

УДК 621.314

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-82-90

Полупроводниковое устройство регулирования напряжения под нагрузкой для силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 10-0,4 кВ

Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев, А.В. Горчаков

Рассмотрены особенности регулирования напряжения силовых трансформаторов на трансформаторных подстанциях распределительных электрических сетей. Представлен подход к реализации быстродействующего управления напряжением силовых серийно-выпускаемых трансформаторов класса 10/0,4 кВ под нагрузкой посредством полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора (ПУРНТ). Приведен пример схемотехники построения ПУРНТ на базе тиристорных ключей. Предложены алгоритмы управления напряжением силовых трансформаторов под нагрузкой посредством ПУРНТ, обеспечивающие высокие показатели быстродействия и надежности. Выполнены экспериментальные исследования функционирования ПУРНТ и работоспособности предложенных алгоритмов управления напряжением на базе имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink и физического моделирования с использованием макетного образца ПУРНТ. Описана структура и особенности использованной имитационной Matlab-модели. Даны параметры и показана конструкция макетного образца ПУРНТ. Представлены результаты имитационного и физического моделирования работы ПУРНТ совместно с силовым трансформатором при различных нагрузках и алгоритмах управления.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал обоснованность принятых технических решений. Установлено, что использование ПУРНТ позволяет обеспечить высокое быстродействие управления напряжением, высокий КПД устройства, надежность его работы и бездуговую коммутацию регулировочных ответвлений силового трансформатора без прерывания тока и напряжения нагрузки. Алгоритмы работы ПУРНТ позволяют пофазно регулировать напряжения в трехфазной распределительной сети 0,4 кВ. Отмечена возможность интеграции средств управления и диагностики ПУРНТ в состав современных цифровых подстанций на основе цифрового интерфейса стандарта МЭК 61850.

Ключевые слова: регулирование напряжения под нагрузкой, силовой трансформатор, цифровая подстанция, полупроводниковое устройство регулирования, тиристорный ключ.

Для цитирования: Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Горчаков А.В. Полупроводниковое устройство регулирования напряжения под нагрузкой для силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 10—0,4 кВ // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 82—90. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-82-90.

A Solid-State On-Load Tap Changer for the Power Transformers of 10—0.4 kV Distribution Networks

D.I. Panfilov, M.G. Astashev, A.V. Gorchakov

The specific features relating to voltage control of power transformers at distribution network transformer substations are considered. An approach to implementing high-speed on-load voltage control of serially produced 10/0.4 kV power transformers by using a solid-state on-load tap changer (SOLTC) is presented. An example of the SOLTC circuit solution on the basis of thyristor switches is given. On-load voltage control algorithms for power transformers equipped with SOLTC that ensure high reliability and high-speed operation are proposed. The SOLTC performance and the operability of the suggested voltage control algorithms were studied by simulation in the Matlab/Simulink environment and by experiments on the SOLTC physical model. The structure and peculiarities of the used simulation Matlab model are described. The SOLTC physical model design and its parameters are presented. The results obtained from the simulating the SOLTC operation on the Matlab model and from the experiments on the SOLTS physical model jointly with a power transformer under different loads and with using different control algorithms are given. An analysis of the experimental study results has shown the soundness

of the adopted technical solutions. It has been demonstrated that the use of an SOLTC ensures high-speed voltage control, high efficiency and reliability of its operation, and arcless switching of the power transformer regulating taps without load voltage and current interruption. By using the SOLTC operation algorithms it is possible to perform individual phase voltage regulation in a three-phase 0.4 kV distribution network. The possibility of integrating SOLTC control and diagnostic facilities into the structure of modern digital substations based on the digital interface according to the IEC 61850 standard is noted.

Key words: on-load tap changing, power transformer, digital substation, solid-state control device, thyristor switch.

For citation: Panfilov D.I., Astashev M.G., Gorchakov A.V. A Solid-State On-Load Tap Changer for the Power Transformers of 10—0.4 kV Distribution Networks. Bulletin of MPEI. 2020;6:82—90. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-82-90.

Введение

В настоящее время как в мире, так и в России остро стоит проблема обеспечения качества электрической энергии в распределительных электрических сетях [1]. Среди многих контролируемых показателей наиболее значимым для обеспечения надежного и эффективного функционирования электроприемников потребителей является установившееся отклонение напряжения, нормируемое на территории РФ ГОСТ 32144 [2].

Низкий уровень качества электрической энергии, в том числе превышение установленных отклонением напряжения допустимых ГОСТ 32144 величин, обусловлены рядом факторов, среди которых можно выделить определяемые характером потребления электрической энергии и идентифицируемые техническим состоянием электроэнергетической системы. К первым относят: массовое появление искажающих электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, увеличение объемов потребления, усиление неравномерности графиков нагрузки, явно выраженный разнородный характер электрических нагрузок потребителей, высокий уровень реактивной мощности, передаваемой по электрическим сетям и пр. В основу второй группы входят: отсутствие своевременных мер по модернизации и реконструкции электрических сетей [3] и, в частности, недостаток эффективных и надежных технических средств, ограничивающих быстрое регулирование напряжения в электрической сети. Концепцией ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030» [4] в перечень ключевых и основных подходов к формированию единой цифровой среды цифровой сети включено «автоматическое регулирование напряжения в соответствии с заданными субъектом оперативно-диспетчерского управления графиками».

Традиционный подход к регулированию напряжения в распределительной электрической сети [5, 6] предполагает исполнение суточного регулирования напряжения только в сетях 6-10 кВ посредством автоматических регуляторов напряжения (АРН) [7] и устройств регулирования под нагрузкой (РПН) [8, 9] силовых трансформаторов центров питания (ПС 110/6-10 кВ). При этом на трансформаторных подстанциях (ТП) 6-10/0,4 кВ происходят только сезонные (2 раза в год) переключения ответвлений обмоток высокого напряжения силовых трансформаторов, компенсирующие сезонные отклонения напряжения в сети 0,4 кВ, вы-

званные летними и зимними изменениями графиков потребления электроэнергии. Указанные переключения выполняются посредством устройств переключения без возбуждения (ПВВ) и предполагают при их реализации отключение трансформаторов 6-10/0,4 кВ от сети и нагрузки [10]. При этом механизмов непосредственного быстродействующего регулирования выходного напряжения сети 0,4 кВ в темпе процесса на ТП 6-10/0,4 кВ не предусмотрено. Однако необходимость такого регулирования есть. Она обусловлена свойственными современным электроэнергетическим системам значительными суточными колебаниями графиков нагрузки в распределительных электрических сетях и ее существенной неоднородностью [11]. Стоит отметить, что регулирование напряжения РПН центра питания — ПС 110 кВ меняет напряжение сразу всей сети 6-10 кВ, к которой подключено множество ТП 6-10/0,4 кВ с абсолютно разнородными нагрузками [12]. Подобное централизованное регулирование принципиально не может обеспечить наличие нормируемых уровней выходного напряжения в сети 0,4 кВ на каждой из ТП 6-10/0,4 кВ.

Следует подчеркнуть, что техническая возможность регулирования в темпе процесса выходного напряжения трансформаторов 6-10/0,4 кВ имеется. Она обусловлена наличием в серийно выпускаемых трансформаторах 6-10/0,4 кВ ответвлений обмотки высокого напряжения (ВН), позволяющих регулировать выходное напряжение на стороне 0,4 кВ в диапазоне $\pm 5\%$ с шагом $\pm 2,5\%$. Реализовать данную возможность можно посредством подключения к ответвлениям обмотки ВН технических средств, осуществляющих бездуговую быстродействующую коммутацию данных ответвлений [13].

Представлен подход к реализации управления напряжением трансформатора 10/0,4 кВ с помощью полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора (ПУРНТ), позволяющего корректировать напряжение на обмотке низкого напряжения (НН) трансформатора в темпе процесса. Полупроводниковое устройство, включенное на стороне высокого напряжения трансформатора, позволяет подключать ответвления обмотки высокого напряжения к сети 10 кВ [14], тем самым регулируя коэффициент трансформации трансформатора и, соответственно, выходное напряжение в сети 0,4 кВ. Применение ПУРНТ, построенного на полупроводниковых тиристорных

ключаях, обеспечивает быстрое действие управления напряжением, высокие КПД устройства и надежность его работы в целом. При этом надежная работа ПУРНТ обеспечена реализацией специальных алгоритмов управления полупроводниковыми тиристорными ключами [15, 16], адаптирующих процесс переключения тиристорных ключей к текущему режиму работы нагрузки силового трансформатора и требованиям изменения напряжения на его выходе. Разработанные и реализованные в системе управления регулятора алгоритмы адаптивного управления ПУРНТ позволяют корректировать выходное напряжение трансформатора под нагрузкой при любом ее характере (от активной, активно-реактивной до чисто реактивной).

Описан пример схемотехнической реализации полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой. Рассмотрены особенности адаптивных алгоритмов управления ПУРНТ и основные функции системы управления регулятором, непосредственно управляющей выходным напряжением трансформатора. Приведены результаты моделирования процессов управления ПУРНТ при различных нагрузках и требованиях к управлению выходным напряжением трансформатора. Даны осциллограммы процессов, протекающих в устройстве, полученные на экспериментальном образце при управлении напряжением трансформатора в различных условиях.

Полупроводниковое устройство регулирования напряжения трансформатора

На рисунке 1 изображена схема построения и подключения фазы ПУРНТ к фазе силового трансформатора. Полупроводниковый тиристорный коммутатор, входящий в состав ПУРНТ, состоит из пяти управляемых ключей VS1 — VS5. В качестве каждого ключа VS используется встречно-параллельное включение двух однооперационных тиристоров. Тиристорные ключи подключены к ответвлениям обмотки ВН трансформатора и выполняют коммутацию ответвлений к сети 10 кВ. Нагрузка трансформатора, представляющая собой сеть 0,4 кВ, подключена к обмоткам низкого напряжения. Построение полупроводникового коммутатора на основе тиристорных ключей, с одной стороны, позволяет достичь быстрого действия регулирования напряжения на уровне 10...20 мс, а, с другой, за счет высокой перегрузочной способности тиристоров и отсутствия ограничения на количество переключений, определяет высокие показатели надежности устройства.

В установившемся режиме работы высоковольтная обмотка ВН подключена в фазе питающей сети через один из включенных ключей VS1 — VS5. Все остальные ключи в фазе должны быть выключены. Изменение напряжения на нагрузке связано со сменой в фазе высоковольтной обмотки трансформатора ключа, находящегося в проводящем состоянии. В процессе изменения напряжения фазы участвуют два ключа, один

из которых должен перейти в выключенное состояние, а другой во включенное [17]. Тиристоры не являются полностью управляемыми приборами, и необходимость обеспечения для выключаемого ключа определенных условий выключения, в том числе, времени для восстановления его запирающих свойств (порядка 200...500 мкс), — процесс обеспечения надежного переключения ключей, требующий выполнения ряда условий, учитывающих как режим работы нагрузки трансформатора, так и требований по регулированию уровней выходного напряжения на стороне НН [18]. Выполнение этих условий обеспечит надежное изменение пути протекания тока нагрузки в обмотке высокого напряжения фазы трансформатора с ранее проводящего ключа во вновь включаемый ключ. В случае невыполнения условий может образоваться короткозамкнутая секция высоковольтной обмотки трансформатора с двумя одновременно проводящими ключами. Такой режим будет считаться аварийным и для трансформатора недопустим.

Алгоритмы управления полупроводниковым устройством регулирования напряжения трансформатора

Для схемы, представленной на рис. 1, проанализированы электромагнитные процессы, протекающие в питающей сети 10 кВ, трансформаторе, полупроводниковом тиристорном коммутаторе и нагрузке при регулировании напряжения на стороне НН трансформатора. Проведенный анализ показал, что на процесс переключения ключей тиристорного коммутатора оказывает существенное влияние характер нагрузки трансформатора, поскольку он определяет фазовый сдвиг между токами тиристорных ключей и прикладываемыми к ним напряжениями. Также важным критерием является направление изменения выходного напряжения: увеличение или уменьшение напряжения, что также сказывается на процессах надежного выключения тиристорных ключей, выводимых из работы.

Для надежного управления уровнями выходного напряжения трансформатора должно быть обеспечено выполнение следующих требований к алгоритму переключения ключей регулятора [15].

При увеличении выходного напряжения и любом характере нагрузки проводящий ключ выключают путем снятия с него импульса управления и подачи импульса управления на вновь включаемый ключ на интервалах времени, когда напряжение и ток фазы питающей сети 10 кВ одинаковы по знакам (рис. 2).

При уменьшении выходного напряжения трансформатора и активно-индуктивной и индуктивной нагрузках в начале следует снимать импульс управления с проводящего ключа и отслеживать ток питающей сети 10 кВ. После спада тока в питающей сети к нулю следует подавать импульс управления на отпирание выключаемого ключа. Подобный алгоритм управления должен осуществляться и при активной нагрузке (рис. 2).

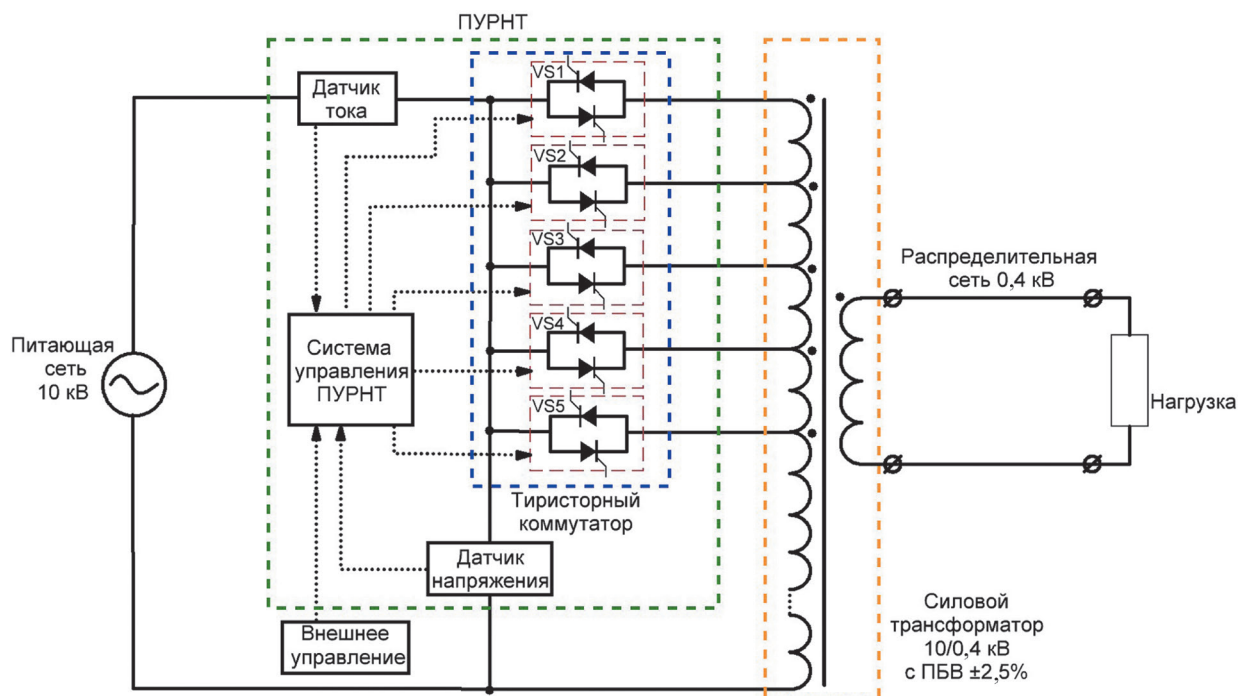


Рис. 1. Упрощенная схема построения ПУРНТ

При уменьшении выходного напряжения в случае активно-емкостной и емкостной нагрузок импульсы управления с проводящего ключа снимают на интервале времени, когда ток и напряжение питающей сети 10 кВ имеют разные знаки. На этом же интервале времени необходимо подавать импульс управления на отпирание включаемого ключа (рис. 2).

Диаграммы, приведенные на рис. 2, иллюстрируют процессы переключения ключей тиристорного коммутатора ПУРНТ при различных типах нагрузок и управлении выходным напряжением трансформатора. Для реализации надежного переключения ключей учитывают направление изменения выходного напряжения трансформатора (увеличение напряжения или его уменьшение), а также характер нагрузки трансформатора (активная, активно-индуктивная или активно-емкостная). Система управления ПУРНТ должна иметь датчики тока и напряжения сети, определять знак фазового сдвига между током и напряжением питающей сети (отстающий или опережающий ток относительно напряжения), а также фиксировать моменты времени, когда ток и напряжение питающей сети имеют нулевые значения.

Моделирование процессов управления напряжением в полупроводниковом устройстве регулирования напряжения трансформатора

Предварительное исследование разработанных алгоритмов управления напряжением в ПУРНТ проведено на имитационных моделях в Matlab Simulink. Трехфазная электрическая сеть 10 кВ моделируется трехфазным источником ЭДС. Внутреннее сопротивление источника и погонные параметры ЛЭП

10 кВ не учитываются, так как не влияют на процессы переключения тиристорных ключей полупроводникового коммутатора ПУРНТ. В качестве моделей тиристорных ключей VS1 — VS5 взяты стандартные встроенные модели однооперационных тиристорных модулей Sim Power System среды Matlab Simulink. Модель силового трансформатора учитывает наличие индуктивностей рассеяния вторичных и первичных обмоток, значение индуктивности намагничивания сердечника велико, по причине чего влияние тока намагничивания на протекающие электромагнитные процессы также не учитывается. Со стороны обмоток НН варьируются как величина, так и характер подключенных к ним электрических нагрузок.

Временные диаграммы токов и напряжений на выходе ПУРНТ при различных характерах нагрузки трансформатора и изменениях выходного напряжения приведены на рис. 3, а, б. Характер нагрузки определяется из фазового сдвига между током и напряжением. Там же показаны синхроимпульсы, необходимые для отслеживания моментов снятия и подачи импульсов управления на управляемые тиристорные ключи. Срез синхроимпульса указывает на момент времени, когда происходит снятие импульсов управления с проводящего ток двунаправленного тиристорного ключа текущей ступени регулирования напряжения. В свою очередь, фронт синхроимпульса демонстрирует момент времени, когда осуществляется подача импульсов управления на требуемый управляемый тиристорный ключ для смены ступени регулирования выходного напряжения трансформатора.

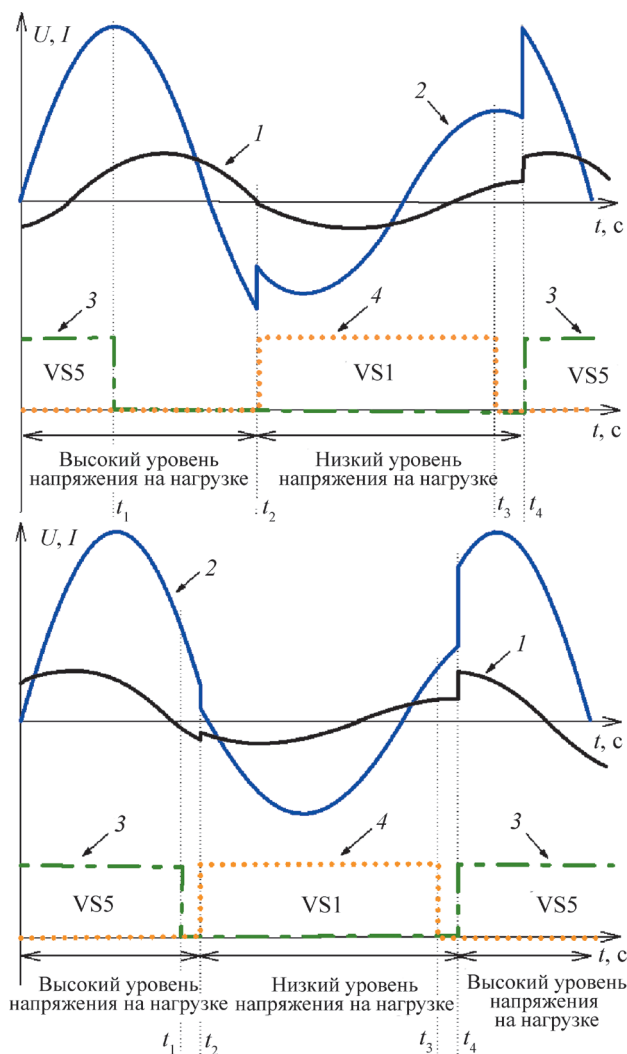


Рис. 2. Временные диаграммы выходных токов и напряжений силового трансформатора с ПУРНТ при RL - и RC -нагрузках: 1, 2 — выходные ток и напряжение; 3, 4 — импульсы управления ключами VS5 и VS1

Из временных диаграмм, полученных в ходе имитационного моделирования (см. рис. 3), хорошо видно, что процессы коммутации проходят без прерывания тока и напряжения в нагрузке.

Результаты имитационного моделирования, с учетом принятых в модели допущений, подтвердили работоспособность ПУРНТ и реализуемость алгоритмов управления его полупроводниковым коммутатором, что является подтверждением возможности обеспечения надежной работы устройства в широком диапазоне изменения нагрузок и полном диапазоне регулирования напряжений.

Исследование экспериментального образца полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора

На основании положительных результатов имитационного моделирования дальнейшее изучение

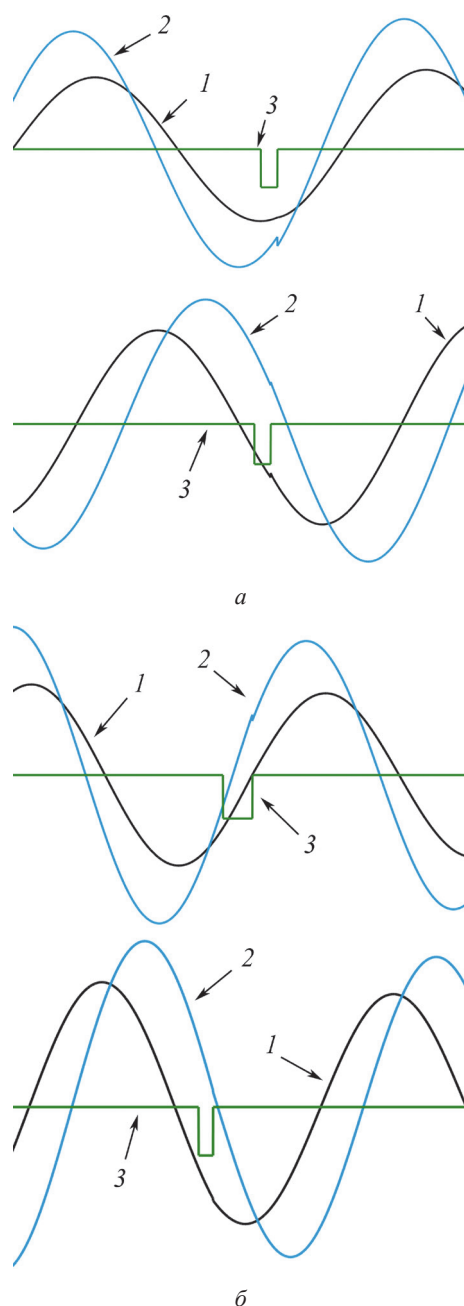


Рис. 3. Процессы при имитационном моделировании: а — переключение с увеличением выходного напряжения; б — переключение с уменьшением выходного напряжения; 1, 2 — выходные ток и напряжение; 3 — синхроимпульс, показывающий моменты снятия импульсов управления с текущей ступени регулирования (срез) и подачи импульсов управления на новую ступень регулирования (фронт)

ПУРНТ проходило на экспериментальном стенде с использованием экспериментального (макетного) образца ПУРНТ совместно с трансформатором сухого типа 10/0,4 кВ — 250 кВА (рис. 4).

В качестве питающей сети использована трехфазная сеть класса 10 кВ. В качестве нагрузок, подключаемых к обмоткам НН трансформатора, — регулируемые

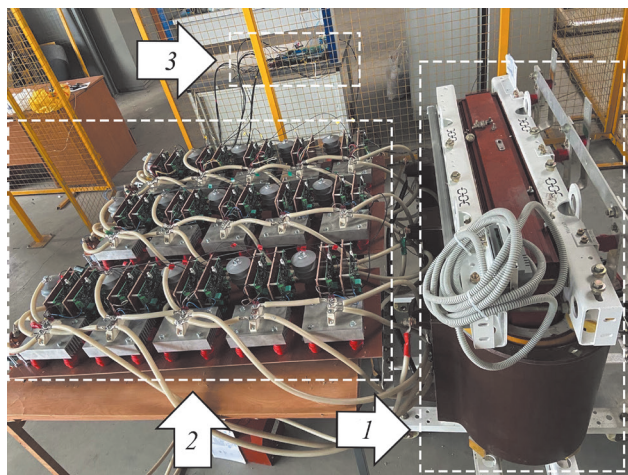


Рис. 4. Экспериментальный образец полупроводникового регулятора напряжения с силовым трансформатором 10/0,4 кВ: 1 — силовым трансформатором 10/0,4кВ; 2 — трехфазный тиристорный коммутатор; 3 — система управления ПУРНТ

электрические нагрузки активного, активно-индуктивного, активно-емкостного, индуктивного и емкостного типов. Основная цель проводимых опытов — подтверждение обоснованности принятых технических решений по силовой схеме ПУРНТ и алгоритмам управления тиристорными ключами полупроводникового коммутатора в процессе регулирования выходного напряжения трансформатора.

На рисунке 5 изображены выборочные осциллограммы токов и напряжений на выходе трансформатора при регулировании уровня выходного напряжения посредством макета ПУРНТ.

Работы на экспериментальном образце показали, что характер протекающих электромагнитных процессов в целом соответствует полученным на имитационных моделях результатам моделирования. Подтверждена как функциональная работоспособность ПУРНТ совместно с силовым трансформатором 10/0,4 кВ, так и реализуемость разработанных алгоритмов при различных нагрузках и во всем диапазоне изменения выходных напряжений трансформатора.

На текущем этапе созданные технические решения по построению и управлению ПУРНТ адаптированы к непрерывной работе с серийно-выпускаемыми силовыми трансформаторами с диапазоном мощностей 250...1000 кВт. Ведутся работы по расширению диапазона мощностей устройств и функций системы управления с интеграцией в нее функций диагностики, мониторинга, защиты и реализацией цифровых интерфейсов стандарта МЭК 61850 [19, 20].

Выводы

Основными достоинствами представленного в статье полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (ПУРНТ) являются:

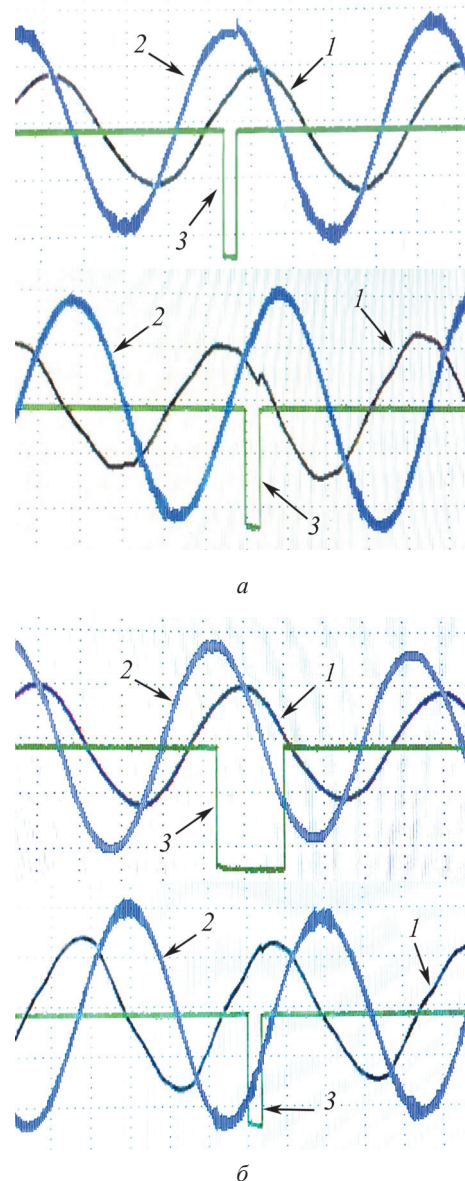


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы при различных характерах нагрузки:

а — переключение с увеличением выходного напряжения; *б* — переключение с уменьшением выходного напряжения; 1, 2 — выходные ток и напряжение; 3 — синхроимпульс, показывающий моменты снятия импульсов управления с текущей ступени регулирования (срез) и подачи импульсов управления на новую ступень регулирования (фронт)

— высокое быстродействие регулирования, позволяющее управлять напряжением на нагрузке в темпе ее изменения, и, тем самым, непрерывно поддерживать уровень напряжения в рамках ГОСТ 32144 [2];

— реализация возможности регулирования напряжения в сети 0,4 кВ под нагрузкой без прерывания тока и напряжения;

— надежность работы регулятора, обусловленная отсутствием механических контактов (все переключения выполняются с помощью полупроводниковых

ключей, не имеющих ограничений на ресурс переключения);

— высокий КПД устройства, связанный с незначительными потерями в полупроводниковых тиристорных ключах;

— возможность пофазного регулирования напряжения на обмотке НН, что позволяет симметризовать напряжения в трехфазных сетях 0,4 кВ;

— простота интеграции устройства в цифровую подстанцию с централизованной системой мониторинга и управления режимами работы силового трансформатора на основе стандарта МЭК 61850 [19, 20].

Разработанный полупроводниковый регулятор рассчитан на непрерывную работу с серийно-выпускаемыми силовыми трансформаторами с диапазоном мощностей 250/500/1000 кВт. Дальнейшая доработка системы управления позволит включить в нее системы диагностики, мониторинга, защиты и реализацию цифровых интерфейсов стандарта МЭК 61850 [19, 20].

Литература

1. Янченко С.А., Цырук С.А., Куликов А.И. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока // Промышленная энергетика. 2017. № 7. С. 44—53.
2. ГОСТ 32144—2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Копейкина Т.В. Вопросы построения и реконструкции распределительных сетей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12 (4). С. 592—595.
4. Концепция ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030». М., 2018.
5. Лавров А.Г., Попов Е.Н. Анализ процессов регулирования напряжения силовых трехобмоточных трансформаторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 10. С. 63—71.
6. Гуков П.О., Кулешов Д.Ю. Способы регулирования напряжения в распределительной электрической сети // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: ООО «ЦеСАин», 2017. С. 46—49.
7. Pezeshki H., Arefi A., Ledwich G., Wolfs P. Probabilistic Voltage Management Using OLTC and dSTATCOM in Distribution Networks // IEEE Trans. Power Delivery. 2018. V. 33 (2). Pp. 570—580.
8. Лавров А.Г., Попов Е.Н. Анализ режимов регулирования вторичного напряжения трансформаторов с устройствами РПН // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 5. С. 53—58.
9. Castro J.C., Lagos G.S., González O.A. Simulation and Measuring of Transients in On-Load Tap Changers // IEEE Latin America Trans. 2017. V. 15. No. 10. Pp. 1901—1907.

Представленные результаты достигнуты в рамках реализации проекта с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г. Исследования и разработки выполнены коллективом в составе АО ВО «Электроаппарат», НИУ «МЭИ», АО «ЭНИН» и АО «НИИВА» в рамках прикладного проекта «Разработка и создание высокотехнологичного производства быстродействующих полупроводниковых устройств регулирования выходного напряжения трансформаторов под нагрузкой в составе трансформаторных подстанций класса 6-10/0,4 кВ цифровых распределительных сетей» (Соглашение № 075-11-2019-060 от 6 декабря 2019 г.) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

References

1. Yanchenko S.A., Tsyruk S.A., Kulikov A.I. Analiz Metodov Razgruzki Transformatorov v Setyakh s Vysokim Urovnem Nesinusoidal'nosti Toka. Promyshlennaya Energetika. 2017;7:44—53. (in Russian).
2. GOST 32144—2013. Elektricheskaya Energiya. Sovmestimost' Tekhnicheskikh Sredstv Elektromagnitnaya. Normy Kachestva Elektricheskoy Energii v Sistemakh Elektrosnabzheniya Obshchego Naznacheniya. (in Russian).
3. Kopeykina T.V. Voprosy Postroeniya i Rekonstruktsii Raspredelitel'nykh Setey. Mezhdunarodnyy Zhurnal Prikladnykh i Fundamental'nykh Issledovaniy. 2016;12 (4): 592—595. (in Russian).
4. Kontseptsiya PАО «Rosseti» «Tsifrovaya Transformatsiya 2030». M., 2018. (in Russian).
5. Lavrov A.G., Popov E.N. Analiz Protseessov Regulirovaniya Napryazheniya Silovykh Trekhobmotochnykh Transformatorov. Izvestiya SPbGETU «LETI». 2019;10: 63—71. (in Russian).
6. Gukov P.O., Kuleshov D.Yu. Sposoby Regulirovaniya Napryazheniya v Raspredelitel'noy Elektricheskoy Seti. Aktual'nye Problemy Energetiki APK: Materialy VIII Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Saratov: OOO «TSeSAin», 2017:46—49. (in Russian).
7. Pezeshki H., Arefi A., Ledwich G., Wolfs P. Probabilistic Voltage Management Using OLTC and dSTATCOM in Distribution Networks. IEEE Trans. Power Delivery. 2018;33 (2):570—580.
8. Lavrov A.G., Popov E.N. Analiz Rezhimov Regulirovaniya Vtorichnogo Napryazheniya Transformatorov s Ustroystvami RPN. Izvestiya SPbGETU «LETI». 2017;5:53—58. (in Russian).
9. Castro J.C., Lagos G.S., González O.A. Simulation and Measuring of Transients in On-Load Tap Changers. IEEE Latin America Trans. 2017;15;10:1901—1907.

10. Дед А.В., Лавриков Ю.П., Горюнов В.Н., Кропотин О.В., Смирнов П.С. Определение допустимых диапазонов регулирования медленных изменений напряжения путем имитационного моделирования // Омский научный вестник. 2018. № 5. С. 90—96.
11. Фокеев А.Е., Атрахманов А.А., Даутов Р.Р. Выбор мощности силовых трансформаторов для подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ с учетом влияния нелинейной нагрузки // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 65—74.
12. Daratha N., Das B., Sharma J. Coordination Between OLTC and SVC for Voltage Regulation in Unbalanced Distribution System Distributed Generation // IEEE Trans. Power Syst. 2013. V. 29 (1). Pp. 289—299.
13. Mouli G.R.C. e. a. Design of a Power-Electronic-Assisted OLTC for Grid Voltage Regulation // IEEE Trans. Power Delivery. 2014. V. 7. No. 1. Pp. 1086—1095.
14. Якимов И.А., Николаев А.А., Барабаш Р.О., Анохин В.В. Исследование работы тиристорного регулятора напряжения печного трансформатора в режиме стабилизации первичного тока дуговой сталеплавильной печи // Электротехника. 2016. Т. 3. № 4. С. 3—10.
15. Пат. № 2711587 РФ. Способ управления напряжением трансформатора под нагрузкой и устройством для его реализации / Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев, А.В. Горчаков // Бюл. изобрет. 2020. № 2.
16. Пат. № 2711589 РФ. Способ управления напряжением трансформатора под нагрузкой и устройством для его реализации / Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев, А.В. Горчаков // Там же.
17. Бялясов П.П., Мускатиньев А.В. Исследование процессов включения силовых тиристорov в высоковольтных преобразователях // XLVI Огаревские чтения: Материалы науч. конф. Саранск: Изд-во Национального исследовательского Мордовского гос. ун-та им. Н.П. Огарева. 2018. С. 46—53.
18. Hasan E.O., Hatata A.Y., Badran E.A.-E. Voltage Control of Distribution Systems using Electronic OLTC // Proc. Twentieth Intern. Middle East Power Systems Conf. 2018. V. 48. No. 1. Pp. 845—849.
19. Бойченко О.В., Дячук В.С. Построение информационной модели цифровой подстанции на основе стандарта МЭК 61850 // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4 (46). Ч. 2. С. 39—42.
20. Topolskiy D.V., Yumagulov N.I., Galiyev A.L. Development of Technical Solutions for Digital Substations Using Ddigital Instrument Combined Current and Voltage Transformers // Proc. Intern. Conf. Industrial Eng., Appl. and Manufacturing. Moscow, 2018. Pp. 872—879.
10. Ded A.V., Lavrikov Yu.P., Goryunov V.N., Kropotin O.V., Smirnov P.S. Opredelenie Dopustimykh Diapazonov Regulirovaniya Medlennykh Izmeneniy Napryazheniya Putem Imitatsionnogo Modelirovaniya. Omskiy nauchnyy vestnik. 2018;5:90—96. (in Russian).
11. Fokeev A.E., Atrakhmanov A.A., Dautov R.R. Vybtor Moshchnosti Silovykh Transformatorov dlya Podstantsiy Napryazheniem 10(6)/0,4 kV s Uchetom Vliyaniya Nelineynoy Nagruzki. Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova. 2020;23;1: 65—74. (in Russian).
12. Daratha N., Das B., Sharma J. Coordination Between OLTC and SVC for Voltage Regulation in Unbalanced Distribution System Distributed Generation. IEEE Trans. Power Syst. 2013;29 (1):289—299.
13. Mouli G.R.C. e. a. Design of a Power-Electronic-Assisted OLTC for Grid Voltage Regulation. IEEE Trans. Power Delivery. 2014;7;1:1086—1095.
14. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Barabash R.O., Anokhin V.V. Issledovanie raboty Tiristorного Regulyatora Napryazheniya Pechnogo Transformatora v Rezhime Stabilizatsii Pervichnogo Toka Dugovoy Staleplavil'noy Pechi. Elektrotekhnik. 2016;3;4:3—10. (in Russian).
15. Pat. № 2711587 RF. Sposob Upravleniya Napryazheniem Transformatora pod Nagruzkoj i Ustroystvo dlya Ego Realizatsii. D.I. Panfilov, M.G. Astashev, A.V. Gorchakov. Byul. izobret. 2020;2. (in Russian).
16. Pat. № 2711589 RF. Sposob Upravleniya Napryazheniem Transformatora pod Nagruzkoj i Ustroystvo dlya Ego Realizatsii. D.I. Panfilov, M.G. Astashev, A.V. Gorchakov. Tam zhe. (in Russian).
17. Balyasov P.P., Muskatin'ev A.V. Issledovanie Protsevvov Vklyucheniya Silovykh Tiristorov v Vysokovol'tnykh Preobrazovatelyakh. XLVI Ogarevskie Chteniya: Materialy Nauch. Konf. Saransk: Izd-vo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Mordovskogo Gos. Unta im. N.P. Ogareva. 2018;46—53. (in Russian).
18. Hasan E.O., Hatata A.Y., Badran E.A.-E. Voltage Control of Distribution Systems using Electronic OLTC. Proc. Twentieth Intern. Middle East Power Systems Conf. 2018;48;1:845—849.
19. Boychenko O.V., Dyachuk V.S. Postroenie Informatsionnoy Modeli Tsifrovoy Podstantsii na Osnove Standarta MEK 61850. Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal. 2016;4 (46);2:39—42. (in Russian).
20. Topolskiy D.V., Yumagulov N.I., Galiyev A.L. Development of Technical Solutions for Digital Substations Using Ddigital Instrument Combined Current and Voltage Transformers. Proc. Intern. Conf. Industrial Eng., Appl. and Manufacturing. Moscow, 2018;872—879.

Сведения об авторах:

Панфилов Дмитрий Иванович — доктор технических наук, профессор, научный руководитель АО «НТЦ ФСК ЕЭС», заместитель генерального директора по науке АО «ЭНИН» им. Г.М. Кржижановского, профессор кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: dmitry.panfilov@inbox.ru

Асташев Михаил Георгиевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники НИУ «МЭИ», заведующий лабораторией преобразовательной техники им. К.А. Круга АО «ЭНИН» им. Г.М. Кржижановского, e-mail: astashev.michael@gmail.com

Горчаков Александр Владимирович — аспирант, инженер первой категории кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ», e-mail: aleks-gorch@yandex.ru

Information about authors:

Panfilov Dmitry I — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Scientific Adviser JSC «STC FGC UES», Deputy Director General for Science JSC «ENIN» Named after G.M. Krzhizhanovsky, Professor of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: dmitry.panfilov@inbox.ru

Astashev Mikhail G. — Ph.D. (Techn.), Head of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, Head of the Laboratory of Converting Equipment Named after K. A. Krug JSC «ENIN» Named after G.M. Krzhizhanovsky, e-mail: astashev.michael@gmail.com

Gorchakov Aleksandr V. — Ph.D.-student, Engineer of the First Category of Industrial Electronics Dept., NRU MPEI, e-mail: aleks-gorch@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 06.05.2020

The article received to the editor: 06.05.2020