

## Снижение влияния апериодической составляющей тока элегазового выключателя ВЛ 220-500 кВ на процесс коммутации в послеаварийных режимах

*Е.А. Стороженко, В.А. Осипов*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Статья посвящена анализу аварийных ситуаций, связанных с повреждением элегазовых выключателей на линиях сверхвысокого напряжения. Приведены результаты математического моделирования апериодического колебательного процесса, произведенного в системе Simulink, возникающего при включении под номинальное напряжение высоковольтной линии электропередачи, содержащей шунтирующие реакторы. Рассмотрены варианты применения выключателя с набором предварительно включаемых резисторов с целью минимизация деструктивного влияния импульса перенапряжения, вызванного апериодическим колебательным процессом, возникающим в момент включения линии по номинальное рабочее напряжение. Приведены результаты моделирования процесса коммутации при применении высоковольтных выключателей с набором предварительно включаемых резисторов. Моделирование произведено по параметрам действующей линии электропередачи номинальным напряжением 500кВ на участке ПС «Елецкая» - АЭС «Донская».

**Ключевые слова:** шунтирующий реактор, апериодический процесс, высоковольтные линии электропередачи.

В последние несколько лет в электрических сетях ОАО «ФСК ЕЭС» в процессе отключения произошел ряд аварийных повреждений элегазовых выключателей автокомпрессионного типа на подстанциях напряжением 500 - 750 кВ. Указанные аварийные повреждения происходили в достаточно разных условиях осуществления коммутаций. К характерным авариям такого типа следует отнести аварии на ПС 1150 кВ «Алтайская», (27.02.2007), на ПС 750 кВ «Новобрянская» (13.07.2011г) и некоторые другие. Анализ произошедших аварий показал, что причиной аварийных разрушений выключателей является недопустимо длительное горение дуги, вызванное наличием в отключаемом токе значительной по величине апериодической составляющей. Этот факт препятствовал переходу отключаемого тока через нулевое значение, и как следствие препятствовал отключению выключателя. [1-4].

1. В объеме данной работы выполнен анализ электромагнитных процессов, протекающих в системе при коммутациях линии ПС Елецкая - Донская АЭС. Для реализации поставленной цели был использован программный продукт «MATLAB Simulink», а конкретно библиотека «SimPowerSystem» [5]. В качестве расчетных коммутаций на ВЛ, при которых могут возникать опасные значения апериодической составляющей тока в выключателе следует анализировать следующие режимы [6] (Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами. Утв. Распоряжением ОАО «ФСК ЕС» от 10.12.2012 № 838р):

а) планового включения незаряженной ЛЭП при отсутствии КЗ, в предположении возможного ложного срабатывания релейной защиты;

б) повторное включение в цикле неуспешного ТАПВ при устранившемся в паузе ТАПВ коротком замыкании, возникшем вновь при повторном включении ЛЭП или в предположении возможного ложного срабатывания релейной защиты;

в) повторное включение в цикле неуспешного ТАПВ при не устранившемся КЗ на ЛЭП;

г) плановое включение незаряженной ЛЭП при наличии на ней КЗ;

д) повторное включение в цикле успешного ОАПВ при устранившемся коротком замыкании на ЛЭП, в предположении возможного ложного срабатывания релейной защиты.

Расчётная схема электропередачи для анализа основных характеристик переходных процессов при коммутациях линейными выключателями приведена на рис. 1.



Рис. 1 – Расчётная схема электропередачи

Для проведения исследований в приведенной схеме необходимы следующие параметры электропередачи.

Параметры трёхфазной ВЛ:

- длина ВЛ – 226 км;
- конструктивные характеристики промежуточных опор ВЛ - 2МП 500
- длина изоляционной подвески проводов – 4854 мм
- стрела провеса проводов в пролете – 15 метров
- конструкция проводов ВЛ:

= количество проводов в фазе - 3

= марка фазных проводов - АСКТД 300/39

= сечение одного провода фазы – 300 мм<sup>2</sup>

= удельное активное сопротивление провода - 0,0845 Ом / км

- средние значения удельного сопротивления земли в районе прохождения трассы ВЛ - 100 Ом

- количество тросов на линии -2

- способ их подвески и заземления - Искровые промежутки

В результате расчетов по встроенным блокам расчета параметров ВЛ программного продукта «*MATLAB Simulink*» (расчетный модуль *Powergui Compute RLC Line Parameters Tool*) определяются погонные и волновые параметры линии:

- погонные продольные активные сопротивления ВЛ

= для прямых последовательностей фаз  $r_1 = 0,028827$  (Ом/км);

= для нулевых последовательностей фаз  $r_0 = 0,31585$  (Ом/км);

- погонные индуктивности ВЛ

= для прямых последовательностей фаз  $L_1 = 0,00097938$  (Гн/км);

= для нулевых последовательностей фаз  $L_0 = 0,0028873$  (Гн/км);

- погонные ёмкости ВЛ (Ф/км).

= для прямых последовательностей фаз  $C_1 = 11,933$  (нФ/км);

= для нулевых последовательностей фаз  $C_0 = 83,665$  (нФ/км);

Параметры ШР, установленных в конце линии относительно коммутируемого выключателя (Q1, рис. 1)

-  $L_p$  – индуктивность одного ШР - 4,874 (Гн);

-  $r_p$  – активное сопротивление одного ШР – 3,08 (Ом);

Реактор установлен непосредственно в линии, после коммутационных аппаратов ДАЭС.

Параметры ШР, установленных в начале линии относительно коммутируемого выключателя:

-  $L_p$  – индуктивность одного ШР - 4,874 (Гн);

-  $r_p$  – активное сопротивление одного ШР – 3,08 (Ом);

Реактор установлен на ПС «Елецкая», поэтому коммутация линии «Донская АЭС» - «Елецкая» происходит после точки установки шунтирующего реактора.

Индуктивные параметры питающей системы, со стороны ПС «Елецкая», рассчитываются по значениям токов КЗ на шинах ПС «Елецкая» и токов подпитки КЗ со стороны линии «ДАЭС» - «ПС Елецкая»

Для определения индуктивных параметров систем необходимо иметь результаты предварительных расчетов суммарных токов однофазного и трехфазного короткого замыкания на шинах системы 1 (или системы 2) и токов КЗ, подтекающих к месту КЗ со стороны линии.

Индуктивности системы 1 для прямой и нулевой последовательностей фаз при известных токах КЗ определяются по выражениям [7]:

$$L_{S1} = \frac{E}{\omega \cdot I_{K3}^3}; \quad L_{S0} = \frac{3 \cdot E}{\omega \cdot I_{K3}^1} - 2L_{S1}$$

$$r_{S1} = \frac{\omega \cdot L_{S1}}{Q_S}; \quad r_{S0} = \frac{\omega \cdot L_{S0}}{Q_S}$$

$$I_{K3}^3 = I_{K3S}^3 - I_{K3 ВЛ}^3$$

$$I_{K3}^1 = I_{K3S}^1 - I_{K3 ВЛ}^1$$

$Q$  - добротность системы, примерно равная добротности трансформатора,

установленного на ПС ( $Q = 50$ ).

Данные по токам короткого замыкания ПС «Елецкая»

$$I_{K3S}^3 = 16409 (A); \quad I_{K3 ВЛ}^3 = 4492 (A); \quad I_{K3S}^1 = 14189 (A); \quad I_{K3 ВЛ}^1 = 1235 (A).$$

Рассчитаем параметры примыкающих к линии ПС «Елецкая»:

- индуктивность системы 1 для прямой и нулевой последовательностей фаз

$$L_{s1} = 0,07715(\text{Гн}); \quad L_{s10} = 0,0586 (\text{Гн});$$

- активные сопротивления системы для прямой и нулевой последовательностей фаз

$$r_{s1} = 0,4845 (\text{Ом})$$

$$r_{s10} = 0,368 (\text{Ом});$$

Система была смоделирована схемой замещения, показанной на рис. 2

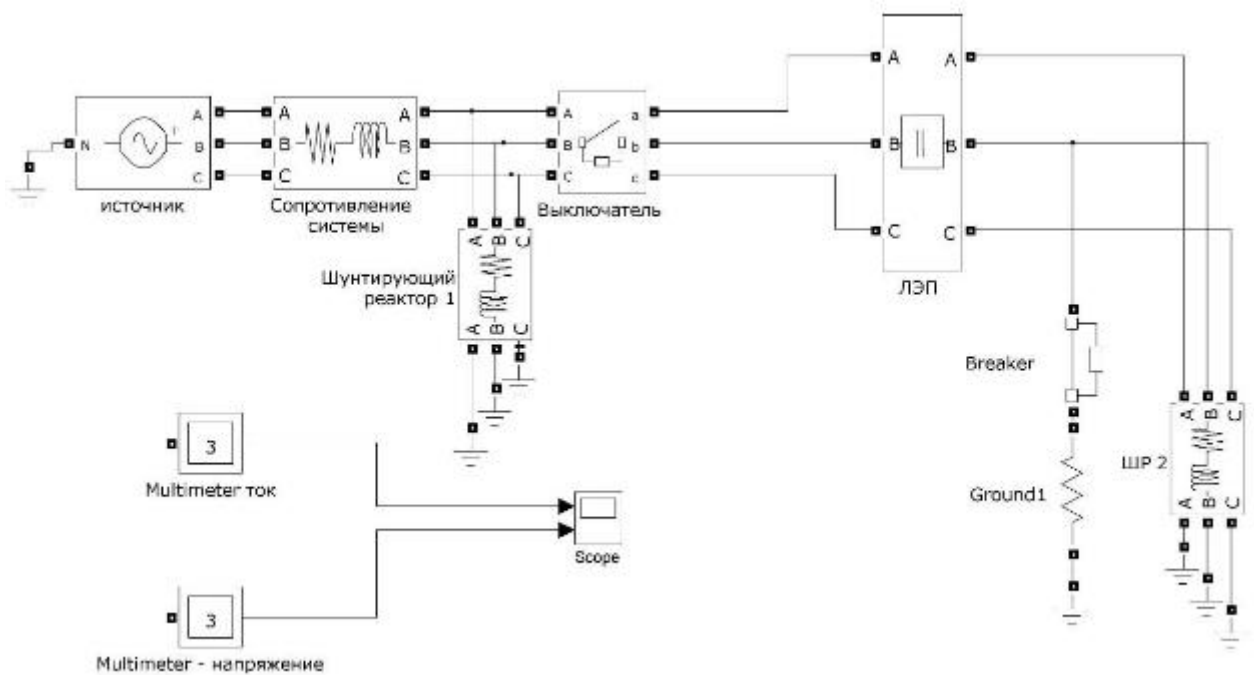


Рис. 2 – Макет исследуемой линии в пакете Simulink

Для исследования возможности возникновения аperiodической составляющей в токе выключателя в нормальном режиме, смоделированы токи во всех трех фазах [8,9] при включении линии, предполагая, что линия работает в нормальном режиме и ложное срабатывание релейной защиты исключено. Результаты анализа приведены на рис. 3.

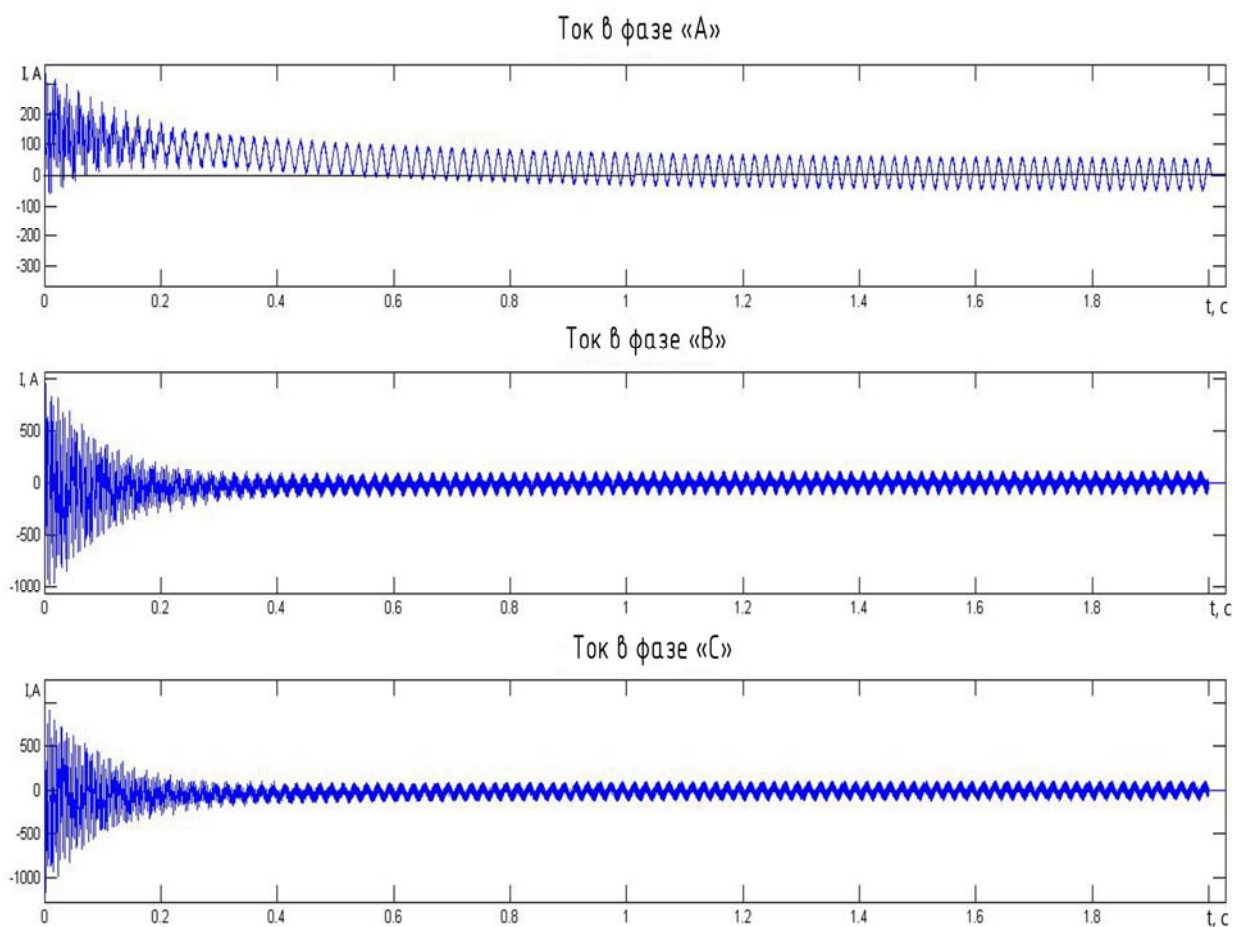


Рис. 3 – Диаграммы токов во всех трех фазах выключателя

Очевидно, что в фазе «А» присутствует аperiodическая составляющая с постоянной времени, значительно превышающей период принужденных колебаний. Отключении линии, например, на сотой миллисекунде, приведет к опасности, вызванной невозможностью разорвать дугу из-за наличия аperiodической составляющей в токе выключателя. Подобная ситуация может привести к повреждению выключателя и возможному выходу линии электроснабжения сверх высокого напряжения из строя, что крайне негативно сказывается на надежности электроснабжения крупных объектов [10].

Для исключения негативного воздействия аperiodической составляющей рассмотрим вариант использования предвключаемых

сопротивлений. Такое решение применяется для снижения скачка амплитуды напряжения при коммутации. Предвключаемые резисторы используются исключительно при включении и состоят из нескольких блоков сопротивлений, включенных параллельно дугогасительной камере. Блоки резисторов замыкают цепь за 8-12 мс до замыкания дугогасительных контактов. В результате значительная часть энергии переходного процесса рассеивается на высокоомном предвключаемом резисторе, не вызывая возникновения значительных апериодических токов. Один из примеров выключателя с предвключаемыми резисторами показан на рис. 4.

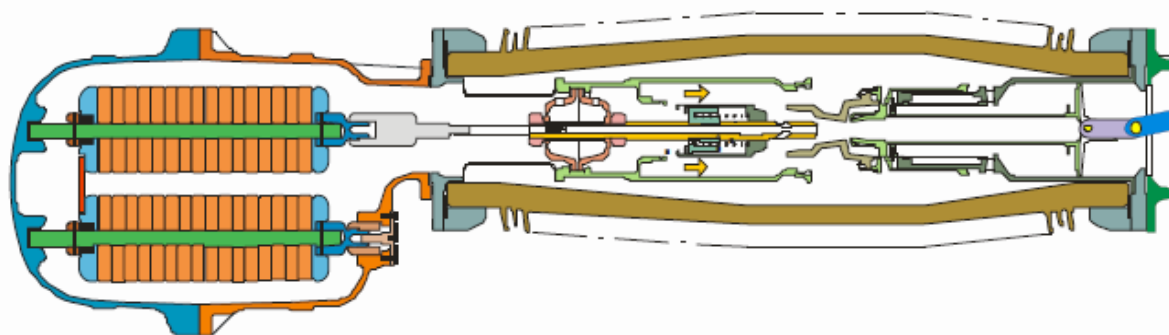


Рис. 4 – Выключатель с предвключаемыми резисторами

Промоделируем электромагнитный процесс включения исследуемой линии при наличии в ней предвключаемых сопротивлений. При этом будем использовать характеристики предвключаемых резисторов номинальным значением 400 Ом, и временем нахождения сопротивления в цепи 0,01 с, что соответствует половине периода колебания. Результат моделирования приведен на рис. 5.



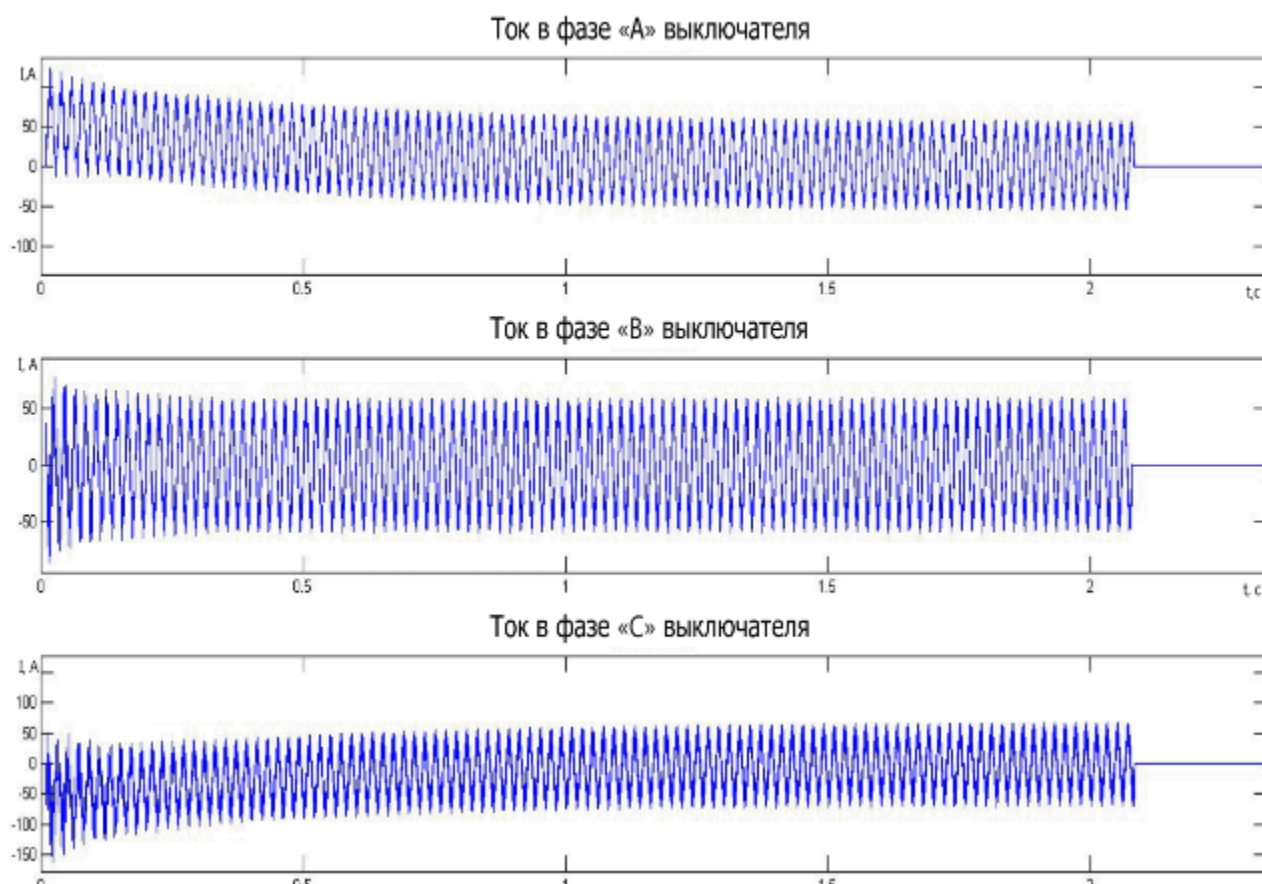


Рис. 5 - Диаграммы токов во всех трех фазах выключателя

Сравнивая результаты моделирования с диаграммами на рисунке 3 можно сделать вывод о значительном снижении амплитуды апериодической составляющей тока выключателя, при постановке линии под напряжение.

Описанный в статье способ решает задачу постановки линии под напряжения, избегая опасности повреждения элегазовых выключателей автокомпрессионного типа апериодической составляющей тока линии. Использование предвключаемых резисторов позволяет снизить амплитуду и длительность апериодической составляющей в суммарном токе выключателя. Важно отметить, что решение использовать предвключаемые резисторы в каждом конкретном случае необходимо подкреплять результатами математического анализа.



## Литература

1. Воронин А.В. Системные проблемы проектирования сетей СВН и энергоснабжения районов мегаполисов // Энергия единой сети. 2013-2014. №6/11. С. 6-13.
  2. Воронин В.А. Проблемы проектирования энергоснабжения районов мегаполисов // Электрические станции. 2014. №2. С. 43-50.
  3. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гольдштейн С., Иваницкий Ю. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели // Новости электротехники. 2008. №3. С. 2-6.
  4. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гринёв Н. Элегазовые выключатели 110-750 кВ. Особенности работы при отключении ненагруженных ВЛ с шунтирующими реакторами // Новости электротехники. 2012 №4 С. 2-6
  5. Кралин А.А. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink / А.А. Кралин, Б.Ю. Алтунин // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362)
  6. Левинштейн М.Л. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
  7. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети: учебное пособие / Изд. 3-е, испр. и доп. // СПб: Синтез Бук, 2011. С.286
  8. Gajić, Z., B. Hillström and F. Mekić, 2003. HV shunt reactor secrets for protection engineers. 30th Western Protective Relaying Conference Spokane, p.29
  9. IEEE STANDARD “Guide for the Application of Shunt Reactor Switching” of 09.12.2009 Volume C37.015.
  10. Папков Б.В. Основа безопасности государства – электроэнергетика / Б.В. Папков // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023)
-



## References

1. Voronin A.V. Energiya edinoi seti. 2014. №6/11. p 6-13.
2. Voronin V.A. Elektricheskie stantsii. 2014. №2. p. 43-50.
3. Evdokunin G., Dmitriev M., Gol'dshteyn S., Ivanitskiy Yu. Novosti elektrotekhniki. 2008. №3. p. 2-6.
4. Evdokunin G., Dmitriev M., Grinyov N. Novosti elektrotekhniki. 2012, №4. p. 2-6.
5. A.A. Kralin, B.Yu. Altunin Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362).
6. Levinshteyn M.L. 5. Protssy pri odnofaznom avtomaticheskome povtornom vklyuchenii liniy vysokikh napryazheniy. Moscow 1991. 256 p.
7. Evdokunin G.A. Elektricheskie sistemy i seti: uchebnoe posobie [Electrical systems and networks: tutorial]. Saint-Petersburg 2011. p.286
8. Gajić, Z., B. Hillström and F. Mekić, 2003. HV shunt reactor secrets for protection engineers. 30th Western Protective Relaying Conference Spokane.
9. IEEE STANDARD “Guide for the Application of Shunt Reactor Switching” of 09.12.2009 Volume C37.015.
10. Papkov B.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2023)