

Климаш В. С., Лавренов А. С.

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре Государственный Технический Университет»

МНОГОУРОВНЕВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Приведен принцип каскадного построения многоуровневых регулирующих устройств на входе высоковольтных трансформаторных подстанций для поддержания напряжения у потребителей на заданном уровне. Аналитическими соотношениями выявлен алгоритм управления, на основе которого в среде MatLab апробировано функционирование системы управления и всего устройства в целом.

Ключевые слова: специальный алгоритм и сигнал управления, система управления, многоуровневое напряжение, импульсно-фазовое регулированием и широтно-импульсная модуляция, вольтодобавочный каскад, трансформаторная подстанция.

ВВЕДЕНИЕ

Каскадное построение вольтодобавочных устройств [2] позволяет регулировать напряжение на входе трансформаторной подстанции (ТП) от 6 кВ и выше на основе IGBT модулей. Преимуществами таких регулирующих устройств являются: высокие энергетические показатели, линейность регулировочной характеристики и жесткость внешней характеристики, высокая частота модуляции при относительно низкой частоте переключения транзисторов. Регулирование производится практически без искажений входного тока, а несинусоидальность выходного напряжения значительно ниже величин установленного ГОСТ и составляет не более 3 %.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Схема содержит силовой трансформатор (СТ), нагрузку (Н), блоки вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с блоками инверторов напряжения (БИН), запитанных от источника постоянного напряжения (ИПН), формируют вольтодобавочные устройства, совокупность которых образует вольтодобавочный каскад (ВДК). Каскад включен последовательно между сетью и СТ. Для инвертора напряжения (ИН) предложен специальный способ и алгоритм управления. В состав системы управления (СУ) входит формирователь сигнала управления (ФСУ) с углом α для каждого ИН, синхронизированный от трехфазного трансформатора (ТС) канал регулирования напряжения (КРН) с углом β в цепи обратной связи от датчика отклонения напряжения (ДОН). Схема трансформаторной подстанции с вольтодобавочным каскадом для бесконтактной стабилизации напряжения приведена на **рис. 1**.

В основе формирования переменного напряжения ТП лежит суммирование напряжения сети и напряжения ВДК. Формирование добавочного напряжения основано на 150-градусном управлении ИН [4], совместном согласованном управлении каскадом и межфазном взаимодействии напряжений в цепи первичной обмотки силового трансформатора с изолированной нейтралью.

Принцип регулирования напряжения ВДК без сдвига первой гармонической составляющей относительно напряжения сети иллюстрирует векторная диаграмма, приведенная на **рис. 2**.

Вектора напряжений $\vec{U}_{ВД1}, \vec{U}_{ВД2}$ при $\beta = 0$

$$\vec{U}_{ВД1} = U_d \cdot K_{и} \cdot e^{i\alpha}, \vec{U}_{ВД2} = U_d \cdot K_{и} \cdot e^{-i\alpha}, \quad (1)$$

где U_d – напряжение питания инверторов; $K_{и} = 0,9$ – коэффициент передачи напряжения мостовым однофазным инвертором; α и $-\alpha$ – аргументы векторов $\vec{U}_{ВД1}$ и $\vec{U}_{ВД2}$ соответственно.

Напряжение ВДК на основании (1):

$$\vec{U}_{ВДК} = \vec{U}_{ВД1} + \vec{U}_{ВД2} = U_d \cdot K_{и} \cdot e^{i\alpha} + U_d \cdot K_{и} \cdot e^{-i\alpha}$$

или

$$\vec{U}_{ВДК} = U_d \cdot K_{и} \cdot (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}). \quad (2)$$

С учётом преобразования Эйлера $e^{i\alpha} + e^{-i\alpha} = 2 \cdot \cos \alpha$ выражение (2) преобразуется к виду

$$\vec{U}_{ВДК} = U_{ВДК} = U_d \cdot K_{и} \cdot 2 \cdot \cos \alpha. \quad (3)$$

Вольтодобавочные трансформаторы, исполняя роль силовых сумматоров, прибавляют напряжение каскада к напряжению сети и формируют напряжение питания ТП: $U_1 = U_C + U_{ВДК}$, где U_1 – напряжение на первичной обмотке СТ.

С учётом (3) и коэффициента трансформации ВДК $K_{КТ}$ получим

$$U_1 = U_C + 2 \cdot K_{КТ} \cdot K_d \cdot K_{и} \cdot 2 \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Здесь $K_{КТ} = 2 \cdot K_{ВТ} = 2 \cdot U_{1ВТ} / U_{2ВТ}$, где $U_{1ВТ}, U_{2ВТ}$ – напряжение на первичной и вторичной обмотке ВДТ соответственно.

При $\beta = \alpha/2$ вектора напряжений вольтодобавки имеют вид:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{ВД1} &= 2 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot \cos \alpha \cdot e^{i\beta}, \vec{U}_{ВД2} = \\ &= 2 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot \cos \alpha \cdot e^{-i\beta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Напряжение вольтодобавки с учётом $K_{КТ}$

$$\begin{aligned} \vec{U}_{ВДК} &= \vec{U}_{ВД1} + \vec{U}_{ВД2} = \\ &= 2 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot (e^{i\beta} + e^{-i\beta}) \end{aligned}$$

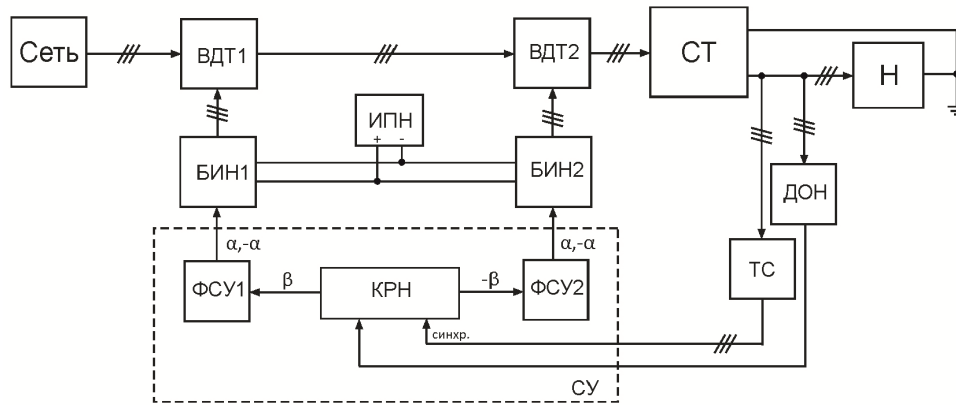


Рис. 1. Структурная схема ВДК-ТП

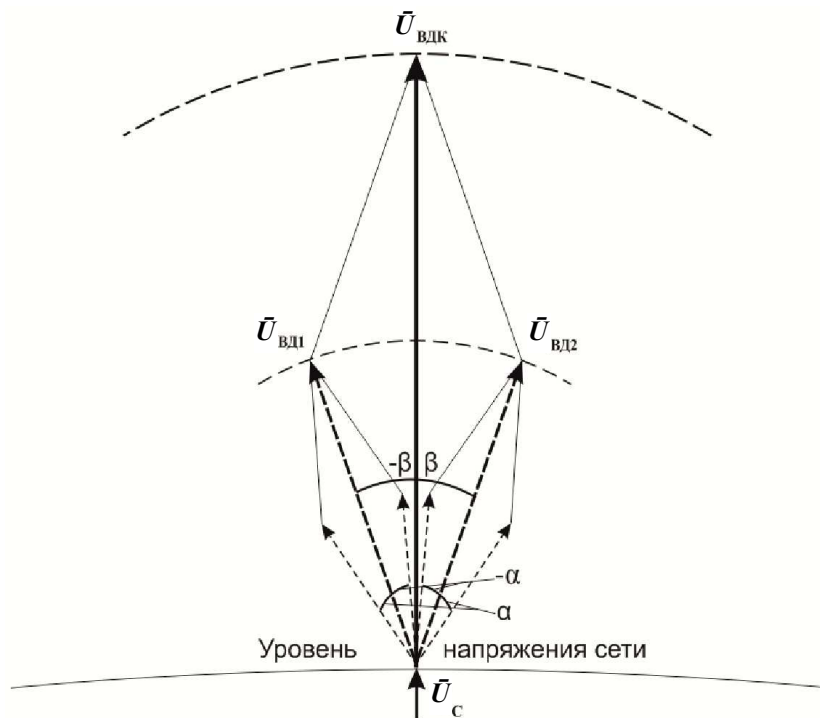


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений ВДК:

$\vec{U}_{ВД1}$, $\vec{U}_{ВД2}$ - векторы напряжений первого и второго устройств вольтодобавки; $\vec{U}_{ВДК}$ - вектор напряжения каскада; β - угол регулирования напряжения между двумя вольтодобавочными устройствами каскада; α - угол управления для 150-градусного алгоритма управления ИН; \vec{U}_c - верхняя часть вектора напряжения сети

при совпадении по фазе $U_{ВДК}$ и U_c

$$U_{ВДК} = U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot 2 \cos \alpha \cdot 2 \cos \beta$$

или

$$U_{ВДК} = 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (6)$$

На основании выражений (5) и (6) напряжение на выходе СТ

$$U_2 = \frac{U_c + 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{K_{СТ}},$$

где $K_{СТ}$ – коэффициент трансформации СТ.

Блочнo-модульнoе построение ВДК с СУ

Математические модели ВДК и СУ в составе ТП, реализованные в среде MatLab/Simulink, представлены на рис. 3. ВДК содержит 6 однофазных мостовых

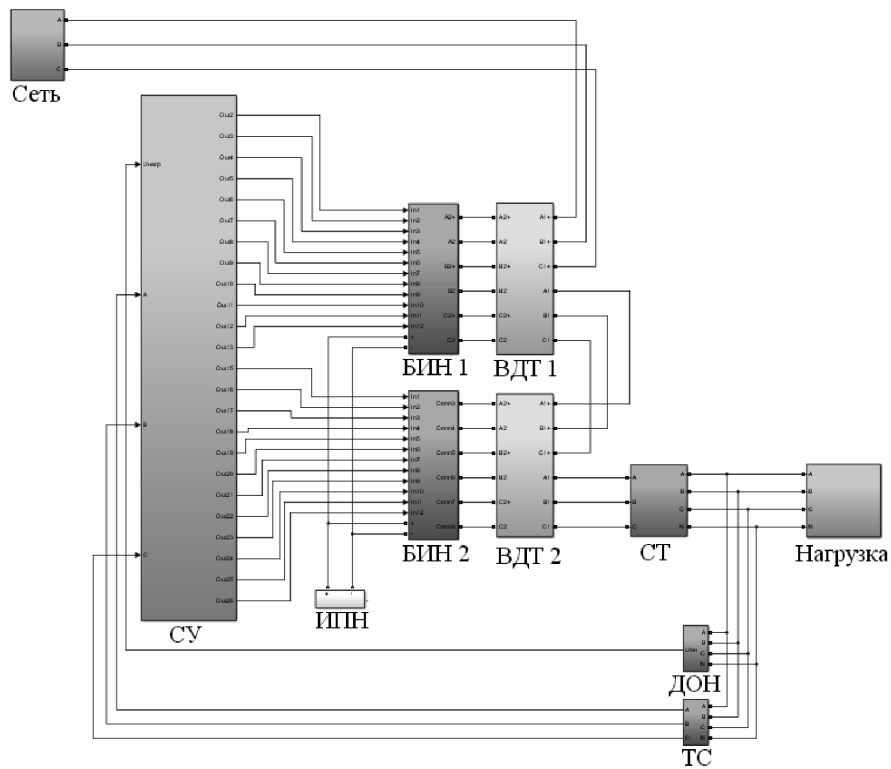
IGBT модулей и трехфазные вольтодобавочные трансформаторы. Силовой трансформатор подстанции имеет схему соединения Y/Y с нулевым проводом на вторичной обмотке.

ФОРМИРОВАТЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНОГО СИГНАЛА

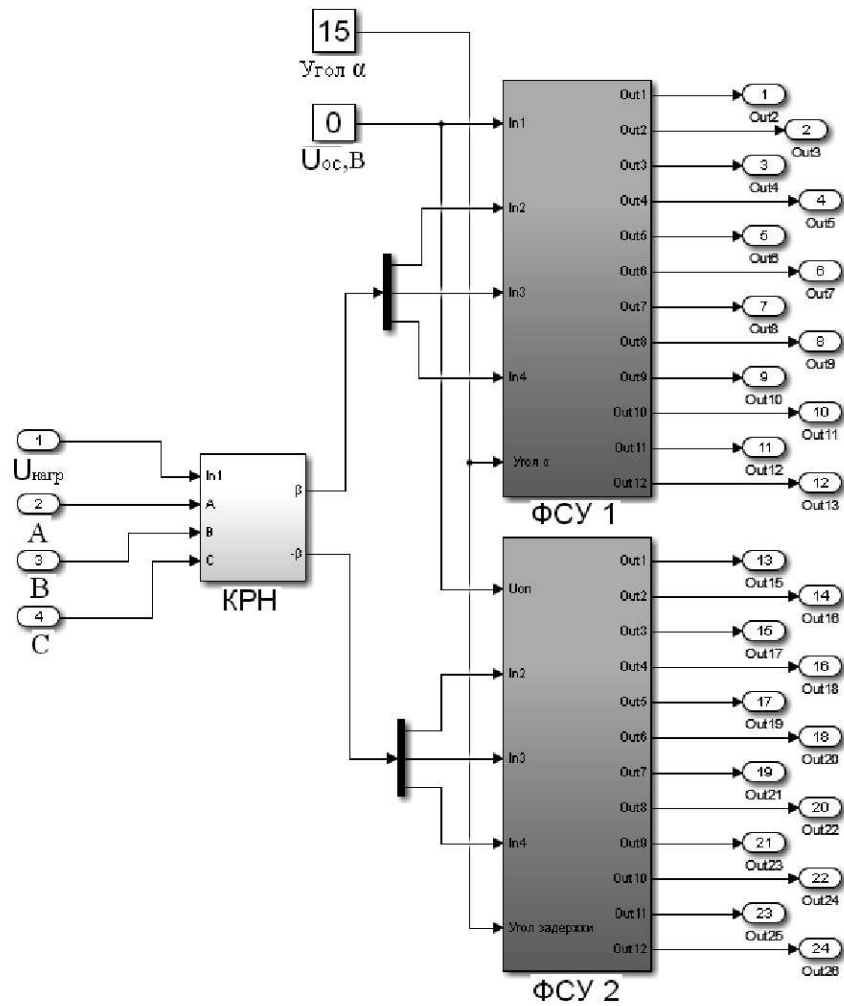
Устройство формирования специального сигнала [3], реализующее 150-градусный алгоритм [1] управления ИН в трехфазной системе электроснабжения, представлено на рис. 4.

Модель формирователя построена на основе блока *Dead Zone Dynamic* (рис. 4, а) в программной среде MatLab, а его физическая реализация возможна на основе операционного усилителя (ОУ) и подстроечного резистора (рис. 4, б).

Выходной сигнал устройства формируется действием отрицательной обратной связи операционного усилителя и потенциометра. При помощи потенциометра регулируется степень смещения положительной



а



б

Рис. 3. Математические модели в среде MatLab:
а – ВДК в составе ТПИ; б – СУ с импульсно-фазовым регулированием

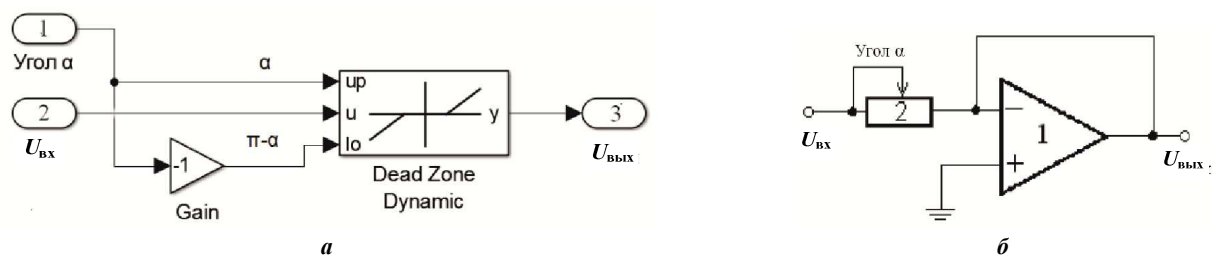


Рис. 4. Модель формирователя сигнала специальной формы:
а – в среде MatLab; б – схема на ОУ

и отрицательной полуволны выходного сигнала усеченной синусоидальной формы, как показано на рис. 5. При указанном смещении выходного сигнала устройства угол управления α изменяется от 0 до 90° .

Формирователь сигнала специальной формы имеет простую реализацию и обладает высокой точностью регулирования. Изменение параметров этого сигнала в системе управления (СУ) позволяет реализовать несколько алгоритмов управления ИН.

Осциллограмма многоуровневого напряжения при работе одного вольтодобавочного устройства и 150-градусном управлении ИН отобразена на рис. 6.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим два алгоритма формирования напряжения применительно к трехфазной системе электроснабжения. При формировании добавочного многоуровневого напряжения с ШИМ однофазным ИН на входы компаратора подаются противофазные сигналы управления и опорный сигнал, формы которых показаны на рис. 7, а кривые 1, 2, 3 соответственно. Для улучшения качества ШИМ в момент $U_{\text{вых}} = 0$ В блок опорного сигнала формирует запрет на генерирование напряжения.

При этом частота модуляции на выходе ИН минимальна (рис. 7, б). После межфазного взаимодействия добавочное напряжение имеет кратное число раз фаз и числу каскадов модуляцию, кривая 1 на рис. 7, в. Угол β между $U_{\text{ВД1}}$ и $U_{\text{ВД2}}$ равен $\alpha/2$. С увеличением устройств вольтодобавки первая гармоника добавочного напряжения стремится к синусоидальной форме, кривая 2 на рис. 7, в.

Преимуществом в формировании добавочного многоуровневого напряжения на основе 150-градусного алгоритма в сравнении с известным 180-градусным алгоритмом заключается в меньшем гармоническом искажении и низкой частоте модуляции. Недостатком является искажение добавочного напряжения с ШИМ при амплитуде, близкой к нулю.

Другой алгоритм формирования напряжения представлен на рис. 8.

Его отличием является то, что опорный сигнал равен нулю, в связи с чем отсутствует ШИМ (рис. 8, а). Отсутствие ШИМ сокращает число коммутаций транзисторных ключей ИН (рис. 8, б). В этом случае регулирование напряжения вольтодобавки осуществляется встречным изменением угла β (рис. 8, в). Увеличение устройств вольтодобавки увеличивает количество уровней напряжения.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАТОРА НАПЯЖЕНИЯ

На основе приведенных алгоритмов опишем работу

СУ (см. рис. 3, б) для системы электроснабжения с импульсно-фазовым регулированием.

Синхронизация системы управления ВДК производится от напряжения на низкой стороне СТ. Регулирование угла β блоком КРН меняет величину добавочного напряжения в зависимости от информации, полученной с датчика отклонения напряжения на нагрузке. Синхронизированный с сетью сигнал через блок ФСУ поступает на фазный компаратор, где сравнивается с нулевым опорным напряжением. Полученные управляющие импульсы подаются на вход драйвера IGBT модуля.

При регулировании угла от 0 до 90° , напряжение ВДК изменяется от максимального до нулевого значения, а в диапазоне 90 - 180° , от нулевого до минимального значения соответственно. Процесс регулирования напряжения ВДК в положительную и отрицательную полуволну происходит в 6 поддиапазонах, а общее регулирование осуществляется в 12-поддиапазонах.

Преимущества в формировании напряжения предложенным способом для системы электроснабжения заключаются в следующем:

- регулирование угла α дает точную настройку сигнала управления при формировании алгоритма управления ИН;
- каскадное построение уменьшает требуемую мощность вольтодобавочного устройства;
- импульсно-фазовое регулирование позволяет уменьшить количество переключений ключей инвертора, что снижает тепловые потери ИН в сравнении с ШИМ;
- упрощается алгоритм формирования управляющих импульсов за счет отсутствия синхронизированного опорного сигнала и создания временной паузы относительно сигнала управления.

Многоуровневое напряжение практически не искажает форму тока нагрузки в трансформаторах и сети. Это показано на осциллограммах математической модели подстанции [5], представленных на рис. 9.

Приведенные выше алгоритмы формирования сигналов для управления ИН позволяют получить следующие виды регулируемого многоуровневого напряжения:

- с ШИМ при фиксированном значении углов α , β . Амплитуда напряжения ВДК зависит от амплитуды сигнала управления;
- с широтно-импульсным 12-поддиапазонным регулированием напряжения, где амплитуда напряжения ВДК зависит от значения угла β ;
- с широтно-импульсной модуляцией (12-поддиапазонным регулированием напряжения), где изменение амплитуды напряжения ВДК возможно как

углом β , так и амплитудой специального сигнала управления.

Общим блоком при формировании сигналов управления в описанных способах является наличие блока формирования специального сигнала управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные эксперименты показали, что представленные алгоритмы и структура СУ вместе с силовой

схемой в составе ТП дают возможность формирования многоуровневого регулируемого напряжения для стабилизации её величины в нагрузке СТ с высокими энергетическими показателями, линейным регулированием характеристик и сравнительно жесткую внешнюю характеристику, при этом частота модуляции добавочного напряжения в 6 раз выше частоты коммутации транзисторов.

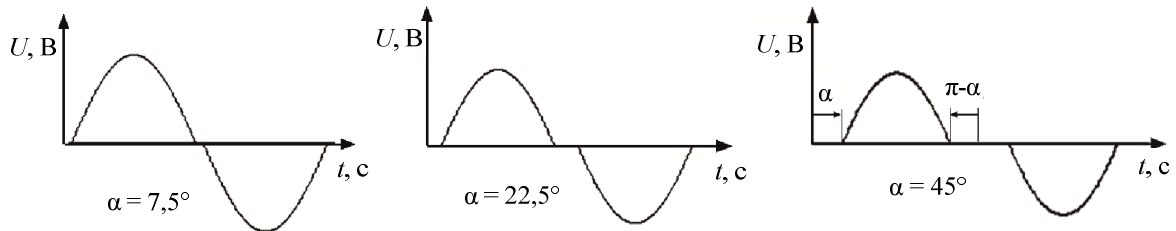


Рис. 5. Форма сигнала при разных углах управления

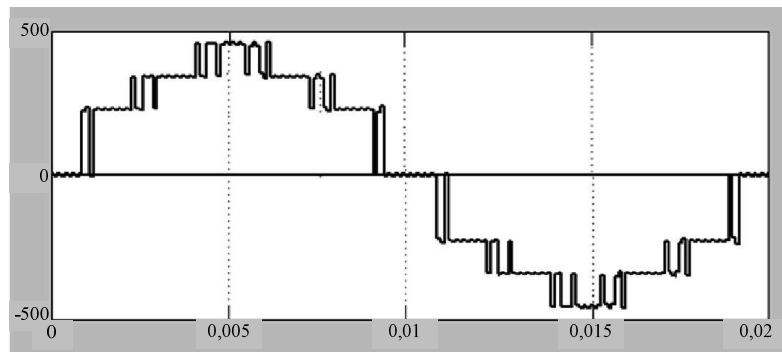


Рис. 6. Напряжение вольтодобавочного устройства

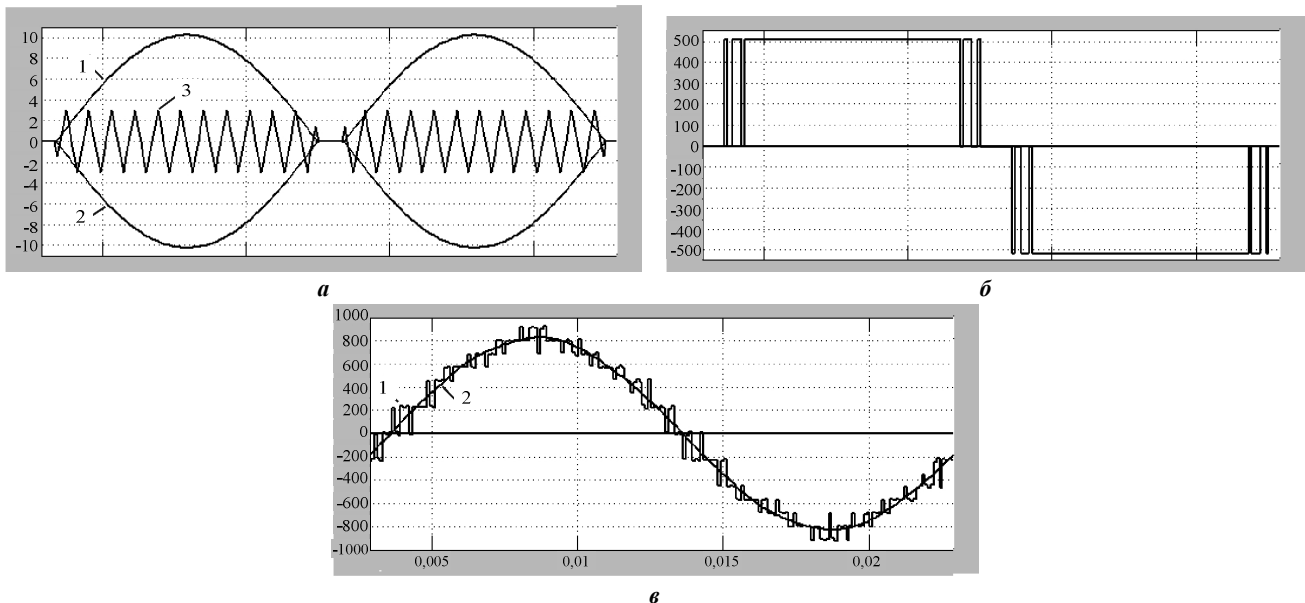


Рис. 7. Фазные напряжения с ШИМ:

- а – 1, 2 - прямой и обратный сигнал управления для однофазного ИН, 3 - опорный сигнал;
- б – напряжение на выходе однофазного ИН;
- в – 1 - напряжение ВДК, 2 – первая гармоника напряжения

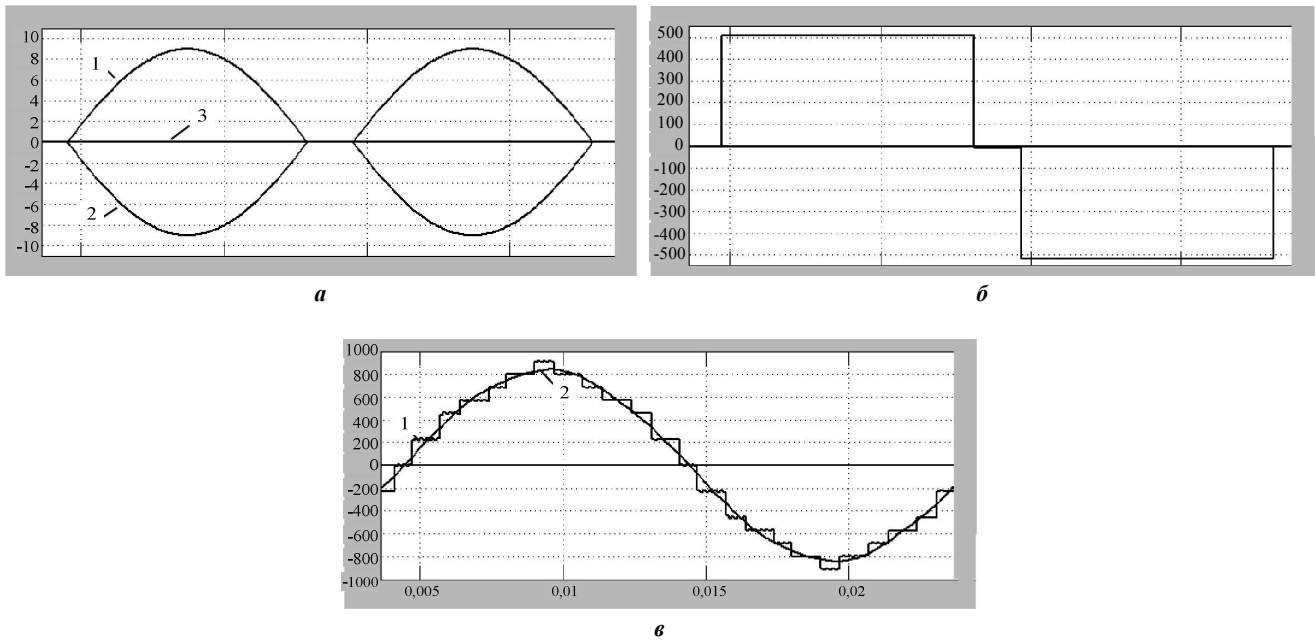


Рис. 8. Фазные напряжения с импульсно-фазовым регулированием:
а – 1, 2 - прямой и обратный специальный сигнал управления для однофазного ИН, 3 - опорный сигнал $U_{OC} = 0$ В;
б – напряжение на выходе однофазного ИН;
в – 1 - напряжение ВДК, 2 - первая гармоника напряжения

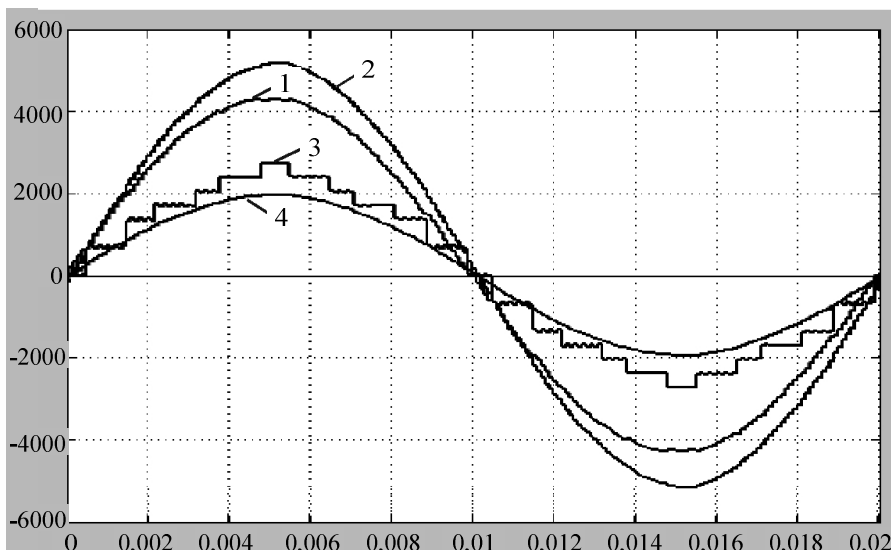


Рис. 9. Осциллограммы напряжения и тока сети при работе СТ на RL-нагрузку с импульсно-фазовым регулированием напряжения ВДК на входе ТП:
1 – напряжение сети; 2 – напряжение на входе СТ; 3– увеличенное напряжение вольтодобавки ВДК; 4 – ток сети

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климах В.С. Инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнаГТУ», 2010. С. 12– 13.
2. Климах В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием: монография. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 8-11.
3. Устройство для формирования сигнала специальной формы: пат. 2570032 Рос. Федерация; МПК H03K4/92 / Климах В.С., Лавренов А.С., Коротков И.И.; заявитель и патентообладатель Климах В.С., Лавренов А.С. № 2014126993/07; заявл. 01.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
4. Система 150-градусного управления ведомым инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией: пат. 135862 Рос. Федерация; МПК H02M7/539 / Климах В.С., Лавренов А.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. 2013121213/07; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. №35.
5. Модель вольтодобавочного каскада с многоуровневым напряжением в среде MatLab: свид. 2016611781 Рос. Федерация / В.С. Климах, А.С. Лавренов.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. 2015619802; заявл. 16.10.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. №3.

Поступила в редакцию 15 августа 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MULTI-LEVEL VOLTAGE REGULATION OF TRANSFORMER SUBSTATION

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State Technical University", Komsomolsk-na-Amure, Khabarovsk Krai, Russia.

Alexander S. Lavrenov

Ph.D. student, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State Technical University", Komsomolsk-na-Amure, Khabarovsk Krai, Russia.

The paper describes the principle of cascaded design of multi-level control devices at the input side of high-voltage transformer substations to maintain the preset voltage level for consumers. Analytical relationships were used to find the control algorithm, and the operation of the control system and the control device based on that algorithm was tested in MatLab environment.

Keywords: Special control algorithm and control signal, control system, multi-level voltage, pulse-phase control and pulse-width modulation, booster cascade/chain, transformer substation.

REFERENCES

1. Klimash V.S. *Invertory napryazheniya s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey* [Voltage-Source Inverters with Pulse-Width Modulation]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGTU Publ., 2010. pp. 12–13
2. Klimash V.S. *Voltodobavochnye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impulsnym i fazovym regulirovaniem* [Voltage Booster Aimed at Compensation of Voltage Fluctuations and Reactive Energy Fluctuations with Amplitude, Pulse and Phase Control]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. pp. 8-11.
3. Klimash V.S., Lavrenov A.S., Korotkov I.I. *Ustroystvo dlya formirovaniya signala spetsial'noy formy* [A device aimed at forming signals of special shape]. Patent RF, no. 2014126993/07, 2015.
4. Klimash V.S., Lavrenov A.S. *Sistema 150-gradusnogo upravleniya vedomym invertorom napryazheniya s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey* [150-degree control system of controlled voltage-source inverter with pulse-width modulation]. Patent RF, no. 2013121213/07, 2013.
5. Klimash V.S., Lavrenov A.S. *Model' vol'todobavochnogo kaskada s mnogourovnevym napryazheniem v srede MatLab* [Model of voltage booster cascade with multi-level voltage in MatLab environment]. Patent RF, no. 2015619802, 2016.

Климаш В. С., Лавренов А. С. Многоуровневое регулирование напряжения трансформаторной подстанции // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 10 – 16. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-10-16

Klimash V. S., Lavrenov A. S. Multi-level Voltage Regulation of Transformer Substation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 10 – 16. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-10-16
