



СНИЖЕНИЕ КРАТНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРНЫХ СЕТЯХ

Бельский Р.А., Фролов В.Я., Жилиготов Р.И., Сафонов Е.П.

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4545-1086>, belskij_ra@spbstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ исследования заключается в изучении проблемы коммутационных перенапряжений в генераторных сетях 10 кВ. Используя пакет MATLAB Simulink, создать модель собственных нужд электростанции на 10/0,4 кВ, рассчитать перенапряжение при разных срезках тока, оценить влияние вакуумных выключателей друг на друга, оценить эффективность нелинейных ограничителей перенапряжений, при параллельной коммутации. НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ состоит в получении метода расчёта переходных процессов при одновременной коммутации нескольких выключателей. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ заключается в возможности использовать полученную модель для более точного подбора защитного оборудования. МЕТОДЫ. Для создания модели собственных нужд 10/0,4 кВ и расчётов переходных процессов в ней использовался пакет MATLAB Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены коммутационные перенапряжения в собственных нуждах 10/0,4 кВ. Оценено влияние параллельной коммутации вакуумных выключателей на рост кратности перенапряжений. Так же было оценено влияние удельной энергоёмкости нелинейных ограничителей перенапряжений на кратность перенапряжений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данная модель показала, что параллельная коммутация двух вакуумных выключателей может повысить кратность перенапряжения на 20-40 %, что может привести к повышению износа, как изоляции защищаемого оборудования, так и к вероятности повторного пробоя в вакуумной камере. Причём чем выше срез тока, тем выше будет рост кратности перенапряжения, также кратность будет расти, если будет уменьшаться время отключения между выключателями. Основным средством защиты от коммутационных перенапряжений является нелинейный ограничитель перенапряжений, но при их выборе учитывается в первую очередь номинальное рабочее напряжения, что приводит к тому, что рост кратности перенапряжения от параллельной коммутации может нивелировать эффективность нелинейного ограничителя.

Ключевые слова: Собственные нужды электростанций; коммутационные перенапряжения; вакуумные выключатели; нелинейные ограничители перенапряжений; компьютерное моделирование; MATLAB Simulink

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному заданию FSEG-2023-0012

Для цитирования: Бельский Р.А., Фролов В.Я., Жилиготов Р.И., Сафонов Е.П. Снижение кратности коммутационного перенапряжения в генераторных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 96-107. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-96-107.

REDUCING THE FREQUENCY OF SWITCHING OVERVOLTAGE IN GENERATOR NETWORKS

Belsky R.A., Frolov V.Y., Zhilgotov R.I., Safonov E.P.

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4545-1086>, belskij_ra@spbstu.ru

Abstract: THE PURPOSE of the study is to study the problem of switching overvoltages in 10 kV generator networks. Using the Matlab Simulink package, create a model of common auxiliaries of a 10/0.4 kV power station, calculate the overvoltage at different sections of the current, evaluate the effect of vacuum switches on each other, evaluate the effectiveness of

nonlinear overstrain limiters, with parallel switching. THE SCIENTIFIC SIGNIFICANCE consists in obtaining a method for calculating transients with simultaneous switching of several switches. THE PRACTICAL SIGNIFICANCE lies in the possibility of using the resulting model for a more accurate selection of protective equipment. METHODS. To create a model of common auxiliaries of 10/0.4 kV and the calculations of transition processes, it used a Matlab Simulink package. RESULTS. The article discusses switching overvoltages in their own needs of 10/0.4 kV. The influence of parallel switching of vacuum circuit breakers on the increase in the multiplicity of overvoltages is estimated. The influence of the specific energy intensity of nonlinear surge limiters on the multiplicity of overvoltages was also evaluated. CONCLUSION. This model showed that the parallel switching of two vacuum circuit breakers can increase the frequency of overvoltage by 20-40 %, which can lead to an increase in wear of both insulation of the protected equipment and the probability of re-breakdown in a vacuum chamber. Moreover, the higher the current cut, the higher the increase in the frequency of the overstrain, the multiplicity will also increase if the shutdown time between the switches is reduced. The main means of protection against switching overvoltages is a non-linear overstrain limiter, but when they are selected, the nominal working voltage is primarily taken into account, which leads to the fact that the increase in the frequency of overstrain from parallel switching can level the effectiveness of a nonlinear limiter.

Keywords: Common auxiliaries; switching overvoltage; vacuum circuit breakers; surge arrester; computer modelling; Matlab Simulink.

Acknowledgments: This work, based on the results of which the article was completed, was carried out according to the State task of FSEG-2023-0012

For citation: Belsky R.A., Frolov V.Y., Zhilgotov R.I., Safonov E.P. Reducing the frequency of switching overvoltage in generator networks. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 96-107. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-96-107.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день в России продолжается модернизация распределительных подстанций и генераторных сетей, в частности происходит замена вакуумными выключателями воздушных и масляных выключателей [1,2,3]. Выбор в пользу вакуумных выключателей происходит благодаря ряду его преимуществ: автономность, высокая эксплуатационная надежность, высокое быстродействие и т.д. Но из-за неустойчивости дуги при малых токах, вакуумные выключатели способны создавать коммутационные перенапряжения, приводящие к износу оборудования и изоляции. С этой точки зрения наиболее тяжелым является случай, при котором происходит одновременное отключение нескольких потребителей вакуумными выключателями [4]. Подобное возможно:

- 1) При работе устройства резервирования отключения выключателя (УРОВ).
- 2) При использовании дифференциальной защиты шин (ДЗШ).
- 3) Частотная разгрузка сети.

Как указано в [1] и [5], подобные перенапряжения могут быть и в системе электроснабжения собственных нужд электростанций. Как можно увидеть из типичной однолинейной схемы собственных нужд атомной электростанции (рис 1) здесь имеет место быть подключению к одной шине множества коммутационной аппаратуры, что создаёт высокий риск одновременной ее коммутации. Поскольку такие режимы возможны и в генераторных сетях АЭС, то данная проблема требует более тщательного рассмотрения с точки зрения анализа коммутационных перенапряжений, генерируемых вакуумными выключателями. Данная работа представляет актуальность, поскольку она предоставляет метод расчёта переходных процессов в сетях собственных нужд электростанций при одновременном отключении нескольких выключателей. Цель исследования заключается в анализе переходных процессов в генераторных сетях при одновременном отключении нескольких вакуумных выключателей, а также в разработке метода снижения кратности перенапряжения с помощью ОПН.

Для того чтобы определить, имелись ли решения подобной проблемы ранее, был проведен анализ материалов, посвящённых проблеме коммутации вакуумных выключателей:

– В [1] рассмотрены эксплуатационные преимущества вакуумных выключателей для средних классов напряжений. Описано устройство и развитие вакуумной техники. Даны основные преимущества вакуумных выключателей над остальными. Большая часть работы посвящена отключению вакуумными выключателями электрических двигателей и

конденсаторных батарей. Авторы рекомендуют использовать для защиты ОПН. Все опыты проходили только с одним выключателем.

– [4] – одна из немногих работ, в которых рассматривается проблема взаимодействия вакуумных камер между собой. В данной работе отмечен рост тока короткого замыкания вместе с ростом числа вакуумных камер, но возникающие осложнения компенсировались равномерным распределением тока по камерам. Все опыты проходили на одной шине и одном потребителе.

– В [5] указано, что при высокочастотных перенапряжениях ОПН малоэффективны, не оказывают влияния на частоту воздействующего напряжения. Для защиты от высокочастотных предполагается использование RC-цепочек, но указано, что они являются дорогими и могут возникнуть проблемы с выбором ёмкости и размещением, особенно если это двигатель.

– Авторами статьи [6] была создана модель в виде идеального выключателя с подключёнными параллельно пассивными элементами. Все расчёты посвящены взаимодействию вакуумного выключателя и трансформатором. В данной статье рассматривается только высокочастотный ток.

– В работе [7] рассматривалась модель ВВ, работающего с шунтирующим реактором. Показано, что напряжение при отключении шунтирующего реактора может возрастать с 24 кВ до 41 кВ, что может отрицательно сказаться на изоляции трансформаторов.

– В работа [8] были проведены опыты с ОПН на напряжения 10 кВ с целью определения импеданса цепи заземления. По результатам что увеличение импеданса способно увеличить остаточное напряжение, что может привести к увеличению кратности перенапряжений.

– В статье [9] приведена модель вакуумного выключателя - созданная в программе АТР-ЕМТР – отключающая ёмкостной элемент. Авторы указывают на какие параметры стоит опираться в первую очередь при моделировании: ток среза и наклон тока. Все приведённые ниже исследования проводились на основе исследований данных в этой статье.

– Статья [10] также разбирает отключение шунтирующего реактора вакуумными выключателями, но на напряжение 35 кВ. Авторы утверждают, что на рост перенапряжения влияет не только срез тока, но и одновременное отключение фаз в вакуумном выключателе. В статье моделируется отключение первой фазы и последующего отключения второй и третьей фазы. Моделирование осуществлялось в программе PSCAD/EMTDC. Основным источником перенапряжения является срез тока при отключении первой фазы, к которому добавляются перенапряжения от срезов тока второй и третьей фазы.

Для решения проблемы с повышением перенапряжения предлагается использовать асинхронное отключение фаз: последние два полюса не будут двигаться пока не будет открыта первая фаза. За счёт этого формируется значительный временной промежуток, который снижает кратность перенапряжения.

– Вакуумные выключатели широко используются в морских ветряных электростанциях и из-за частых коммутация генерируют перенапряжения, ухудшающие качество изоляции. Авторы [11] предлагают для защиты, помимо ОПН и RC-цепи использовать умный дроссель (smart choke). Перенапряжения моделировались с помощью INPSCAD/EMTDC, при моделировании учитывались крутизна, амплитуда и повторное зажигание. Результаты показывают, что комбинация ОПН и умного дросселя способна обеспечить достаточную защиту от высокой амплитуды напряжения и повторных зажиганий.

– В статье [12] рассматривается проблема отключения шунтирующих реакторов вакуумными выключателями в сети 20 кВ. Дана оценка различным методам защиты от перенапряжений - ОПН и RC-цепи. Результаты моделирования, сделанные в программе PSCAD/EMTDC, показывают, коммутационные перенапряжения, вызванные вакуумными выключателями способны приводить к повторным пробоям, что в свою очередь приводит к износу, изоляции Авторы предлагают использовать RC-цепи, благодаря гибкости подбора параметров. Одновременно с этим авторы предлагают использовать ОПН благодаря его простоте и доступности, при этом в статье указано, что для установки ОПН необходимо проводить компьютерное моделирование и проверять вольтамперную кривую, для оптимизации работы в сети. Одновременно отключение нескольких выключателей в статье не рассматривалось.

– В статье приведена [13] модель трансформаторной подстанции на 10 кВ в АТР-ЕМТР. В модели были учтены срезы тока, диэлектрическая прочность изоляции и модель высокочастотной дуги. Модель делалась с учётом повторного зажигания дуги. Смоделированы условия, при которых выходит из строя шунтирующий реактор. Основной упор делался на влияние перенапряжений на кабели и шины. Результаты исследования

показывают, что тип кабеля не оказывают существенного влияния на перенапряжение, а оказывают режим работы трансформатора и длина кабеля. По мере увеличения длины кабеля уменьшается перенапряжение на оборудовании. Перенапряжение на реакторах и трансформаторах можно уменьшить, увеличив поперечное сечение кабеля.

– Работа [14] посвящена параллельному отключению вакуумных выключателей. Схему с параллельным отключением предполагается использовать для отключения высоких значений тока короткого замыкания. Данную схему авторы предлагают использовать для отключения емкостных цепей. Модель была создана на базе Matlab и содержит в себе ударный генератор с током короткого замыкания 160 кА. По результатам работы показано, что асимметрии ветвей, к которым подключены выключатели мало влияет на результат отключения, также параллельное использование выключателей мало влияет на переходное восстанавливающееся напряжение.

– В статье [15] была построена в MATLAB с учётом тока среза, высокочастотной дуги и повторных пробоев. Особенность модели заключается в большом количестве параметров, закладываемых при моделировании. Данную модель можно использовать для отслеживания анализа и оценки риска перенапряжения при постоянных отключениях.

На основе проанализированного можно сделать вывод: на сегодняшний день проблемы параллельной коммутации рассмотрены недостаточно подробно, хотя создаваемые им аварийные режимы, могут иметь место в генераторных сетях и приводить к эскалации перенапряжения. Поэтому и были произведены исследования, представленные в данной работе, чья научная значимость состоит в разработке метода расчёта переходных процессов при одновременно отключении нескольких выключателей, который в дальнейшем можно использовать для расчёта не только генераторных сетей, но и любых сетей средних напряжений; а практическая значимость состоит в возможности использования данной модели для улучшения защиты собственных нужд электростанций за счёт более точного подбора ОПН.

Материалы и методы (Materials and methods)

Схема системы собственных нужд (рис 1), на основе которой создана модель, представлена на рисунке 2. Особенностью модели, представленной в данной статье, является то, что в ней учитывается как тока среза, так и ток высокой частоты, который может возникать при отключении выключателя.

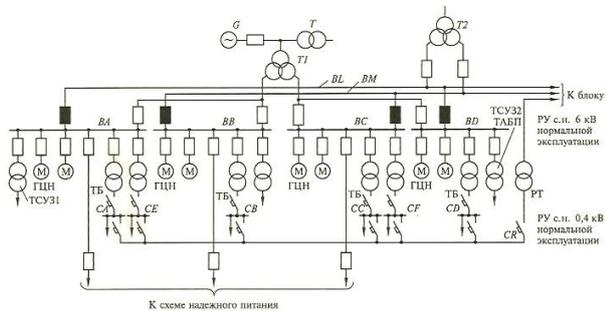


Рис. 1. Схема электроснабжения потребителей собственных нужд третьей группы одного блока АЭС *Fig. 1. The scheme of power supply to consumers of their own needs of the third group of one NPP unit AES*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

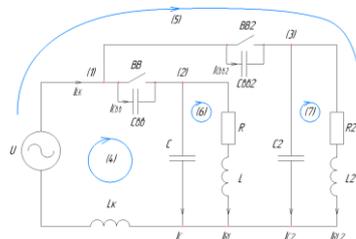


Рис. 2. Схема замещения цепи, отключаемой двумя вакуумными выключателями *Fig. 2. Replacement circuit diagram of a circuit switched off by two vacuum switches*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Контур, отвечающий за ток высокой частоты, состоящий из емкостей $C_{вв}$ (вакуумный выключатель) и C (эквивалентная ёмкость потребителя.), а также из индуктивности L (индуктивность первого потребителя). $C_{вв}$ также отвечает за рост перенапряжения при срезе тока в вакуумном выключателе. Основные колебательные процессы происходят в контуре C и L .

Система операторных уравнений для расчёта переходных процессов операторным методом в схеме с двумя выключателями (рис 2), которая учитывает всё вышеперечисленное, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} I_{LK} = I_{C_{BB}} + I_{C_{BB2}} \\ I_{C_{BB}} = I_C + I_{RL} \\ I_{C_{BB2}} = I_{C_2} + I_{RL2} \\ E(p) = I_{L_K} \cdot L_K \cdot p + I_{C_{BB}} \cdot 1/(C_{\sigma\sigma} \cdot p) + I_C \cdot 1/(C \cdot p) \\ E(p) = I_{L_K} \cdot L_K \cdot p + I_{C_{BB2}} \cdot 1/(C_{\sigma\sigma2} \cdot p) + I_{C_2} \cdot 1/(C2 \cdot p) \\ I_C \cdot 1/(C \cdot p) = I_{RL} \cdot (R + L \cdot p) \\ I_{C_2} \cdot 1/(C2 \cdot p) = I_{RL2} \cdot (R_2 + L_2 \cdot p) \end{cases}$$

где U – источник питания, L_K – индуктивность шины, R – активное сопротивление первого потребителя, L – индуктивность первого потребителя, C – эквивалентная ёмкость первого потребителя, C_{BB} – эквивалентная ёмкость первого выключателя, R_2 – активное сопротивление второго потребителя, L_2 – индуктивность второго потребителя, C_2 – эквивалентная ёмкость второго потребителя, C_{BB2} – эквивалентная ёмкость второго выключателя, I_{LK} – ток в шине, $I_{C_{BB}}$ – ток через эквивалентную ёмкость первого выключателя, I_C – ток через эквивалентную ёмкость первого потребителя, I_{RL1} – ток первого потребителя, I_{RL2} – ток второго потребителя.

Поскольку уравнение имеет семь переменных, было принято решение рассчитать переходный процесс в программе MATLAB Simulink, модель для 10 кВ в данной среде представлена на рисунке 3, где C – эквивалентная ёмкость потребителей, RL – активно-индуктивное сопротивление потребителей, BB – вакуумный выключатель, $ОПН$ – нелинейный ограничитель потребителей.

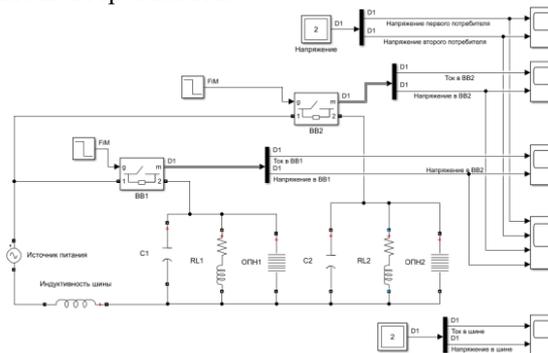


Рисунок 3. Подключение ОПН к нагрузкам. Модель в MATLAB Simulink. Отключение двух выключателей в программе MATLAB Simulink.

Figure 3. Connection of the surge arrester to loads. The model in MATLAB Simulink. Disabling two switches in the MATLAB Simulink program.

Сам расчёт для модели, представленной на рисунке 3, строится по следующему алгоритму:

- 1) Задаём значение напряжения источника, активных и индуктивных сопротивлений потребителей и эквивалентной мощности потребителей для модели на рисунке 3.
- 2) Производится расчёт для нормального режима (контакты обоих выключателей замкнуты для выключателей, находящихся в замкнутом положении).
- 3) Выбираем точки, соответствующие срезам тока 0,5 А, 1 А и 2А в нагрузках.
- 4) Производим расчёт коммутации одного выключателя.
- 5) Производим расчёт при отключении двух выключателях при промежутке между отключениями на 1,2,4,6,8,10,20 и 40 мкс.

Для проверки эффективности нелинейных ограничителей для снабжения кратности перенапряжений, аналогичные расчёты были произведены для модели на 10 кВ при подключенных ОПН. На рис 3 ОПН подключен к потребителям.

Результаты (Results)

Из расчёта получаем графики для напряжений на конденсаторах и токов в индуктивностях при нормальном режиме работы на рисунках 4-5. Результаты для коммутации одного выключателя при токе среза 2 А представлены на рисунках 6-8. Для оценки частоты, на рисунке 12 представлен период колебаний напряжения на первом вакуумном выключателе.

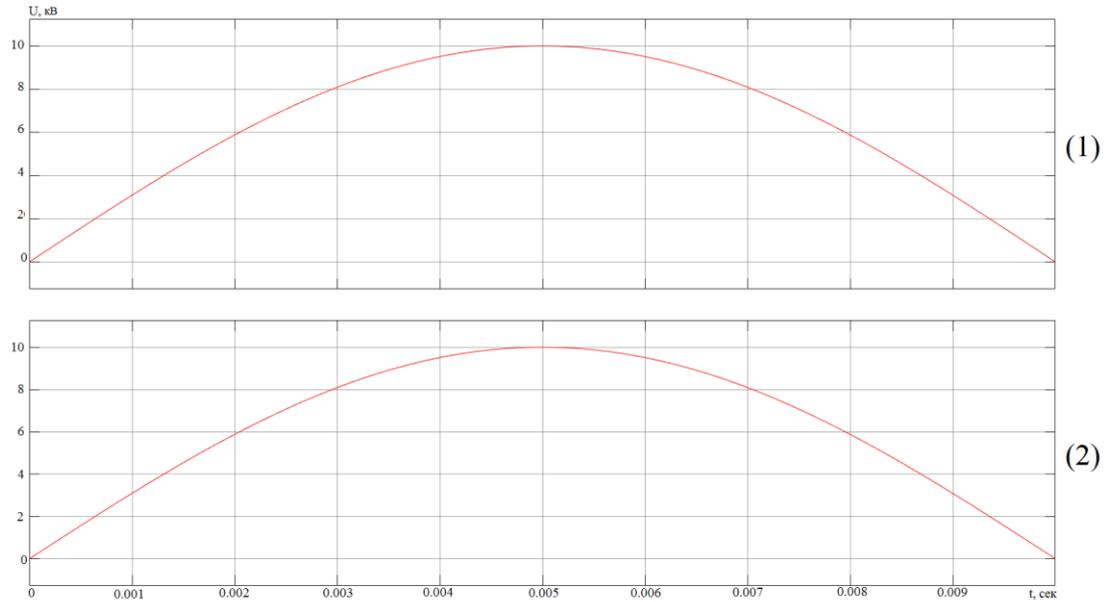


Рис. 4. Начальное напряжение. 1 – напряжение на эквивалентной ёмкости первого потребителя, 2 – напряжение на эквивалентной ёмкости второго потребителя

Fig. 4. Initial voltage. 1 – voltage at the equivalent capacity of the first consumer, 2 – voltage at the equivalent capacity of the second consumer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлены напряжения на потребителях при нормальном режиме работы. Данный график нужен для того, чтобы определить начальные точки для расчёта переходного процесса.

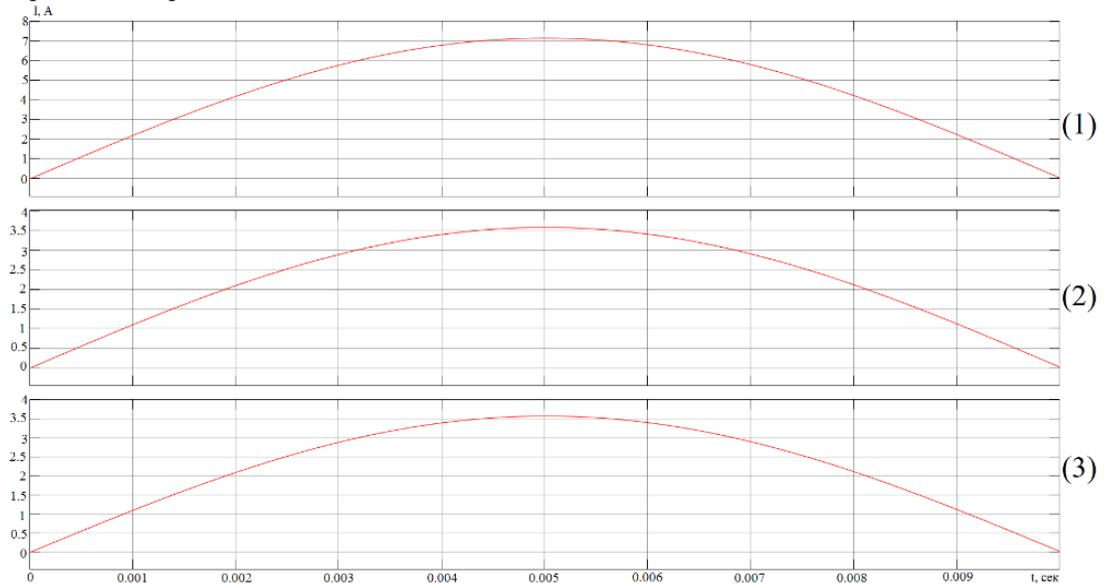


Рис. 5. Начальный ток. 1 – ток шины, 2 – ток через индуктивность первого потребителя, 3 – ток через индуктивность второго потребителя

Fig. 5. Initial current. 1 – bus current, 2 – current through the inductance of the first consumer, 3 – current through the inductance of the second consumer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 5 (также, как и на рис 4.) представлена работа модели при нормальном режиме, но представлены токи в потребителях и общий ток, который является суммой токов в потребителях. Именно по этому графику выбираются токи среза согласно вышеприведённому алгоритму. Выключатель должен отключаться при достижении током 2, 1 и 0,5 А соответственно.

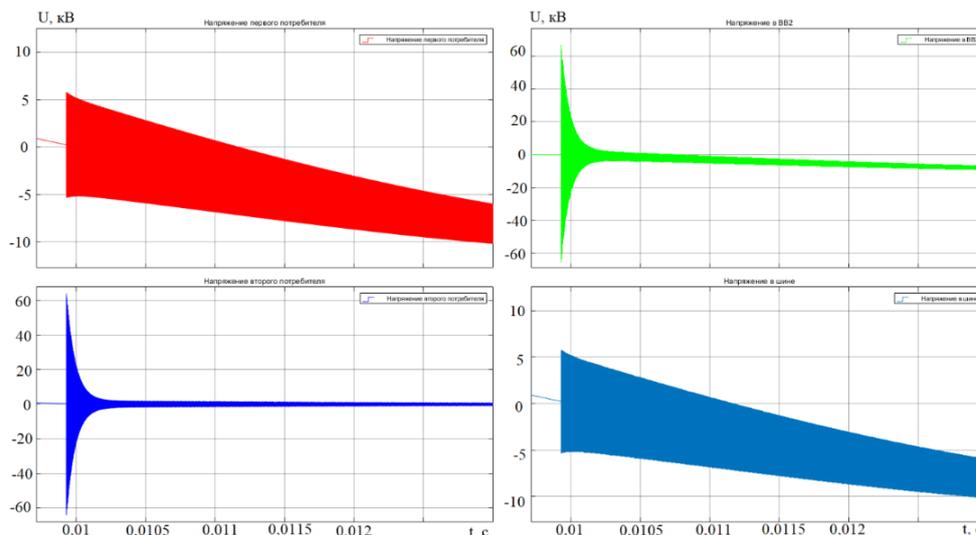


Рисунок 6. Напряжение при отключении одного выключателя. Срез тока 2А
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результат переходного процесса при выключении одного выключателя со срезом тока 2 А представлен на рисунке 6. На данных графиках можно увидеть переходный процесс на первом и втором потребителе, шине и между контактами отключаемого выключателя. В данном опыте напряжение выросло в шесть раз относительно номинального как на потребителе, так и между контактами самого выключателя. Также можно видеть, что перенапряжение перешло на потребителя, который ещё не был отключен. Сам переходный процесс длится 500 мкс и содержит гармонические составляющие.

Аналогичные графики можно наблюдать и при срезах тока 1 и 0,5 А, но кратность перенапряжения при этом будет снижаться.

Так же были сделаны опыты с отключением двух выключателей с разностью времени отключения в 1,2,4,6,8,10,20 и 40 мкс. Кратности полученных перенапряжений приведены на гистограммах в Обсуждении.

На рисунке 7 показан срез тока в 2 А и вызванный им переходный процесс между контактами выключателя.

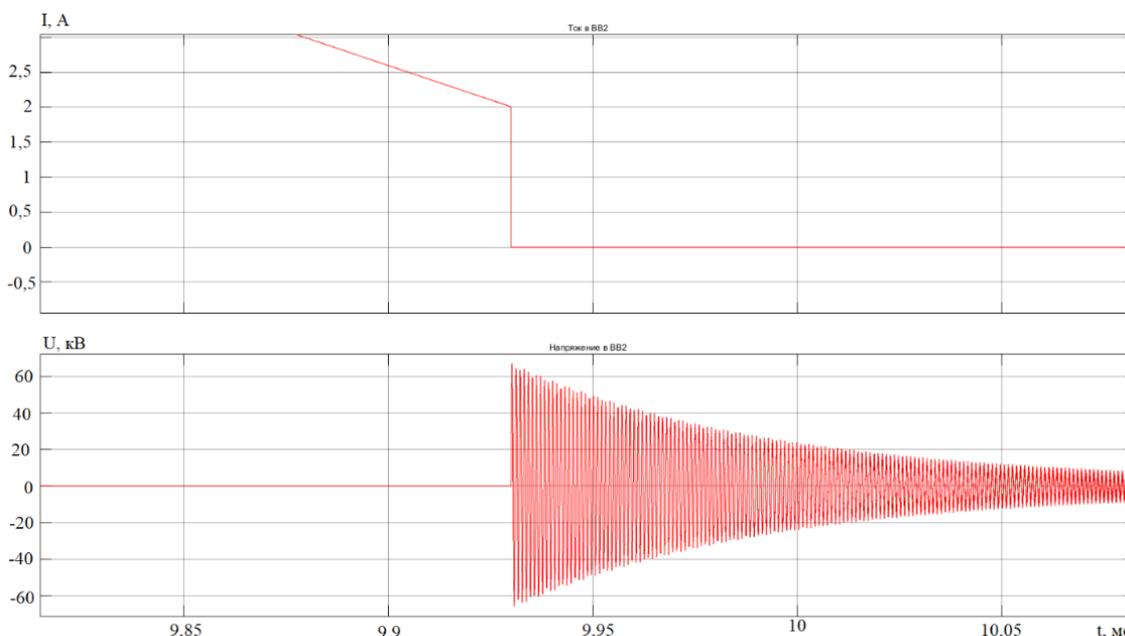


Рис. 7. Ток и напряжение при отключении одного выключателя. Срез тока 2А
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 8 представлено увеличенное напряжение между контактами отключаемого выключателя. С помощью этого рисунка можно оценить кратность перенапряжения и оценить его частоту.

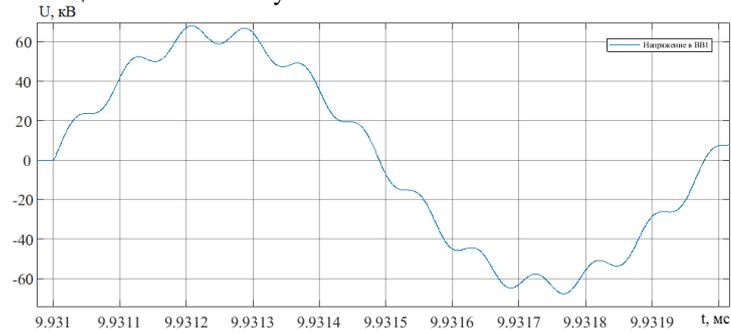


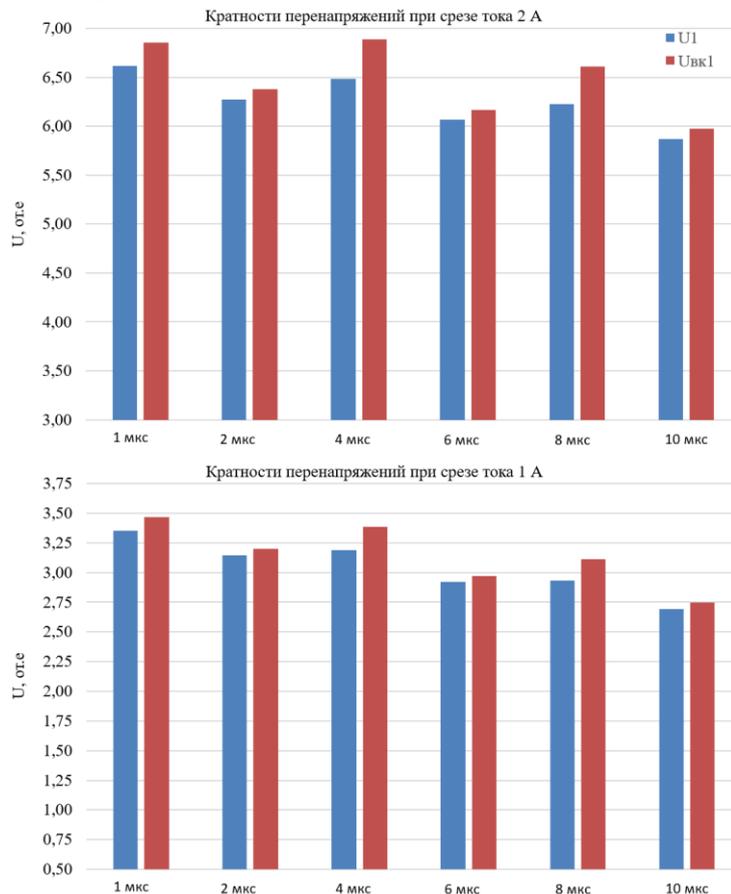
Рис. 8. Напряжение на первом вакуумном выключателе Fig. 8. Voltage at the first vacuum circuit breaker

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Получив, данные необходимо выяснить кратность перенапряжений и их зависимость от времени между отключаемыми выключателями. Для всех опытов на 10 кВ, при отключении двух выключателей, составлена гистограмма рис. 9 для всех максимальных напряжений первого выключателя и первого потребителя. Для аналогичных опытов с ОПН представлена гистограмма на рис. 10 для ОПН с разной пропускной способностью на 400, 550 и 650 А. Переходный процесс происходил с частотой 1,1 кГц.

По гистограмме представленной на рисунке 9 оценить влияние среза тока и времени отключения между выключателями на кратность перенапряжения. Видно, что кратность перенапряжения увеличивается как при росте среза тока, так и при уменьшении времени отключения между выключателями, при этом наибольшей кратности перенапряжения достигает при 2 мкс, а при 1 и 4 мкс может быть меньше, это обуславливается тем, что напряжение при переходном процессе обладает высокочастотными составляющими и при отключении второго выключателя может начаться не в пике напряжения при перенапряжении на первом.



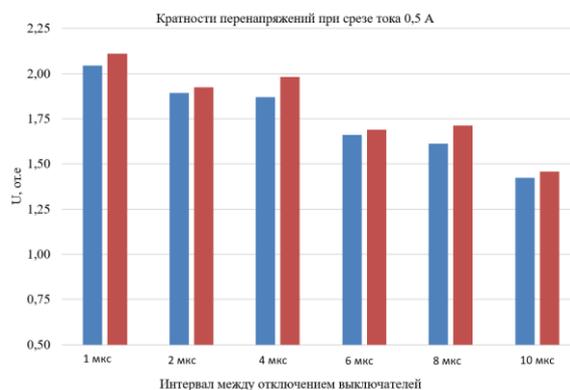


Рис. 9. Кратности перенапряжений относительно амплитудного в зависимости от времени отключения между выключателями для разных срезов тока. 10 кВ. U_1 – напряжение первого потребителя, $U_{вк1}$ – напряжение первого выключателя

Fig. 9. Multiplicities of overvoltages relative to the amplitude, depending on the time of disconnection between switches for different current chopping. U_1 – the voltage of the first consumer, $U_{вк1}$ – the voltage of the first switch

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

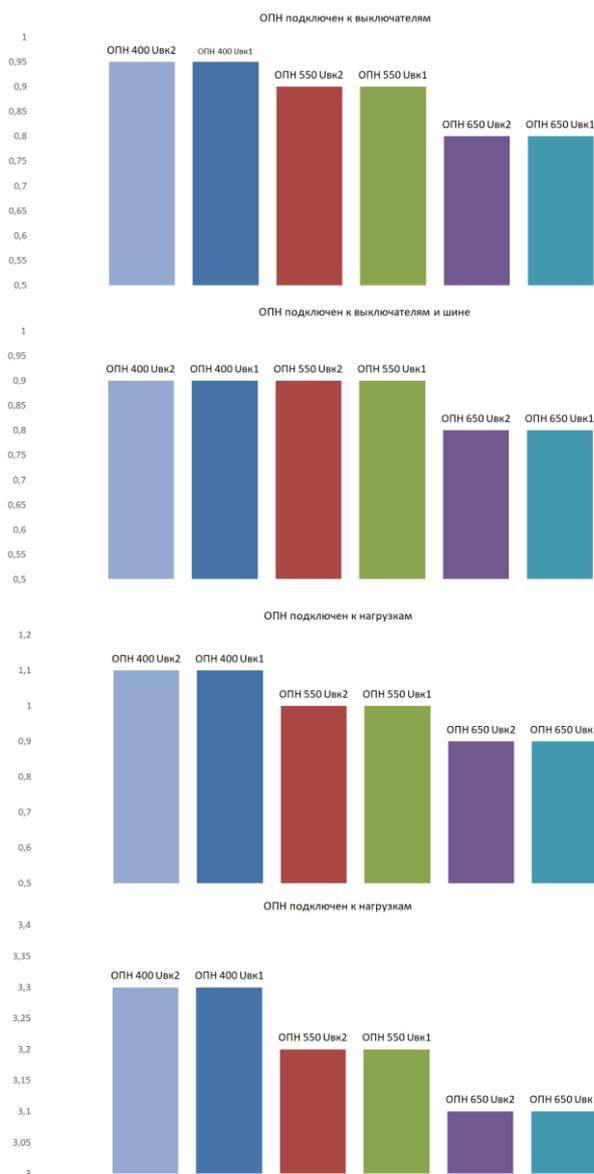


Рис. 10. Кратности перенапряжений при работе ОПН в MATLAB Simulink при перенапряжениях на 10 кВ

Fig. 10. Overvoltage multiplicities during operation of the surge arrester in MATLAB Simulink at overvoltages of 10 kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки эффективности защитных функций ОПН, были произведены дополнительные опыты на модели (рис 3) с тремя видами нелинейных ограничителей при разных способах подключения относительно потребителей и выключателей. Результаты представлены на гистограмме на рис 10. Из гистограмм видно, что для снижения кратности перенапряжений лучше брать ОПН с большей удельной энергоёмкостью и устанавливать непосредственно у потребителей или выключателей.

Заключение или Выводы (Conclusions)

В данной работе в среде MATLAB Simulink были созданы модели для расчёта переходных процессов в генераторной сети. А также четыре модели с нелинейными ограничителями перенапряжений. Оценены кратности перенапряжений при работе разных ОПН в сетях среднего напряжения и разных способах подключений этих ОПН. Установлено, что эффективное снижение перенапряжений даст любой способ подключения ОПН, но наиболее подходящими при этом будут варианты:

- 1) с подключением двух ОПН параллельно выключателям,
- 2) с подключение двух ОПН параллельно выключателям и одного дополнительного ОПН на общей шине.

При этом наилучшие показатели были у ОПН с малым напряжением срабатывания и высокой удельной энергоёмкостью.

При невозможности изменения схемы подключения варисторов, необходимо выбирать ОПН с большей поглощаемой энергией, которую не редко используют только при возможности однофазного короткого замыкания с высокими значениями ток. Также при подборе защитного оборудования следует обращать внимание на ВАХ варистора. Также отметим, что помимо снижения уровня перенапряжений можно добиться снижения уровня шума, возникающие при отключении выключателей.

Литература

1. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). 2-е изд., перераб. и доп. СПб: Издательство Терция, 2006. 148 с.
2. Сафонов Е.П., Фролов В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 105-118.
3. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 90-104.
4. Перцев А.А., Белкин Г.С. Коммутационные процессы в вакуумных выключателях с параллельным соединением дугогасительных камер // Электротехника. 2011. № 3. С. 39.
5. Халилов, Ф.Х., Евдокунин Г. А., В. С. Поляков. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петербург. отд-ние, 2002. 271 с.
6. Abdulahovic. T., Thiringer T. Vacuum Circuit Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies // Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). 2010. Vol. 32, Issue: 3. pp. 1165 - 1172.
7. Buyung M., Satyagraha K. Application of Surge Arrester on Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012; Shanghai, China; 2012.
8. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И. Зависимость уровня перенапряжений ОПН разных классов напряжения от параметров заземляющих устройств. Эксперимент и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. №5-13(39). С. 29
9. Wróblewski Z., Budzisz J. Overvoltage and overcurrent in a capacity circuit generated by a vacuum switch: Proceedings of the 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering; 16-19 May 2010; Prague, Czech Republic; 2010.
10. Huang Z., Tan W., Mao Q, et al. Controlled Breaking Strategy of Shunt Reactor Based on Fast Vacuum Switch: Proceedings of the 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST); 13-16 October 2019; Kitakyushu, Japan, 2019; pp. 698-701.
11. Xin Y. Development of Improved Suppression Measures Against Reignition Overvoltages Caused by Vacuum Circuit Breakers in Offshore Wind Farms //IEEE Transactions on Power Delivery. 2022.Vol. 21, N1, pp. 517-527.
12. Asadi Q., Qasemi M., Amini A., et al. Minimizing Overvoltages on Medium Voltage VCBs Due to Shunt Reactor Switching: Proceedings of the 2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems; 30-31 December 2020; Shiraz, Iran; 2020. pp. 25-29.

13. Liu G., Guo F., Yuan K. Overvoltage Simulation and Analysis of Switching-off Shunt Reactor with 12kV Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering; 04-07 June 2020; Chengdu, China, 2020. pp. 1610-1614.

14. Su X., Luo J., Xu B., et al. Research on parallel mean flow technology of high-voltage vacuum circuit breaker: Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA); Changchun, China; 2022. pp. 146-149,

15. Zhou F., Tang W., Ma Y., et al. Research on Circuit Breaker Switching Model Modified Based on Measured Data Considering Multi Stochastic Factors: Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; Beijing, China; 2020. pp. 1-4.

Авторы публикации

Бельский Родион Артёмович – старший преподаватель ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4545-1086>. belskij_ra@spbstu.ru

Фролов Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375>. frolov_vya@spbstu.ru

Жилиготов Руслан Игоревич – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0244-8998>. zhiligitov_ri@spbstu.ru

Сафонов Евгений Павлович – ассистент, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588>. safonov_ep@spbstu.ru

References

1. Evdokunin GA, Tiler G. Modern vacuum switching equipment for medium voltage networks (technical advantages and operational characteristics). 2nd ed. SPb: Publishing house Tertsiya; 2006. (In Russ).

2. Safonov E.P, Frolov V.Ya. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2021. 23(1):105-118. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118

3. Chervonchenko S.S, Frolov V.Ya. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2022. 24(4):90-104. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-10

4. Pertsev A.A, Belkin G.S. Switching processes in vacuum circuit breakers with parallel connection of arc extinguishing chambers // Elektrotehnika. 2022. (4):39. (In Russ).

5. Khalilov F.Kh. Protection of 6-35 kV networks from overvoltage. SPb: Energoatomizdat. 2002. (In Russ).

6. Abdulahovic. T, Thiringer T. Vacuum Circuit Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies. *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. 2010; 32 (3): 1165 - 1172. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357993

7. Buyung M, Satyagraha K. *Application of Surge Arrester on Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012; Shanghai, China*; 2012. doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307348

8. Adam'yan Yu.E, Bocharov Yu.N, Krivosheev S.I. Dependence of the level of overvoltage of surge arrester of different voltage classes on the parameters of grounding devices. Experiment and simulation. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016; 5-13(39):29. (In Russ).

9. Wróblewski Z, Budzisz J. *Overvoltage and overcurrent in a capacity circuit generated by a vacuum switch: Proceedings of the 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering; 16-19 May 2010; Prague, Czech Republic*; 2010. doi: 10.1109/EEEIC.2010.5489980

10. Huang Z, Tan W, Mao Q, et al. *Controlled Breaking Strategy of Shunt Reactor Based on Fast Vacuum Switch: Proceedings of the 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST); 13-16 October 2019; Kitakyushu, Japan*, 2019; pp. 698-701. doi: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928747.

11. Xin Y. Development of Improved Suppression Measures Against Reignition Overvoltages Caused by Vacuum Circuit Breakers in Offshore Wind Farms //IEEE Transactions on Power Delivery. 2022; 21(1):517-527. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3064306.

12. Asadi Q, Qasemi M, Amini A, et al. *Minimizing Overvoltages on Medium Voltage VCBs Due to Shunt Reactor Switching: Proceedings of the 2020 15th International Conference on Protection and*

Automation of Power Systems; 30-31 December 2020; Shiraz, Iran; 2020. pp. 25-29. doi: 10.1109/IPAPS52181.2020.9375585.

13. Liu G, Guo F, Yuan K. *Overvoltage Simulation and Analysis of Switching-off Shunt Reactor with 12kV Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering; 04-07 June 2020; Chengdu, China, 2020. pp. 1610-1614. doi: 10.1109/ACPPEE48638.2020.9136172.*

14. Su X, Luo J, Xu B, et al. Research on parallel mean flow technology of high-voltage vacuum circuit breaker: *Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA); Changchun, China; 2022. pp. 146-149, doi: 10.1109/EEBDA53927.2022.9744928.*

15. Zhou F, Tang W, Ma Y, et al. Research on Circuit Breaker Switching Model Modified Based on Measured Data Considering Multi Stochastic Factors: *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; Beijing, China; 2020. pp. 1-4, doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279912.*

Authors of the publication

Rodion A. Belsky - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4545-1086>. belskij_ra@spbstu.ru

Frolov Y. Vladimir - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375>. frolov_vya@spbstu.ru

Zhiligotov I. Ruslan - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0244-8998>. zhiligotov_ri@spbstu.ru

Safonov P. Evgenii - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588>. safonov_ep@spbstu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Получено **19.10.2023 г.**

Отредактировано **09.11.2023 г.**

Принято **27.11.2023 г.**