



Научная статья

УДК 621.314.26:621.316.91:621.311.1

<https://elibrary.ru/lthugj><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>

Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В

К.В. Тихонов^{1✉}¹ООО Научно-производственное предприятие «РУТАС», г. Красноярск, Россия¹Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Россия

Резюме. Цель – изучение влияния режимов коммутации от мощности силовых трансформаторов в электрических сетях до 1000 В на кратность коммутационных перенапряжений с разработкой рекомендаций по их снижению. Исследования перенапряжений проводились при коммутации силовых трансформаторов в сетях до 1000 В. Для изучения перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов, использовались вакуумные контакторы. В ходе исследования применялся инструментальный метод измерения: для фиксации перенапряжений были задействованы активный делитель РДН-1000 и цифровой осциллограф Tektronix TDS2024B. Емкость RC-цепи измерялась с помощью цифрового LC-метра Mastech MY6243. Для ограничения коммутационных перенапряжений в разработанном методе применялись RC-гасители на базе RC-цепей, которые позволяют не только ограничивать амплитуду коммутационного импульса, но и снижать скорость нарастания напряжения коммутационного импульса. Кроме этого, у RC-гасителей отсутствуют зоны замиранья при возникновении высокочастотных коммутационных импульсов. Были выполнены измерения емкости первичной обмотки исследуемых трансформаторов. Анализ кратности перенапряжений показывает, что при увеличении мощности трансформатора кратность коммутационных перенапряжений снижается при его отключении от сети. С увеличением мощности трансформатора в 1,5 раза индуктивность трансформатора снижается, а, следовательно, снижается и волновое сопротивление трансформатора. Исходя из этого, при подключении одной и той же емкости к зажимам трансформатора у более мощных трансформаторов снижение волнового сопротивления будет происходить в большей степени (от 3 до 6 раз), что приведет к более эффективному ограничению перенапряжения. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования RC-цепей для ограничения коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова: трансформаторы, номинальное напряжение до 1000 В, коммутационные перенапряжения, вакуумные контакторы, RC-гасители

Для цитирования: Тихонов К.В. Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 370–379. EDN: LTHUGJ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>.

POWER ENGINEERING

Original article

Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V

Kirill V. Tikhonov^{1✉}¹Research and Production Enterprise RUTAS LLC, Krasnoyarsk, Russia¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

Abstract. The aim was to study the effect of switching modes on the power of supply transformers in electrical networks up to 1000 V on the multiplicity of switching overvoltages, as well as to develop recommendations for their reduction. The study was carried out during switching of supply transformers in networks up to 1000 V. Vacuum contactors were used to study overvoltages arising during switching of supply transformers. Overvoltages were recorded using an RDN-1000 active divider and a Tektronix TDS2024B digital oscilloscope. The RC circuit capacitance was measured by a Mastech MY6243 digital LC-meter. To limit switching overvoltages, RC quenchers based on RC circuits were used, re-

ducing not only the switching pulse amplitude, but also the rate of the switching pulse voltage rise. In addition, RC quenchers lack fading zones under high-frequency switching pulses. The capacitance of the primary winding of the transformers under study was measured. An increase in the transformer power was found to lead to a decrease in the multiplicity of switching overvoltages, when the transformer is disconnected from the mains. Under a 1.5-fold increase in the power of the transformer, its inductance and wave impedance decreases. As a result, when the same capacitance is connected to the transformer terminals, the wave resistance in more powerful transformers will be reduced to a larger extent (by 3 to 6 times), thus providing a more effective overvoltage limitation. The conducted experimental studies confirmed the effectiveness of RC circuits in limiting switching overvoltages.

Keywords: transformers, rated voltage up to 1000 V, switching overvoltages, vacuum contactors, RC dampers

For citation: Tikhonov K.V. Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):370-379. (In Russ.). EDN: LTHUGJ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сетях до 1000 В для коммутации силовых трансформаторов [1–4] нашли широкое применение следующие коммутационные аппараты [5, 6]: магнитные пускатели, автоматические выключатели, вакуумные контакторы. Вакуумные контакторы обладают преимуществом над другими за счет большого коммутационного ресурса, малого хода контактов, отсутствия необходимости в регулировке контактов и т.д. Несмотря на все преимущества, у вакуумных контакторов возможно создание условий для возникновения коммутационных перенапряжений (КП) при коммутации индуктивных нагрузок, в роли которых выступают силовые трансформаторы в электрических сетях до 1000 В [7–9].

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КРАТНОСТИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ МОЩНОСТИ КОММУТИРУЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для изучения перенапряжений в сетях до 1000 В, возникающих при коммутации силовых трансформаторов ТМЗ мощностью 630, 400, 250 и 160 кВ·А, использовались вакуумные контакторы ВСА-6А. Для фиксации перенапряжений применялся активный делитель РДН-1000 и цифровой осциллограф Tektronix TDS2024В.

Количество циклов коммутации (включение и отключение каждого трансформатора) составляло 20 раз. Между циклами делался перерыв в течение двух минут. В результате статистической обработки данных и проверки выборок на экстремальность были определены максимальные перенапряжения при включении и отключении каждого из типов изучаемых трансформаторов.

В табл. 1 приведены максимальные зна-

чения, зафиксированные при коммутации вышеуказанных трансформаторов.

Кратность коммутационных перенапряжений (K_{Π}) оценивалась по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\phi,max}}{U_H}$$

На рис. 1 приведены зависимости изменения кратности коммутационных перенапряжений от мощности трансформатора при его включении и отключении от сети. Анализ данных в табл. 1 и представленных на рис. 1 зависимостей показывает, что при увеличении мощности трансформатора кратность коммутационных перенапряжений снижается при его отключении от сети. Обратная закономерность наблюдается при его подключении к сети. Например, отключение трансформатора мощностью 160 кВ·А напряжением до 1000 В может привести к появлению перенапряжения при его отключении от сети равной 8580 В. Режим коммутации трансформаторов сопровождается высокой кратностью перенапряжений, что вызывает пробой изоляции, наиболее подверженной загрязнению и отключениям данной электроустановки релейными защитами. Электроснабжение потребителей прекращается на длительное время, так как происходит повреждение изоляции трансформатора и коммутационного аппарата. Коммутация трансформатора мощностью 630 кВ·А и напряжением до 1000 В приводит к появлению кратности перенапряжений 8,6 при его отключении и 3,41 при его подключении.

Максимальная кратность перенапряжения равная 13 зафиксирована при отключении, что подтверждает осциллограмма, представленная на рис. 2.

Таблица 1. Результаты максимальных зафиксированных кратностей коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов

Table 1. Results of the maximum recorded ratios of switching overvoltages when switching on and off transformers

Вид коммутации	Мощность трансформатора, кВ·А			
	630	400	250	160
	Зафиксированная кратность перенапряжений			
Включение	3,41	1,12	1	1
Отключение	8,6	9,6	11,13	13

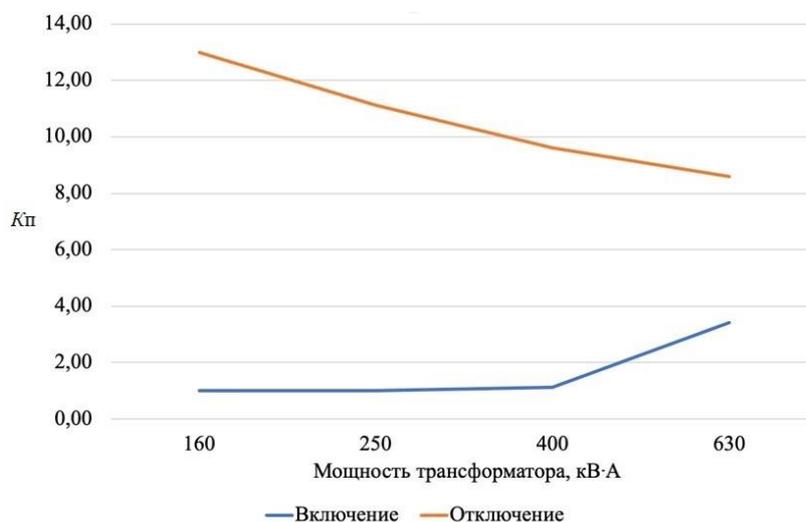


Рис. 1. Зависимости кратности коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов от их мощности
Fig. 1. Switching overvoltage ratio vs transformer power when switching on and off transformers

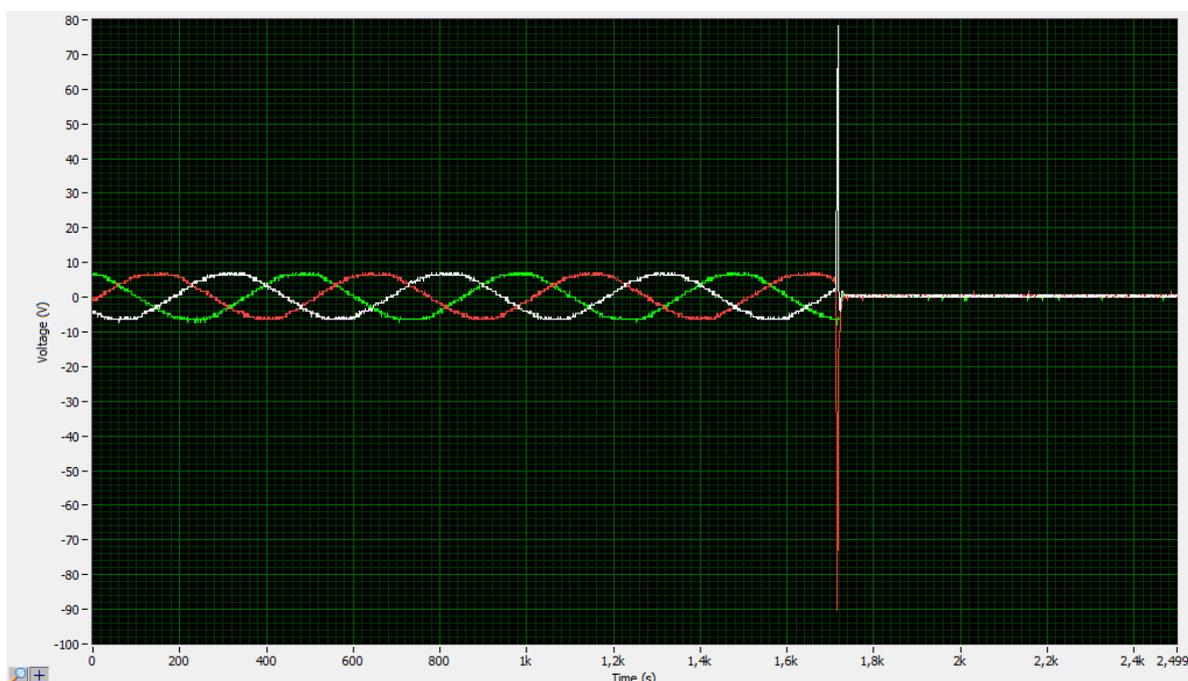


Рис. 2. Осциллограмма при отключении трансформатора ТМЗ 160/0,66
Fig. 2. Oscillogram when switching off TMZ 160/0.66 transformer

Согласно ПУЭ² (пункт 1.8.16), испытание изоляции повышенным напряжением для трансформаторов напряжением до 1 кВ должно производиться в течение 1 мин, затем необходимо подавать напряжение равное 4,5 кВ для нормальной изоляции трансформатора и 2,7 кВ – для облегченной изоляции. Если нет специальных требований, то, как правило, в сетях до 1000 В используются трансформаторы с нормальной изоляцией, поэтому в качестве предельного значения повышенного напряжения, которое должна выдерживать изоляция, примем напряжение равное 4,5 кВ, т.е. кратность перенапряжения не должна превышать величину равную 6,8 для сетей до 1000 В. Сопоставляя допустимое значение кратности перенапряжения, можно сделать вывод, что наибольшей опасностью для изоляции трансформатора является процесс отключения трансформатора от сети, так как минимальная кратность перенапряжений достигает значения 8,6, что может привести к пробое изоляции обмоток трансформатора [10–14]. Исходя из этого, разработка эффективных средств защиты от коммутационных перенапряжений для трансформатора напряжением до 1000 В является актуальной.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА RC-ГАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ КОММУТАЦИОННОГО ИМПУЛЬСА

Для ограничения коммутационных перенапряжений в настоящее время используются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) – RC-гасители на базе RC-цепей. Опыт эксплуатации указанных устройств защиты от коммутационных перенапряжений показал, что наиболее эффективными являются RC-гасители, устанавливаемые со стороны обмотки выключателя нагрузки (ВН) трансформатора, так как позволяют не только ограничивать амплитуду коммутационного импульса, но и снижать скорость нарастания напряжения коммутационного импульса [15,

16]. Кроме этого, у RC-гасителей отсутствуют зоны замиранья при возникновении высокочастотных коммутационных импульсов. При работе ОПН и при частоте коммутационного импульса более 45 кГц наблюдается возникновение зон замиранья. ОПН не реагирует в данный промежуток времени на возникновение перенапряжений [17].

Емкость RC-цепи должна быть в 5 раз больше емкости защищаемого объекта. С помощью цифрового прибора LC-метр Mastech MY6243 были выполнены измерения емкости первичной обмотки исследуемых трансформаторов. В результате измерений для трансформаторов мощностью 630, 400, 250, 160 кВ·А получены следующие значения, мкФ: 0,3; 0,24; 0,19; 0,15, соответственно. Известно, что с увеличением мощности трансформатора индуктивность трансформатора снижается, а, следовательно, уменьшается и волновое сопротивление трансформатора. Исходя из этого, при подключении одной и той же емкости к зажимам трансформатора у более мощных трансформаторов снижение волнового сопротивления будет происходить в большей степени. Следовательно, ограничение перенапряжения будет наиболее эффективно [18–20].

Поэтому можно выбрать универсальные параметры RC-цепей благодаря наибольшим возможным кратностям перенапряжений при коммутации трансформатора. Наибольшие кратности перенапряжений были зафиксированы при коммутации у трансформатора мощностью 160 кВ·А. Учитывая индуктивность и емкость трансформатора, параметры RC-цепей были приняты следующие: сопротивление – 30 Ом, емкость – 0,75 мкФ.

В табл. 2 приведены максимальные зафиксированные кратности перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов с использованием RC-цепей для ограничения перенапряжения.

На рис. 3–6 приведены соответствующие осциллограммы максимальных зафиксированных коммутационных перенапряжений.

²ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Изд. 7 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (дата обращения: 09.01.2023).

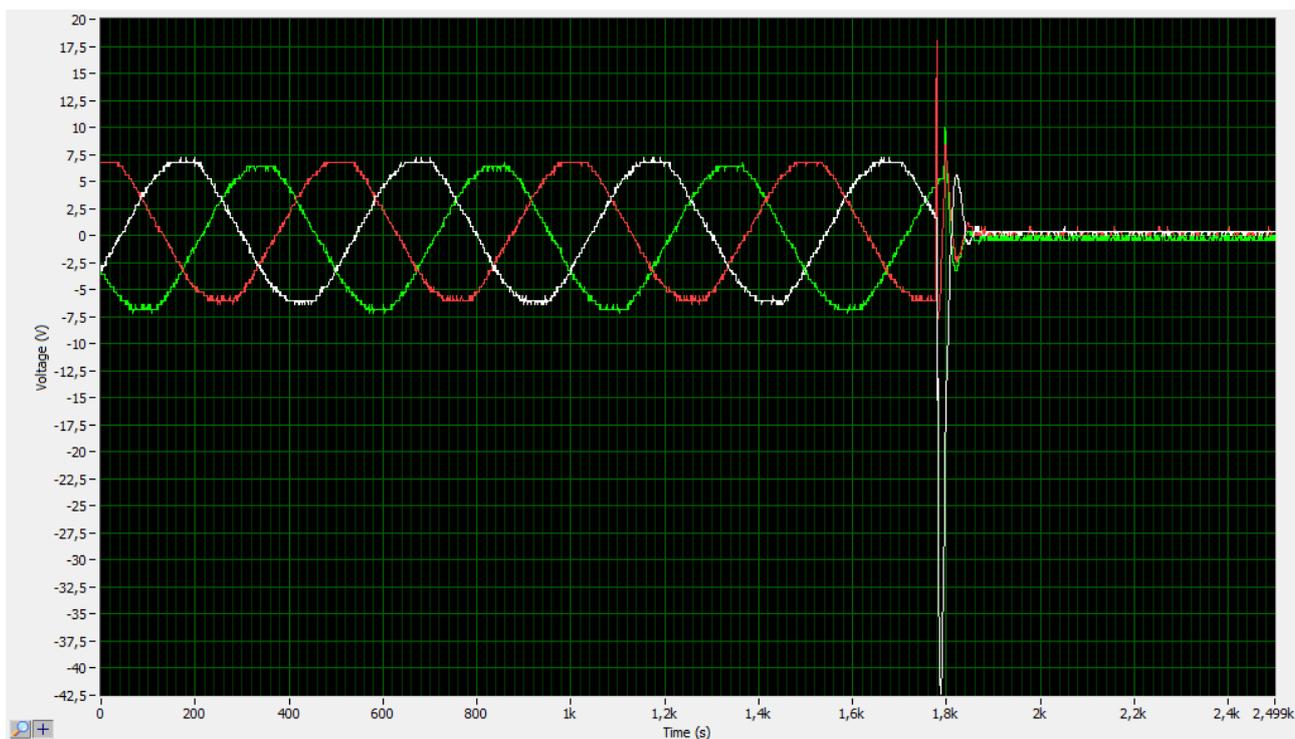


Рис. 3. Отключение трансформатора мощностью 160 кВ·А Кп.ф. = 4,97. Схема соединения RC-цепи «звезда»
Fig. 3. Disconnection of the transformer with the capacity of 160 kVA, line to earth voltage = 4.97.
Star connection of the RC circuit

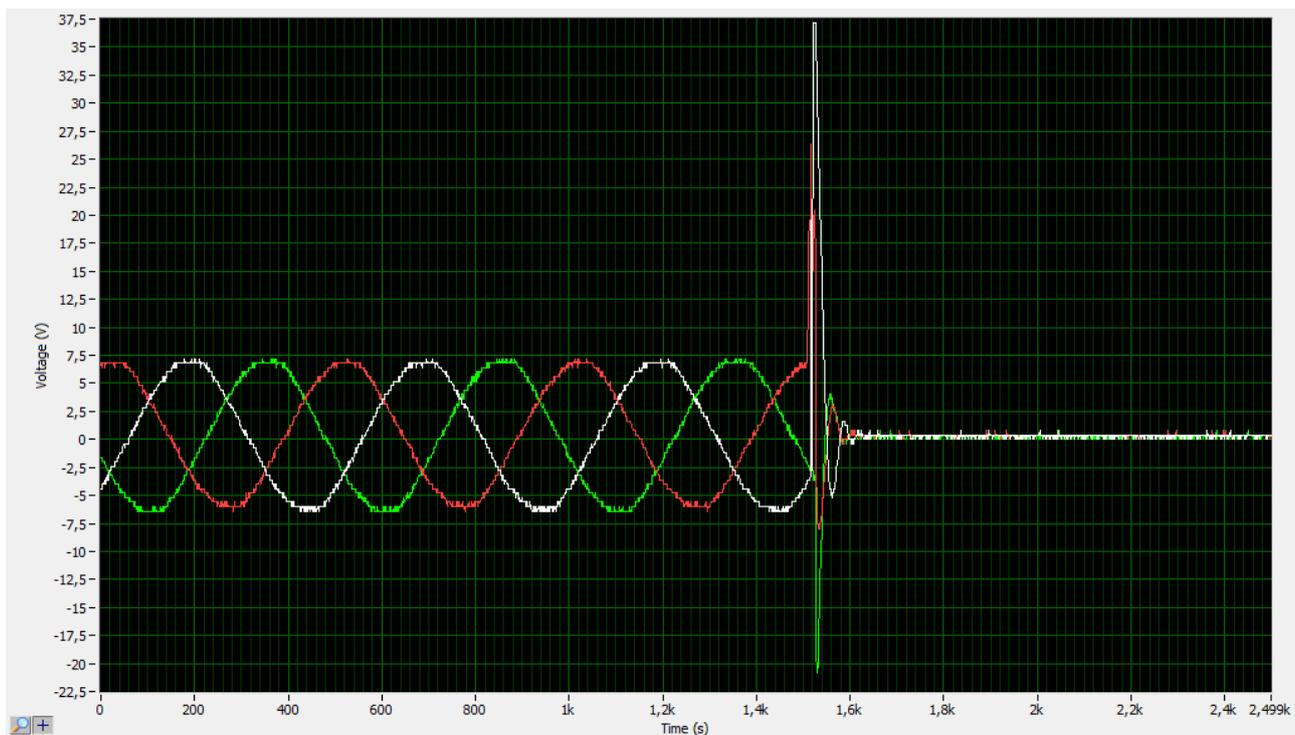


Рис. 4. Отключение трансформатора мощностью 250 кВ·А Кп.ф. = 4,73. Схема соединения RC-цепи «звезда»
Fig. 4. Disconnection of the transformer with the capacity of 250 kVA, line to earth voltage = 4.73.
Star connection of the RC circuit

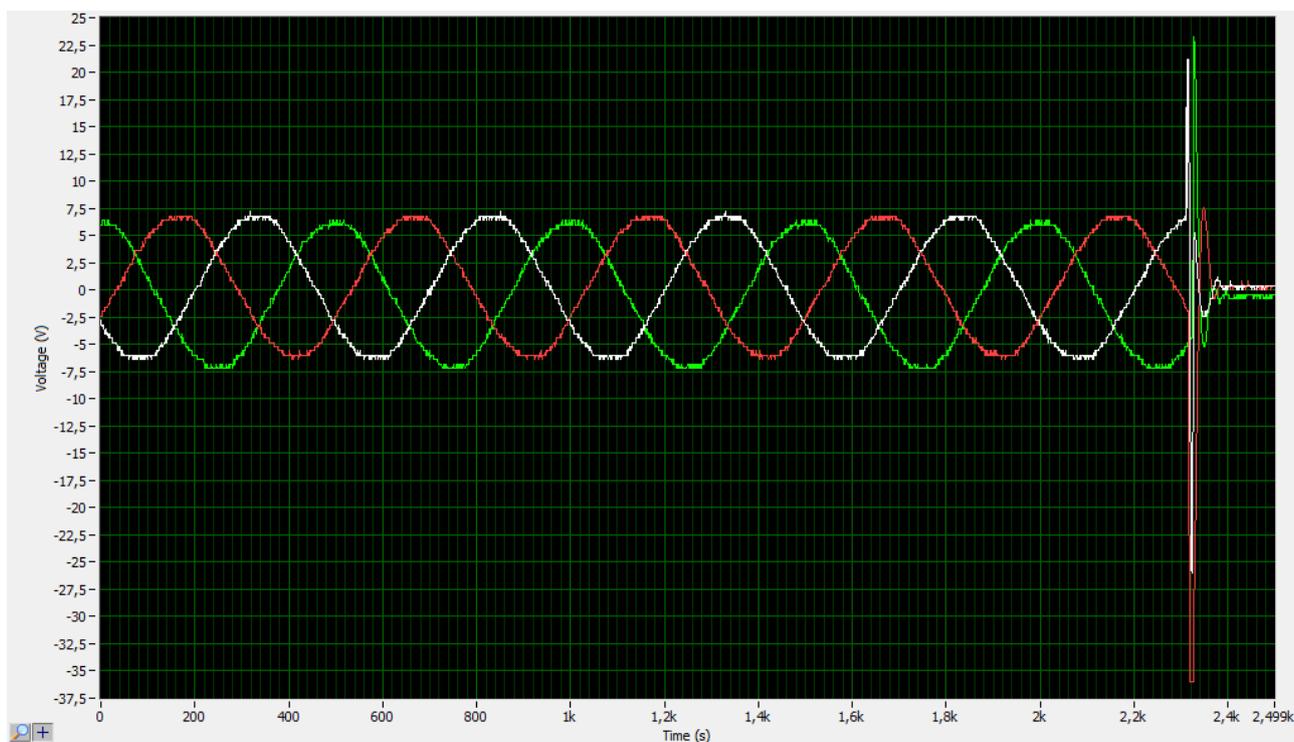


Рис. 5. Отключение трансформатора мощностью 400 кВ·А Кп.ф. = 4,54. Схема соединения RC-цепи «звезда»
Fig. 5. Disconnection of the transformer with the capacity of 400 kVA, line to earth voltage = 4.54.
Star connection of the RC circuit

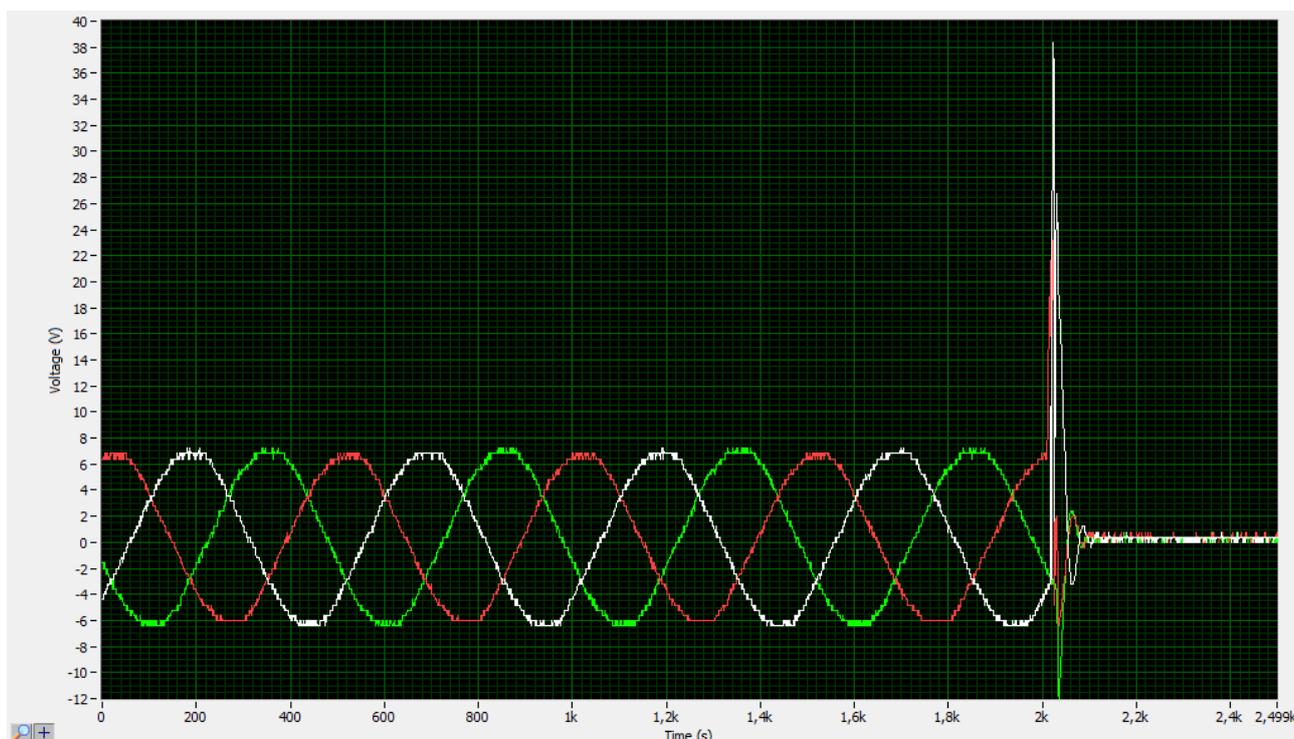


Рис. 6. Отключение трансформатора мощностью 630 кВ·А Кп.ф. = 4,51.
Схема соединения RC-цепи «звезда с нулем»
Fig. 6. Disconnection of the transformer with the capacity of 630 kVA, line to earth voltage = 4.51.
"Star with zero" connection of the RC circuit

Таблица 2. Результаты исследования коммутационных перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов с использованием RC-цепей для ограничения перенапряжений

Table 2. Results of studying switching overvoltages under power transformer switching using RC circuits to limit overvoltages

Схема соединения	Мощность трансформатора			
	160 кВ·А	250 кВ·А	400 кВ·А	630 кВ·А
Звезда	Кп.ф.* = 4,97 (рис. 3)	Кп.ф. = 4,73 (рис. 4)	Кп.ф. = 4,54 (рис. 5)	Кп.ф. = 4,51 (рис. 6)

*Кп.ф. – кратность перенапряжений по отношению к земле (фазное напряжение).

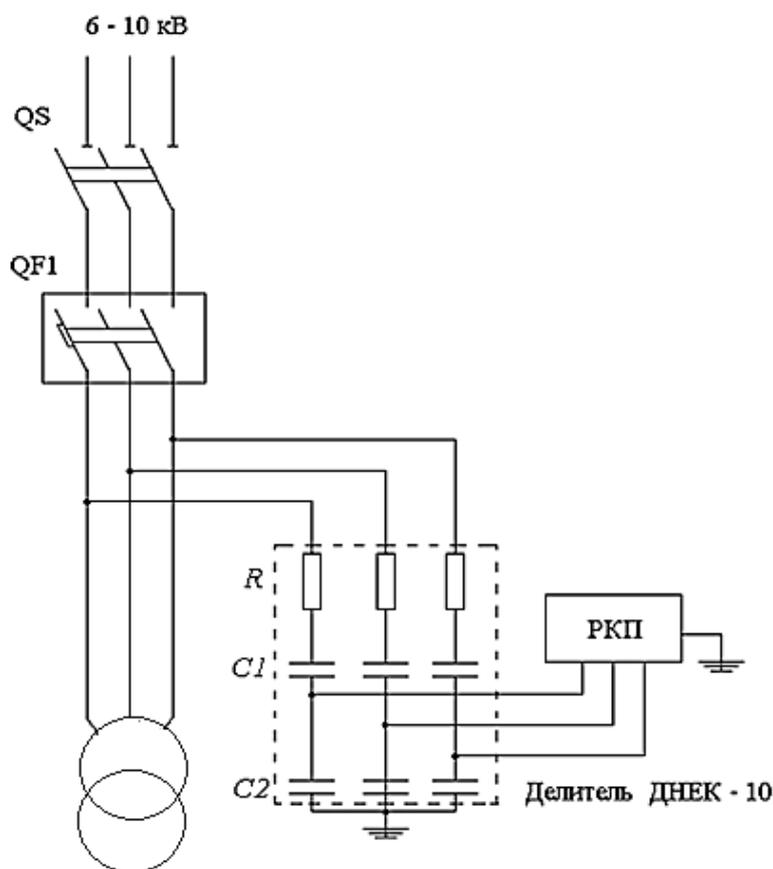


Рис. 7. Схема подключения и соединения RC-цепи «звезда с нулем»
Fig. 7. Wiring diagram and "star with zero" connections of the RC circuit

На рис. 7 приведена схема подключения и соединения RC-цепи к ВН трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализируя табл. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что экспериментальные исследования подтверждают эффективность использования RC-цепей с параметрами $R = 30 \text{ Ом}$, $C = 0,75 \text{ мкФ}$. Следовательно, для повышения надежности работы трансформаторов напряжением 6, 10 кВ и мощностью 630, 400, 250 и 160 кВ·А при ис-

пользовании вакуумных контакторов эксплуатация данных трансформаторов должна проводиться при использовании RC-цепей, подключенных к первичной обмотке ВН трансформатора [21]. Полученные результаты найдут широкое применение во всех областях промышленности, помогут повысить надежность схем электроснабжения, впервые смогут быть установлены и применены для ограничения КП в сетях до 1000 В, а также обладают научной новизной.

Список источников

1. Кузьмин С.В. Использование силовых трансформаторов для локализации высших гармоник в системах электроснабжения 0,4–10 кВ // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 268–270.
2. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семёнов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234.
3. Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю., Засухин Р.В. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.18635/20712219-2020-5-10-18>.
4. Shevryev Y.V., Shevryeva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry // Gornyi Zhurnal. 2019. Iss. 1. P. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>.
5. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 4. С. 86–93.
6. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
7. Клундук Г.А. Влияние преобразователя частоты на энергосбережение насосного агрегата и электромагнитная совместимость оборудования // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.). Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. С. 153–157.
8. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новокузнецк, 18–20 мая, 2004 г.). Новокузнецк: СибГИУ, 2004. С. 253–257.
9. Кузьмин Р.С., Завалов А.А., Майнагашев Р.А. Влияние компенсации реактивной мощности на величину перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 197–209. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3115>.
10. Кузьмин С.В., Ножин А.И. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6...10 кВ угольных разрезов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6...35 кВ: тр. II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новосибирск, 15–17 октября 2002 г.). Новосибирск, 2002. С. 183–187.
11. Кузьмин Р.С., Павлов В.В., Майнагашев Р.А., Зыков И.С., Дементьев В.В. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 2. С. 31–33.
12. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>.
13. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. P. 538. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
14. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem // International Journal of GEOMATE. 2020. Vol. 19. Iss. 72. P. 180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
15. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
16. Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А., Кузьмин С.В., Куликовский В.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>.
17. Кузьмин С.В., Майнагашев Р.А., Гаврилова Е.В., Немков С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54.
18. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.
19. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.
20. Santos D.P., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters // IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.

21. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 41–44.

References

1. Kuz'min S.V. Use of power transformers for localization of higher harmonics in 0.4 – 10 kV power supply systems. In: *Energoeffektivnost' sistem zhizneobespecheniya goroda: Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Energy efficiency of city life support systems: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2009, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2009, vol. 1, p. 268-270. (In Russ.).
2. Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Matul G.A., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Estestvennye i tekhnicheskije nauki = Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228-234. (In Russ.).
3. Brykalov S.M., Balyberdin A.S., Trifonov V.Yu., Zasukhin R.V. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energobezopasnost'i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10-18. (In Russ.).
4. Shevryev Y.V., Shevyreva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66-69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>.
5. Egorov A.N., Semenov A.S., Fedorov O.V. The practical experience of the application of the frequency converter power flex 7000 in the mining industry. In: *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86-93. (In Russ.).
6. Dutta N, Kaliannan P, Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(2):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
7. Klunduk G.A. Influence of a frequency converter on the power saving of a pump unit and electromagnetic compatibility of equipment. In: *Nauka i obrazovanie. Opyt, problemy, perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii = Science and Education. Experience, problems, development prospects: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 21–23 April 2020, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, vol. 1, p. 153-157. (In Russ.).
8. Skakunov D.A. Influence of power electronics on electric power quality and higher harmonics filtering methods. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 18–20 May 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2004, vol. 1, p. 253-257. (In Russ.).
9. Kuz'min R.S., Zavalov A.A., Majnagashev R.A. Influence of reactive power compensation on overvoltages value when switching power transformers. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(3):197-209. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3115>.
10. Kuz'min S.V., Nozhin A.I. Analysis of switching overvoltages in 6...10 kV networks of coal mines. *Ogranichenie perenapryazhenij i rezhimy zazemleniya nejtrali setej 6...35 kV: trudy II Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii = Overvoltage limitation and grounding modes of 6...35 kV network neutral network: Proceedings of the 2nd All-Russian scientific and technical conference*. 15–17 October 2002, Novosibirsk. Novosibirsk; 2002, p. 183-187. (In Russ.).
11. Kuz'min R.S., Pavlov V.V., Majnagashev R.A., Zykov I.S., Dement'ev V.V. Influence of switching overvoltages on 6 kV power supply system reliability in pits and mines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011;2:31-33. (In Russ.).
12. Panteleev V.I., Kuzmin I.S., Zavalov A.A., Tikhonov A.V., Umetskaya E.V. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):356-368. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>.
13. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(2):538. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
14. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem. *International Journal of GEOMATE*. 2020;19(72):180-189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
15. Akagi H. Active Harmonic Filters. In: *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128-2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
16. Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A., Kuzmin S.V., Kulikovskii V.S. *Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;5:116-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>.
17. Kuzmin S.V., Mainagashev R.A., Gavrilova E.V., Nemkov S.V. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53-54. (In Russ.).
18. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021;59:97-105.

https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.

19. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;122:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.

20. Santos D.P., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: *IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.

21. Kuzmin S.V., Gavrilova E.V., Baryshnikov D.V. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the communication overvoltage value appearing in the 6–10 kV circuits of mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2009;2:41-44. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тихонов Кирилл Валерьевич,
специалист ООО Научно-производственного
предприятия «РУТАС»,
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия;
магистрант,
Национальный исследовательский технологический
университет МИСиС,
119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1,
Россия
✉ tikhonovkv@bk.ru

Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.03.2022; одобрена после рецензирования 02.05.2022; принята к публикации 05.06.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirill V. Tikhonov,
Specialist of the Research and Production Enterprise
RUTAS LLC,
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia,
Master's Degree Student,
National University of Science and Technology MISIS,
4/1, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia.
✉ tikhonovkv@bk.ru

Contribution of the author

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 16.03.2022; approved after reviewing 02.05.2022; accepted for publication 05.06.2023.