of the input switch*

In 1	Switch 1	Out 1	Out 2
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	0
1	1	1	1

Имитационная модель устройства АВР приведена на рис. 5.

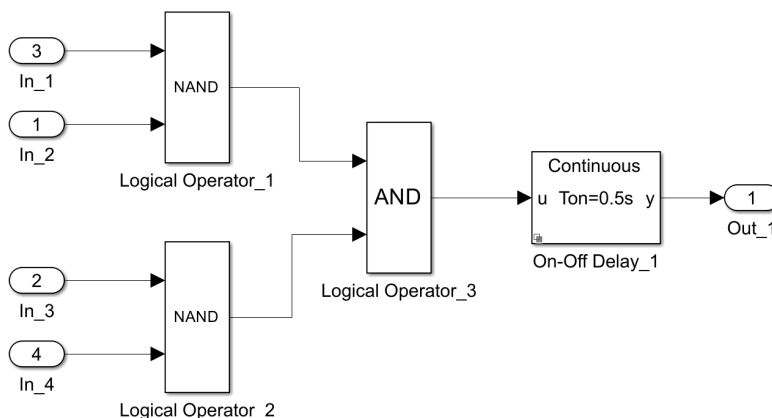


Рис. 5. Имитационная модель устройства автоматического ввода резерва  
*Fig. 5. Simulation model of the automatic reserve input device*

Алгоритм работы модели устройства АВР приведен в табл. 3.

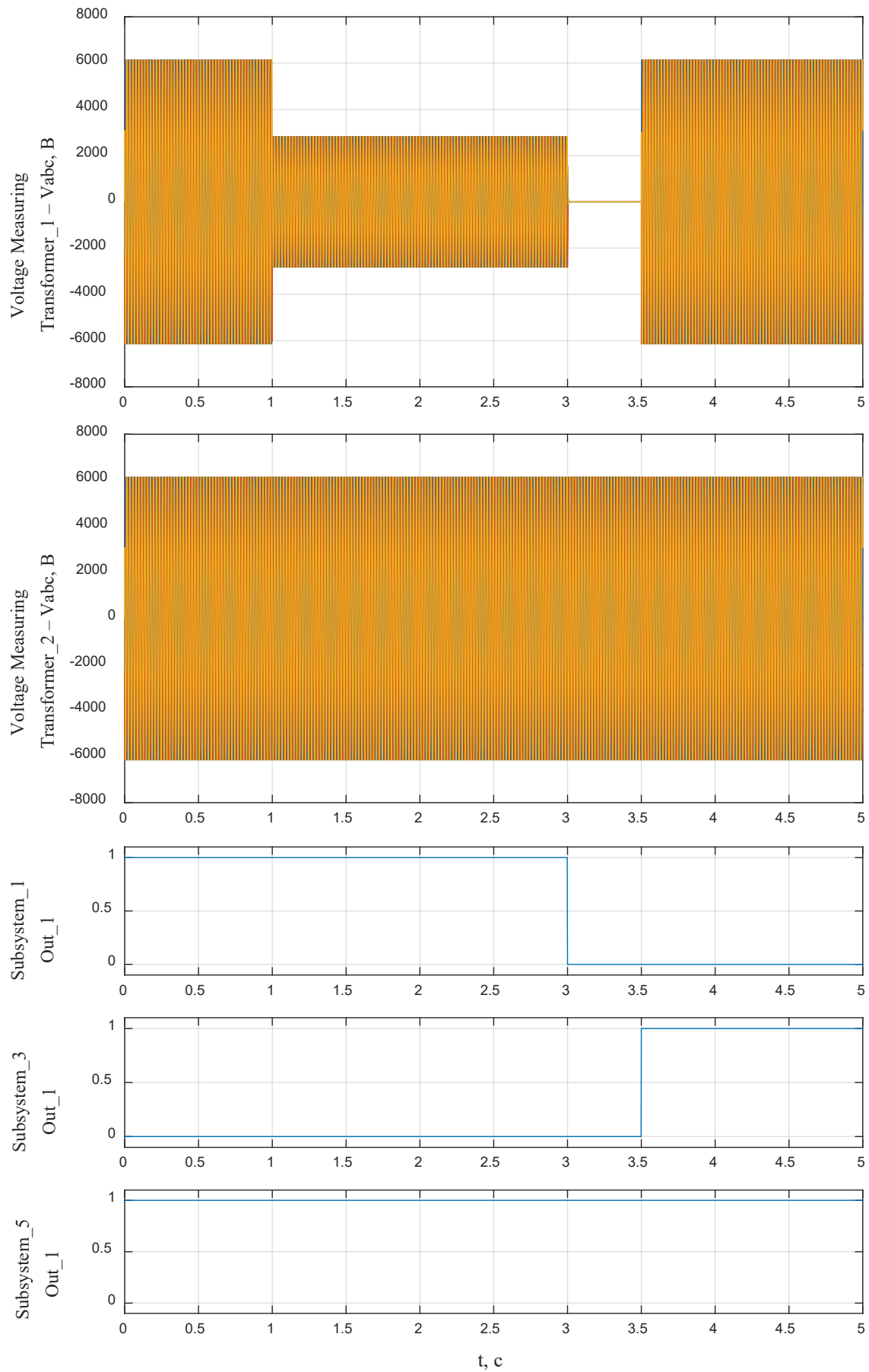
Таблица истинности устройства автоматического ввода резерва  
*The table of the validity of the automatic reserve input device*

In 1	In 2	In 3	In 4	Out 1
0	0	0	0	1*
0	0	0	1	1*
0	0	1	0	1*
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1*
0	1	0	1	1*
0	1	1	0	1*
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1*
1	0	0	1	1*
1	0	1	0	1*
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

1\* – значение после выдержки времени 0,5 с.

### Анализ работы автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции

Анализ работы АВР ТП выполнен с использованием имитационных моделей, представленных на рис. 2 – 5. Для моделирования режима нарушения электропитания ТП проводился имитационный эксперимент, при котором напряжение на высокой стороне СТ1 уменьшилось с 6000 В до 2700 В при  $t = 1$  с. Результаты моделирования приведены на рис. 6 в виде осциллограмм срабатывания АВР ТП.



**Рис. 6. Осциллограммы срабатывания автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции**  
***Fig. 6. Oscillogram of the automatic input of the transformer substation reserve***

На осциллограмме напряжения СТ1 (*Three-Phase V-I Measurement\_1 – Vabc*) в интервале 0...1 с наблюдается номинальное напряжение электросети – 6000 В. При  $t = 1$  с напряжение уменьшается до 2700 В. При  $t = 3$  с напряжение падает до 0 В. При  $t = 3,5$  с напряжение увеличивается до номинального – 6000 В. Это объясняется тем, что после уменьшения напряжения до 2700 В срабатывает ЗМН и через заданную выдержку времени – 2 с отключает В1 (*Subsystem\_1 – Out\_1*). Затем срабатывает АВР и через заданную выдержку времени – 0,5 с включает СВ (*Subsystem\_3 – Out\_1*). После включения резервного источника электроэнергии напряжение СТ1 увеличивается до номинального – 6000 В. При этом в ходе эксперимента напряжение СТ2 (*Three-Phase V-I Measurement\_2 – Vabc*) оставалось неизменным – 6000 В и В2 был включен (*Subsystem\_5 – Out\_1*).

Имитационный эксперимент для второго потребителя электроэнергии СТ2 проводился аналогично СТ1 и модель показала такие же результаты.

Таким образом, в ходе проведения имитационного эксперимента продемонстрирована работа автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции. Разработанная модель во всех случаях адекватно реализовала алгоритм работы АВР.

### Заключение

В результате проведенных исследований были получены следующие выводы:

- разработана структурная схема трансформаторной подстанции с автоматическим вводом резерва;
- разработана методика анализа работы автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции;
- разработаны имитационные модели трансформаторной подстанции, защиты от минимального напряжения, блока управления вводным выключателем и автоматического ввода резерва;
- получены таблицы истинности устройства защиты от минимального напряжения, блока управления вводным выключателем и устройства автоматического ввода резерва;
- установлено, что разработанные имитационные модели адекватно отражают алгоритм работы автоматического ввода резерва трансформаторной подстанции, могут быть использованы при эксплуатации трансформаторных подстанций и подготовке энерготехнического персонала.

#### Список источников:

1. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М: Академия, 2010. – 290 с.
2. Табаков О.В., Харитонов Т.В. Актуальность применения цифровых защит на трансформаторных подстанциях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №11. – С. 379-382.
3. Петров А.М., Беляев И.С., Деченко О.Н. Имитационное моделирование технологических систем и комплексов. – СПб: Лань, 2025. 112 с.
4. Елохин В.Р. Имитационное моделирование энергетических систем // iPolytech Journal. – 2013. – №4(75). – С. 145-150.
5. Моделирование аварийных режимов трансформаторных подстанций на основе технологий цифровых двойников для предотвращения техногенных аварий / Семенова К.В., Тихонов А.И., Снитко И.С. и др. // Современные проблемы гражданской защиты. – 2022. – №42. – С. 83-92.
6. Митрофанов С.В., Шлейников В.Б. Применение быстродействующего автоматического ввода резерва для обеспечения успешного самозапуска синхронных двигателей на дожимной компрессорной станции // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – №1. – С. 53-60.

#### References:

1. Kireeva E.A., Tsyruk S.A. Relay Protection and Automation of Electric Power Systems. Moscow: Akademiya; 2010.
2. Tabakov O.V., Kharitonova T.V. The Relevance of Application of Digital Protections at Transformer Substations. News of the Tula State University. Technical Sciences. 2023;(11):379-382.
3. Petrov A.M., Belyayev I.S., Dechenko O.N. Simulation of Technological Systems and Complexes. Saint Petersburg: Lan; 2025.
4. Elohin V.R. Simulation of Power Systems. iPolytech Journal. 2013;4(75):145-150.
5. Semenova KV, Tikhonov AI, Snitko IS, et al. Simulation of Emergency Modes of Transformer Substations Based on Digital Twins Technology for Prevention of Technogenic Accidents. Modern Problems of Civil Protection. 2022;(42):83-92.
6. Mitrofanov S.V., Shleinikov V.B. Fast Automatic Transfer Switch Applications for Synchronous Motor Self Starting at a Booster Compressor Station. Energy Safety and Energy Economy. 2021;(1):53-60.

7. Ротов А.В. Особенности реализации автоматического включения резерва на трансформаторных подстанциях 6–10/0,4 кВ // Colloquium-journal. – 2023. – №30(189). – С. 26-28.

8. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: учебник для вузов. М: НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.

9. Правила устройства электроустановок (ПУЭ 7). Утв. прик. Минэнерго России от 20 мая 2003 г. №187.

10. Червоненко А.П., Котин Д.А., Рожко А.В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР // Известия высших учебных заведений. Проблемы электрики. – 2021. – №23(5). – С. 160-171.

11. Шабанов В.А., Юсупов Р.З., Алексеев В.Ю. Устройство адаптивного автоматического включения резерва на нефтеперекачивающих станциях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – №12(2). – С. 16-22.

12. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов. 4-е издание. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.

13. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Условия срабатывания АВР на нефтеперекачивающих станциях // Энергетик. – 2010. – №3. – С. 37-39.

14. Беркович М.А., Гладышев В.А., Семёнов В.А. Автоматика энергосистем. 3-е издание. М: Энергоатомиздат, 1991. – 238 с.

15. Левченко М.Т., Хомяков М.Н. Автоматическое включение резерва. – М: Энергия, 1971. – 80 с.

7. Rotov A.V. Features of Implementing Automatic Reserve at 6-10/0.4 kV Transformer Substations. Colloquium-journal. 2023;30(189):26-28.

8. Ovcharenko N.I. Automation of Power Plants and Electric Power Systems. Moscow: ENAS; 2000.

9. Regulations for the Arrangement of Electrical Installations (RAE 7). The Decree of Minenergy of Russia No. 187; May 20, 2003.

10. Cherwonenko A.P., Kotin D.A., Rozhko A.V. Load Switching Between Main Power Grid to the Backup Grid by Standard Automatic Transfer Switch. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2021;23(5):160-171.

11. Shabanov V.A., Yusupov R.Z., Alekseyev V.Yu. Device for Adaptive Automatic to Reserve Source on Oil Pumping Stations. Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2016;12(2):16-22.

12. Andreev V.A. Relay Protection and Automation of Electric Power Systems. 4th ed. Moscow: Visshaya shkola; 2006.

13. Shabanov V.A., Alekseyev V.Yu. Activation Conditions of ARS at Pumping Stations. Energetik. 2010;(3):37-39.

14. Berkovich M.A., Gladyshev V.A., Semyonov V.A. Power System Automation. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat; 1991.

15. Levchenko M.T., Khomyakov M.N. Automatic Backup Switching. Moscow: Energiya; 1971.

### **Информация об авторах:**

#### **Баранов Александр Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационных технологий» Донбасского государственного технического университета, ORCID 0009-0009-7111-9256.

#### **Мурашкин Игорь Дмитриевич**

аспирант Донбасского государственного технического университета, ORCID 0009-0009-7205-0182.

### **Information about the authors:**

#### **Baranov Alexander Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Information Technology Department of Donbas State Technical University, ORCID: 0009-0009-7111-9256.

#### **Murashkin Igor Dmitrievich**

Postgraduate Student of Donbas State Technical University, ORCID: 0009-0009-7205-0182.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 19.10.2025; одобрена после рецензирования 01.11.2025; принята к публикации 14.11.2025.**

**The article was submitted 19.10.2025; approved after reviewing 01.11.2025; accepted for publication 14.11.2025.**

**Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.**

**Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.**