

УДК 621.3.064

Д.С. Сельменева, Е.Г. Лиске, Д.Е. ШевцовНовосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ ВКЛЮЧЕНИИ
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Предложен метод управляемой коммутации для сетей 6–10 кВ в связи с неэффективностью и неэкономичностью традиционных способов снижения бросков тока в силовом трансформаторе. Подключение к питающей сети силового трансформатора может сопровождаться возникновением переходного процесса, при котором образуются броски токов, превышающие по величине в несколько раз номинальные токи трансформатора и в несколько сотен раз токи его холостого хода. Описаны причины возникновения переходных процессов, а также влияние бросков тока на оборудование и используемые способы их снижения. Приведен принцип управляемого включения и рассмотрены преимущества и особенности управляемой коммутации. Рассмотренный метод управляемой коммутации позволяет значительно уменьшить амплитуду бросков тока при включении силового трансформатора за счет последовательной пофазной коммутации фаз выключателя по заданному алгоритму при переходе синусоиды тока через ноль. На базе модели электрической сети 6(10) кВ системы электроснабжения подобран алгоритм управляемого включения трансформатора, при котором броски тока не превышают номинального тока трансформатора. Модель разработана в программном комплексе MatLab/Simulink, который включает в себя трехфазный источник питания, две кабельные линии, вакуумный выключатель и реактивную нагрузку в виде силового трансформатора, носящую индуктивный характер. Данный алгоритм подобран для сетей низкого класса напряжения. Для таких сетей распространено использование режима с изолированной нейтралью, соответственно подобранный алгоритм имеет свои особенности. Рассмотрено влияние различных факторов на величину бросков тока, таких как напряжение сети, мощность нагрузки, длина и сечение кабельной линии, количество предпробоев в выключателе, а также наиболее важный фактор – остаточный магнитный поток.

Ключевые слова: управляемая коммутация, силовой трансформатор, бросок тока, остаточный магнитный поток.

D.S. Selmeneva, E.G. Liske, D.E. Shevtsov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

RESEARCH OF TRANSITION PROCESS AT THE CONTROLLED INCLUSION OF POWER TRANSFORMER

In this paper, a method of controlled switching for 6-10 kV networks was proposed, in connection with the inefficiency and diseconomy of the traditional ways to reduce inrush current in a power transformer. The connection to the mains of the power transformer can be accompanied by the appearance of a transient process, in which there are inrush currents exceeding in magnitude several times the rated currents of the transformer and several hundred times its idle current. The reasons for the appearance of transient processes are described, as well as the influence of inrush currents on equipment and the methods used to reduce them. The principle of controlled switching is presented and advantages and features of controlled switching are considered. The considered method of controlled commutation makes it possible to significantly reduce the amplitude of current surges when the power transformer is switched on by sequential phase-by-phase switching of the switch phases according to a given algorithm when the current sinusoid passes through zero. On the basis of the electric network model 6 (10) kV power supply system, the algorithm of controlled switching on of the transformer is chosen, in which the current surges do not exceed the rated current of the transformer. The model is developed in the MatLab / Simulink software package, which includes a three-phase power supply, two cable lines, a vacuum switch and a reactive load in the form of a power transformer, as inductive load. This algorithm is suitable for low voltage networks. For such networks, the use of a mode with isolated neutral is common, the appropriately chosen algorithm has its own peculiarities. The influence of various factors on the magnitude of current surges, such as network voltage, load power, the length and cross-section of the cable line, the number of pre-breakdowns in the circuit breaker, and the most important factor is the residual magnetic flux.

Keywords: controlled switching; power transformer ; inrush current; residual magnetic flux.

Введение. Подключение к питающей сети силового трансформатора может сопровождаться возникновением переходного процесса, при котором возникают броски токов намагничивания (БТН), превышающие по величине в несколько раз номинальные токи трансформатора и в несколько сотен раз токи его холостого хода. БТН вызывают значительные электродинамические усилия на токоведущих элементах и обмотках трансформаторов, что приводит к уменьшению ресурса силовых трансформаторов. Также переходной ток способен вызвать перенапряжения, ведущие к старению изоляции, и ложное срабатывание релейной защиты [1]. На рис. 1 представлена зависимость тока намагничивания от времени.

Причиной возникновения бросков токов намагничивания является несоответствие остаточного магнитного потока в магнитопроводе трансформатора и вынужденного магнитного потока в момент включения. При наличии разности между этими двумя потоками на вынуж-

денный синусоидальный магнитный поток накладывается аperiodическая составляющая, причем суммарный магнитный поток может в два раза превышать номинальное значение магнитного потока. Большое значение суммарного магнитного потока приводит к насыщению магнитопровода, падению индуктивного сопротивления трансформатора и последующему росту тока первичной обмотки, называемому броском тока намагничивания.

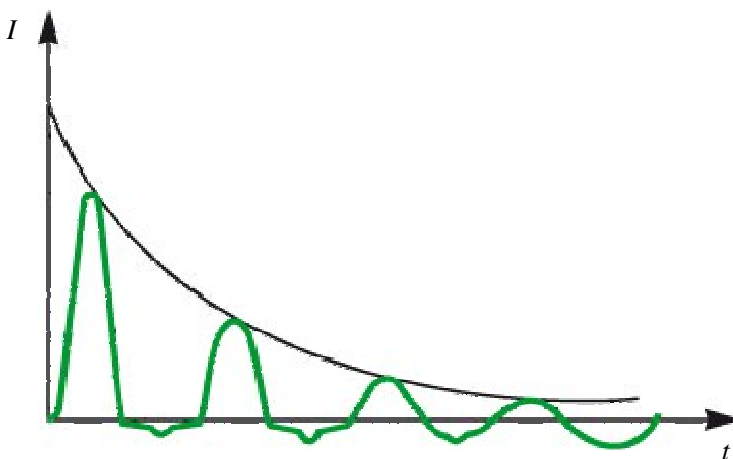


Рис. 1. Ток намагничивания трансформатора при включении

Исследование переходных процессов при включении трансформатора в электрических сетях 6–10 кВ является актуальным, что также подтверждается важностью и повсеместным распространением рассматриваемой нагрузки.

Существуют несколько путей снижения бросков тока намагничивания, которые применяются в настоящее время:

- использование постоянных включенных резисторов или реакторов;
- использование предвключаемых резисторов или реакторов;
- уменьшение рабочей магнитной индукции трансформатора;
- использование специальных устройств и алгоритмов включения трансформаторов.

Данные способы по каким-либо причинам являются неэффективными или экономически невыгодными. Наиболее эффективным способом снижения БТН является применение специальных коммутирующих устройств и алгоритмов включения трансформаторов. В настоящее

время в мире проведены исследования и выполнен ряд разработок, основная часть из которых выполнена для трансформаторов высших классов напряжений. Ссылаясь на это, есть необходимость применения данных разработок к низким классам напряжений 6–10 кВ [2, 3, 4]. Известен способ управляемой коммутации.

1. Особенности управляемой коммутации. Концепция управляемой коммутации заключается в последовательной коммутации полюсов выключателя по заданному алгоритму. Такая коммутация позволяет предотвратить появление опасных бросков тока, высокочастотных перенапряжений и увеличивать коммутационный ресурс оборудования.

На примере емкостной нагрузки управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода напряжения источника через ноль:

$$T_{\text{cont}} = T_{\text{zero}} - T_m - (T_{\text{closing}} - T_{\text{prestriking}}) = T_{\text{zero}} - T_m - T_{\text{making}}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлен принцип управляемого включения индуктивной нагрузки. Оптимальным временем включения является пик напряжения при условии, что время предпробоев при включении меньше полупериода. Контроллер задерживает команду на включение на некоторое время T_{total} , которое является суммой времени реакции контроллера T_w и преднамеренной задержки времени синхронизации T_{cont} .

Контроллер вводит задержку T_{cont} относительно соответствующего перехода напряжения источника через ноль, которая рассчитывается по (1) с учетом времени включения выключателя T_{closing} и времени предпробоев $T_{\text{prestriking}}$. Ток начинает течь в момент времени t_{make} . Интервал T_m определяется временем t_{make} и следующим за ним временем перехода напряжения источника через ноль.

Время включения T_{closing} есть интервал времени от момента подачи питания на катушку включения выключателя до момента механического касания контактов. Время предпробоев при включении $T_{\text{prestriking}}$ – это интервал времени между моментом начала предпробоев и моментом механического касания контактов. Время T_{making} является промежутком времени от момента подачи питания на катушку включения до момента начала предпробоев t_{make} [5]. На рис. 2 представлен принцип управляемого включения.

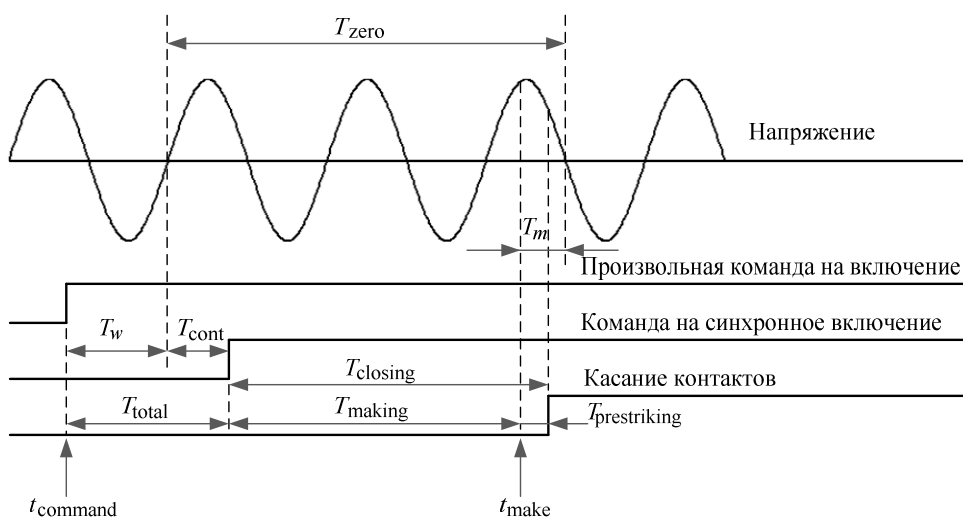


Рис. 2. Принцип управляемого включения

Концепция управляемой коммутации представляет собой последовательную пофазную коммутацию по заданному алгоритму при переходе синусоиды тока (напряжения) через ноль. Такая коммутация позволяет предотвращать появление опасных бросков тока и перенапряжений, увеличивать коммутационный ресурс оборудования [6, 7, 8].

Использование управляемой коммутации в нормальном режиме эффективно как при включении, так и при отключении цепи. В рабочих режимах управляемое включение выключателя на реактивную нагрузку позволяет существенно уменьшить броски тока, а при управляемом отключении снизить вероятность повторных пробоев и, как следствие, возникновения перенапряжений [9, 10].

3. Поиск алгоритма управляемого включения силового трансформатора. Общий вид разработанной модели изображен на рис. 3.

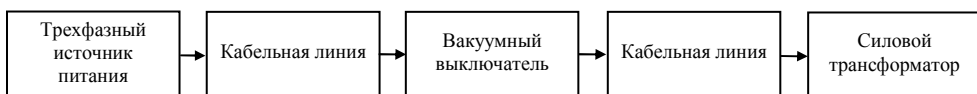


Рис. 3. Блок-схема разработанной модели

Имитационная модель служит для моделирования процесса включения силового трансформатора и даёт возможность снятия осциллограмм токов и напряжений системы и нагрузки. Данная модель разработана в программном комплексе MatLab/Simulink.

Моделирование производилось при следующих заданных параметрах: напряжение сети 6 кВ, мощность трансформатора 1000 кВА, длина кабельной линии между выключателем и нагрузкой 200 м, сечение кабельной линии 95 мм² [11, 12, 13].

С использованием представленной имитационной модели был выполнен ряд опытов по подбору наилучшего алгоритма управляемой коммутации силового трансформатора. Также проведено исследование переходных процессов при неуправляемой коммутации трансформатора, результаты которого представлены на рис. 4.

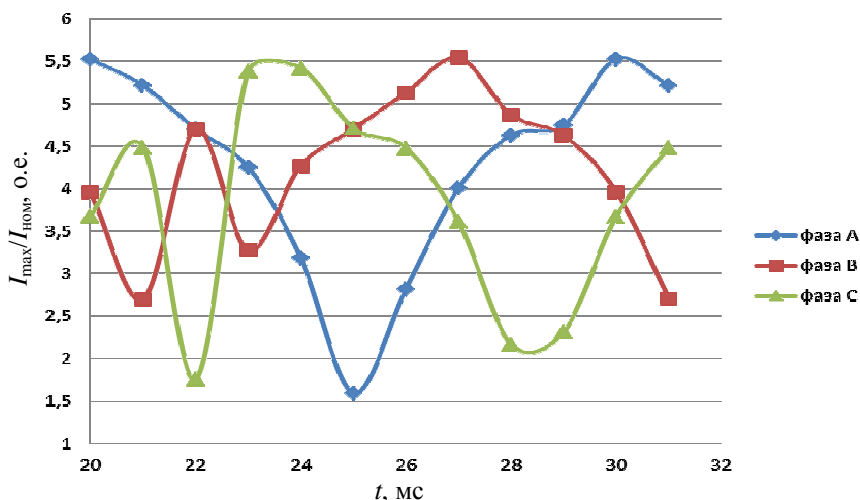


Рис. 4. Изменение величины тока при неуправляемой коммутации

Показаны максимальные значения бросков тока при включении силового трансформатора без остаточного потока в зависимости от момента коммутации. Данный опыт подтверждает целесообразность использования метода управляемой коммутации. Максимальный ток достигает значения в $5,54 \cdot I_{\text{ном.}}$

Далее представлен выбор алгоритма управляемой коммутации. Изначально, используя редактор параметра выключателя, задавалось время замыкания одной фазы, исходя из того, что сеть трехфазная с изолированной нейтралью, при включении одной фазы нет пути для протекания тока. Следовательно, сделан вывод о том, что нужно коммутировать, как минимум, две фазы. Путем варьирования времени включения фаз СВ от 20 до 31 мс получен следующий график, представленный на рис. 5.

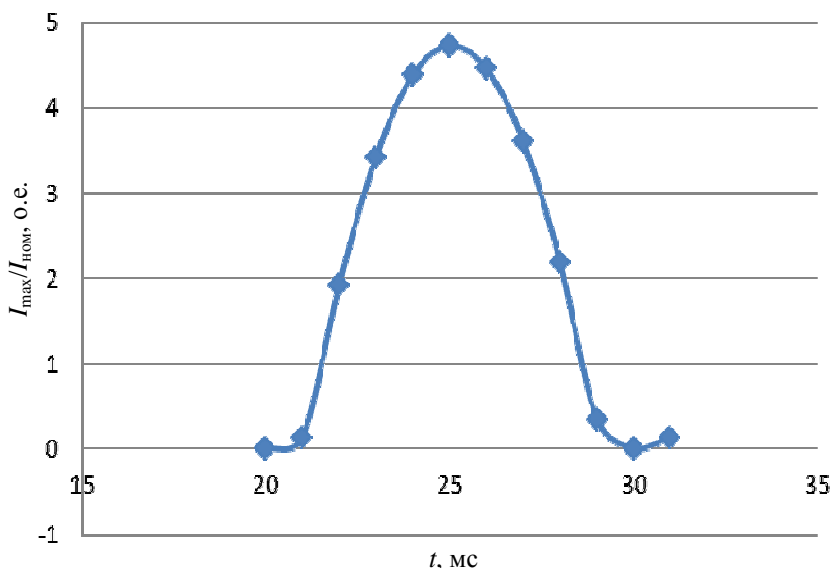


Рис. 5. Изменение величины тока от времени коммутации для фазы В

График изменения представлен для фазы В, так как картина изменения для фазы С аналогична. Исходя из данного опыта, был сделан вывод, что наилучшее время включения для фаз СВ составляет 20 мс, так как величина тока при этом включении минимальна: $I_{\max}/I_{\text{ном}} = 0,012$ о.е.

Далее, фиксируем СВ на 20 мс и включаем фазу А, подбирая для нее наилучшее время. Полученные результаты представлены на рис. 6.

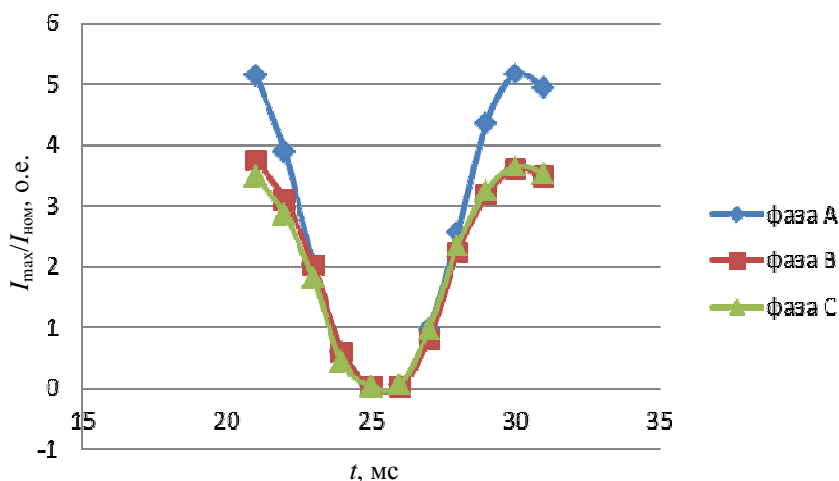


Рис. 6. Изменение величины тока от времени коммутации для алгоритма СВ-А

Выводы. Исследование процессов включения трансформатора с соединением первичной обмотки в треугольник позволяет утверждать о целесообразности применения алгоритма СВ–А как способа существенного снижения бросков тока намагничивания. Опыты показали, что наилучшее время включения: $T_B = T_C = 20$ мс, $T_A = 25$ мс, значение тока при данном времени составляет 0,039 о.е. Осциллограммы включения трансформатора по оптимальному алгоритму коммутации представлены на рис. 7.

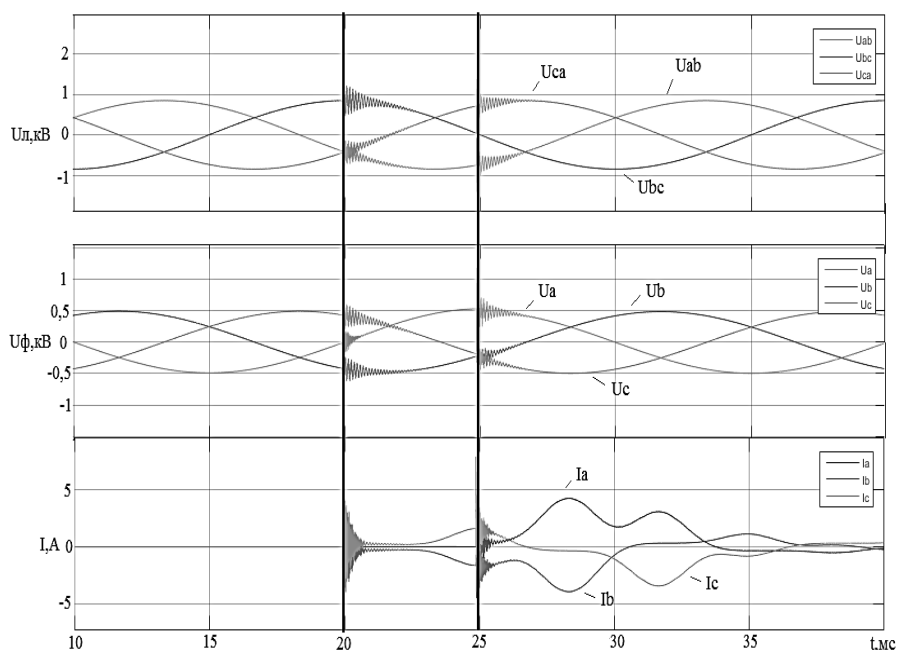


Рис. 7. Управляемое включение трансформатора 1000 кВА; $U_{л}$, $U_{ф}$ – линейное и фазное напряжение в электрической сети до выключателя; I – ток трансформатора

Из осциллограмм видно, что включение фаз СВ соответствует максимальному линейному напряжению между этими фазами ($T_C = T_B = 20$ мс), а включение фазы А соответствует максимальному напряжению включаемой фазы ($T_A = 25$ мс).

4. Факторы, влияющие на величину броска тока. Рассмотрим влияние различных факторов на величину БТН.

Напряжение сети. Поскольку исходное напряжение 6 кВ, изменение варьировалось с 5 до 7 кВ. После снятия показаний бросков тока при разном напряжении сети, представим эти изменения в виде графика (рис. 8).

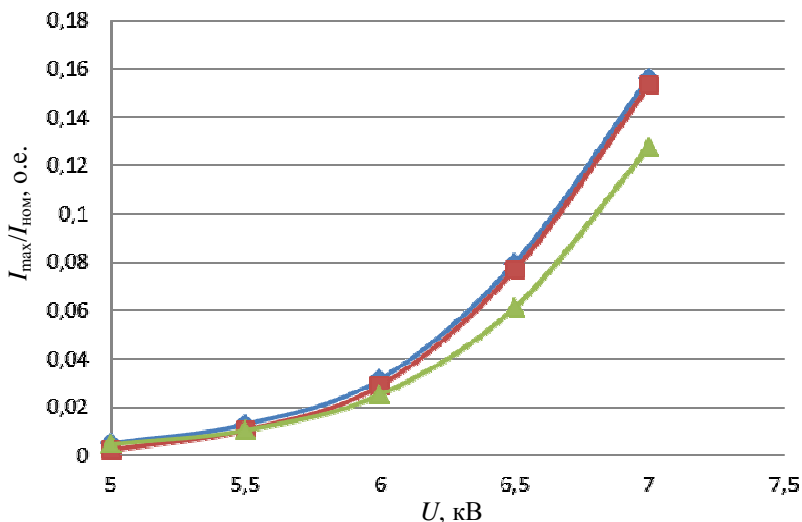


Рис. 8. Бросок тока при изменении напряжения

Исходя из данного опыта, можно сделать вывод, что при увеличении напряжения сети величина броска тока тоже увеличивается. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения увеличивается магнитный поток, который пропорционален напряжению, и, следовательно, ток также увеличивается.

Длина линии. Длина линии меняется от 200 до 3000 м. Полученные результаты представлены на рис. 9.

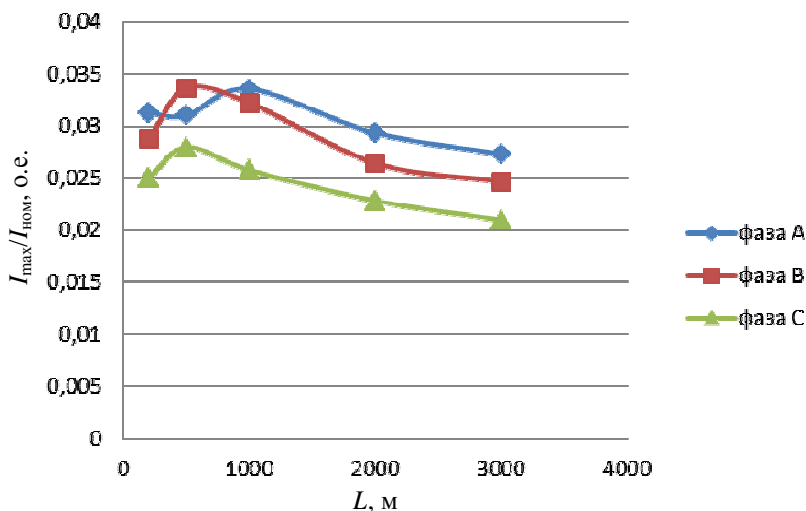


Рис. 9. Бросок тока при изменении длины линии

На графике видно, что в конечном итоге при кардинальном изменении длины до 3000 м величина БТН уменьшается, что объясняется увеличением сопротивления линии.

Сечение линии. Параметры сечения линии меняем при значениях – от 25 до 240 мм². Полученные результаты представлены на рис. 10.

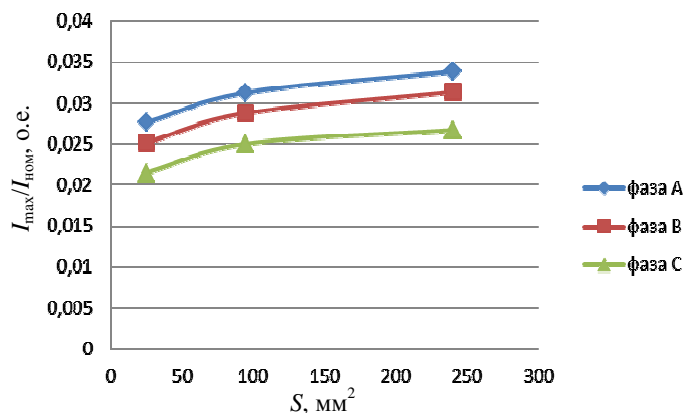


Рис. 10. Бросок тока при изменении сечения

Можно сделать вывод, что при увеличении сечения линии величина тока увеличивается за счет того, что чем больше сечение, тем меньше сопротивление и тем больше величина БТН.

Электрическая прочность (количество предпробоев). Полученные результаты представлены на рис. 11.

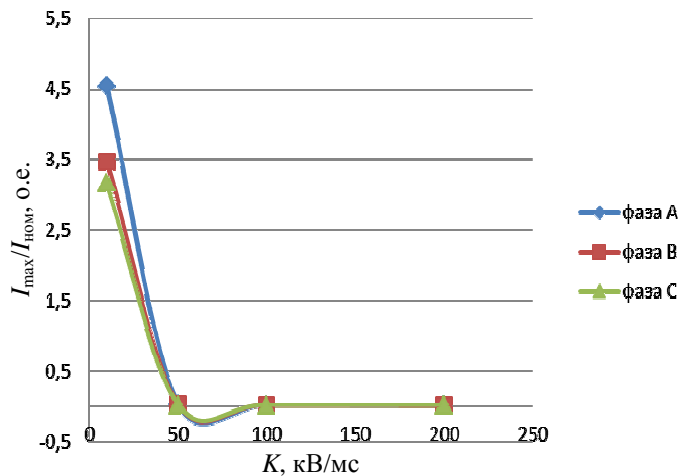


Рис. 11. Бросок тока при изменении скорости снижения электрической прочности

С увеличением количества предпробоев бросок тока уменьшается. Объяснение этому явлению в рассеивании энергии и ее передаче в сеть (размагничивание магнитопровода) при предпробоях.

Изменение мощности трансформатора. Полученные результаты представлены на рис. 12.

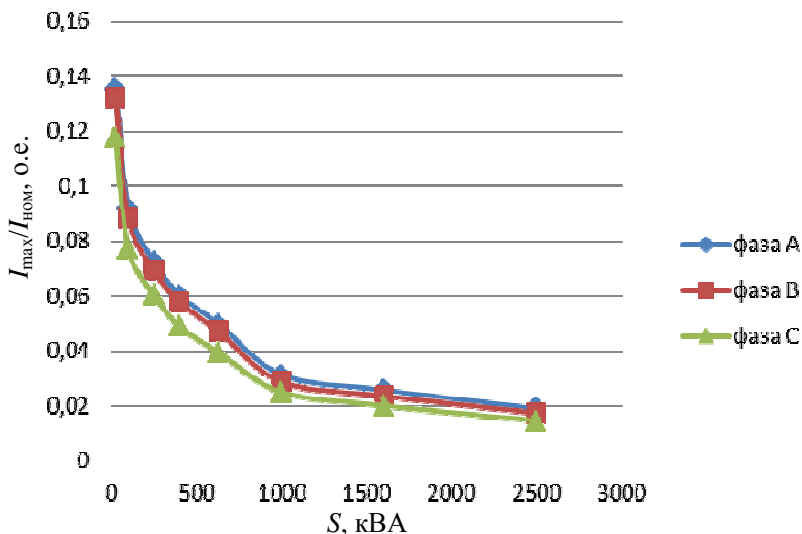


Рис. 12. Бросок тока при изменении мощности трансформатора

При увеличении мощности трансформатора БТН уменьшается.

Представленные факторы оказывают не столь значительное уменьшение бросков тока и не всегда могут быть применимы с точки зрения экономических соображений. Основным фактором, оказывающим влияние на амплитуду бросков тока при включении трансформатора, является остаточный магнитный поток в сердечнике трансформатора [14, 15]. Это явление объясняется неравенством установившегося потока в момент коммутации и остаточного потока в трансформаторе. При наибольшем различии этих потоков результирующий магнитный поток может в два раза и более превышать номинальный магнитный поток, что приводит к насыщению стали трансформатора, снижению его индуктивного сопротивления и, как результат, возникновению максимальных бросков тока намагничивания. В силу важности данного явления были проведены опыты с наличием остаточного потока с помощью редактора параметров трансформатора. Результаты представлены на рис. 13.

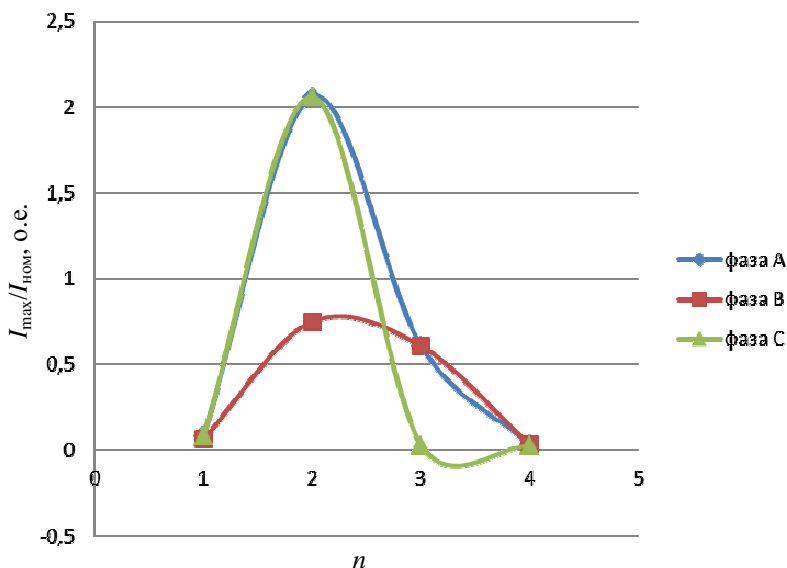


Рис. 13. Величина броска токов при изменении остаточного магнитного потока в фазе А

Цифры от 1 до 4 соответствуют заданному остаточному потоку 1 – $(-0,5; 0,5; 0)$; 2 – $(0,5; 0,5; 0)$; 3 – $(0; 0,5; 0)$; 4 – наилучший вариант управляемой коммутации без наличия остаточного потока.

При изменении остаточного потока лишь для фазы А можно сделать вывод, что уровни бросков тока возрастают при увеличении остаточного магнитного потока трансформатора. Наличие остаточной намагниченности трансформатора при известных ее значениях предъявляет к выключателю более высокие требования по точности срабатывания полюсов. При этом коммутация должна проводиться в следующей последовательности: в первую очередь включается обмотка с наименьшим по модулю остаточным потоком сцеплением путем одновременного замыкания двух полюсов выключателя в момент совпадения остаточного и установившегося потоков сцеплений первой включаемой обмотки. Далее замыкается третий полюс выключателя в момент наименьшего расхождения между соответствующими потоками сцепления оставшихся обмоток трансформатора. Для опыта с остаточной намагниченностью, ссылаясь на осциллограммы магнитных потоков, был также подобран алгоритм управляемой коммутации.

Выводы. Применение традиционных способов снижения бросков тока в большинстве случаев оказывается неэффективным или эконо-

мически невыгодным. Приведен принцип управляемого включения и рассмотрены преимущества и особенности управляемой коммутации.

Разработан и подробно описан поиск алгоритма включения силового трансформатора. По полученным зависимостям можно отметить эффективность использования управляемой коммутации.

Рассмотрено влияние различных факторов на величину бросков тока. Основным фактором, оказывающим влияние на амплитуду бросков тока при включении трансформатора, является остаточный магнитный поток в сердечнике трансформатора, который требует изменения алгоритма.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития НГТУ, проект С-18.

Библиографический список

1. Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 3–9.

2. Лебедев И.А. Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 142 с.

3. NER Надёжные энергетические решения. Демпфирующие резисторы. – URL: <http://ner.spb.ru/dempfer-resistor>

4. Устройство подавления апериодической составляющей в токе линейного выключателя: пат. Рос. Федерация № 117707 [Электронный ресурс] / В.Е. Качесов. – БИ, 2012, № 18. – URL: <http://poleznaya-model.ru/model/11/117707.html> (дата обращения: 03.03.2017).

5. Павлюченко Д.А., Шевцов Д.Е. Особенности управляемой коммутации при нормальных и аварийных режимах в электрических сетях среднего напряжения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 41–44.

6. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой / А.М. Рывкин, И.А. Лукацкая, А.Л. Буйнов [и др.] // Электрические станции. – 1990. – № 5. – С. 62–67.

7. Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений / А.А. Ачитаев, Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 3. – С. 50–56.

8. Иванов А.В., Дегтярёв И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 1.

9. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ. – СПб.: Терция. – 2004. – 188 с.

10. Защита электрооборудования собственных нужд электростанций от перенапряжений, вызываемых вакуумными выключателями / О.А. Аношин, А.И. Барсуков, Б.К. Максимов [и др.] // Электричество. – 1997. – № 9. – С. 9–15.

11. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

12. Шевцов Д.Е., Киселев А.С. Управляемая коммутация силовых трансформаторов среднего напряжения // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов, молодых ученых и спец.; Тюмень, 22 декабря 2016 г. – Тюмень: Изд-во ТИУ, 2016. – Т. 2. – С. 427–430.

13. Правила устройства электроустановок (утв. Мин-вом энергетики РФ 08.07.2002). – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011. – 552 с.

14. Horiszny J. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2012. – Vol. 39. – № 1–4. – P. 1013–1019.

15. Horiszny J. Implementation of power transformer controlled switching algorithm // International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2016. – Vol. 35. – Iss. 4. – P. 1418–1427.

References

1. Belkin G.S. Primenenie samoupravliaemykh apparatov (apparator, obladaishchikh «intellektom») dlia kommutatsii tsepei vysokogo napriazheniia [Use of self-governed devices (the devices having "intelligence") for switching of chains of high voltage]. Elektrotehnika, 2005, no. 12, pp. 3-9.

2. Lebedev I.A. Issledovanie protsessov kommutatsii vakuumnymi vykliuchateliami induktivnoi nagruzki i razrabotka tekhnicheskikh trebovaniy k sinkhronnym vakuumnym vykliuchateliam [Research of processes of switching by vacuum switches of inductive loading and development of technical requirements to synchronous vacuum switches]. Ph.D. thesis. Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012. 142 p.

3. NER Nadezhnye energeticheskie resheniia. Dempfiruiushchie rezistory [NER Reliable power decisions. The damping resistors], available at: <http://ner.spb.ru/dempfer-resistor> (accessed 03 March 2017).

4. Kachesov V.E. Ustroistvo podavleniia aperiodicheskoi sostavliaiushchei v toke lineinogo vykliuchatel'ia [The device of suppression of an aperiodic component in current of the linear switch]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 117707 (2012), available at: <http://poleznayamodel.ru/model/11/117707.html> (accessed 03 March 2017).

5. Pavliuchenko D.A., Shevtsov D.E. Osobennosti upravliaemoi kommutatsii pri normal'nykh i avariinykh rezhimakh v elektricheskikh setiakh srednego napriazheniia [Features of the operated switching at normal and emergency operation in electrical networks of average tension]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaiia promyshlennost'*, 2015, no. 5, pp. 41-44.

6. Ryvkin A.M., Lukatskaia I.A., Buinov A.L. [et al.] Perenapriazheniia pri otkliuchenii vakuumnym vykliuchatelem transformatora bez nagruzki i s induktivnoi nagruzkoii [Overstrain at shutdown by the vacuum switch of the transformer without loading and with inductive loading]. *Elektricheskie stantsii*, 1990, no. 5, p. 62-67.

7. Achitayev A.A., Pavliuchenko D.A., Prokhorenko E.V., Shevtsov D.E. Primenenie sinkhronnoi kommutatsii dlia ograniceniia kommutatsionnykh perenapriazhenii [Application of synchronous switching for restriction of switching retention]. *Glavnyi energetik*, 2014, no. 3, pp. 50-56.

8. Ivanov A.V., Degtiarev I.L. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie elektrofizicheskikh protsessov i kharakteristik vakuumnoi dugogasitel'noi kamery pri kommutatsii elektrodvigatelei [Theoretical and pilot study of electrophysical processes and characteristics of the vacuum dugogasitel'nyi chamber when switching electric motors]. *Neftegazovoe delo*, 2007, no. 1.

9. Evdokunin G.A., Titenkov S.S. Vnutrennie perenapriazheniia v setiakh 6–35 kV [Internal an overstrain in networks of 6-35 kV]. Saint Peterburg: Tertsiiia, 2004. 188 p.

10. Anoshin O.A., Barsukov A.I., Maksimov B.K. [et al.]. Zashchita elektrooborudovaniia sobstvennykh nuzhd elektrostantsii ot perenapriazhenii, vyzyvaemykh vakuumnymi vykliuchateliami [Protection of electric equipment of own needs of power plants against retension caused by vacuum switches]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 9, pp. 9-15.

11. Silovye transformatory. Spravochnaia kniga [Power transformers. Reference book]. Ed. S.D. Lizunova, A.K. Lokhanina. Moscow: Energoizdat, 2004. 616 p.

12. Shevtsov D.E., Kiselev A.S. Upravliaemaia kommutatsiia silovykh transformatorov srednego napriazheniia [The operated switching of power transformers of average tension]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov “Energoberezhnie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse”*. Tiumen', 22 dekabria 2016 goda. *Tiumenskii industrial'nyi universitet*, 2016, vol. 2, pp. 427-430.

13. Pravila ustroistva elektroustanovok (utverzhdno Ministerstvom energetiki RF 08.07.2002) [Regulations for electrical installation (it is approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation 08.07.2002)]. 7nd. ed. Moscow: Novatsionnyi tsentr “ENAS”, 2011. 552 p.

14. Horiszny J. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, vol. 39, no. 1-4, pp. 1013-1019.

15. Horiszny J. Implementation of power transformer controlled switching algorithm. *International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2016, vol. 35, iss. 4, pp. 1418-1427.

Сведения об авторах

Сельменова Диана Сергеевна (Новосибирск, Россия) – студентка Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: dianaselmeneva@mail.ru).

Лиске Елена Генриховна (Новосибирск, Россия) – студентка Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: foniku@gmail.com).

Шевцов Дмитрий Евгеньевич (Новосибирск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: dmitriy_shevtsov@mail.ru).

About the authors

Selmeneva Diana Sergeevna (Novosibirsk, Russian Federation) is a Student Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: dianaselmeneva@mail.ru).

Liske Elena Genrihovna (Novosibirsk, Russian Federation) is a Student Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: foniku@gmail.com).

Shevtsov Dmitry Evgenevich (Novosibirsk, Russian Federation) is a Senior Lecturer of Department of Power Supply Systems of Enterprises Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: dmitriy_shevtsov@mail.ru).

Получено 09.10.2017