

УДК 621.316.722

А.А. Асабин, А.А. Кралин

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПРИ ПООЧЕРЕДНОМ ДВУХЗОННОМ УПРАВЛЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Современное решение задачи качественного электроснабжения ответственных потребителей связано с разработкой устройств на основе полупроводниковых элементов, позволяющих осуществлять управление параметрами напряжения. В статье рассмотрены основные тенденции реализации трансформаторно-тиристорных регуляторов с импульсно-фазовым управлением для сетей переменного напряжения 0,4 кВ. Предложено применение двухзонного поочередного управления трансформаторно-тиристорным регулятором переменного напряжения с синхронизацией моментами перехода напряжения сети через нулевое значение. Данный способ позволяет реализовать автоматическую систему плавного регулирования и стабилизации напряжения нагрузки при глубоком изменении величины тока нагрузки на интервалах положительного и отрицательного направления потока мощности. Особенностью регуляторов с импульсно-фазовым управлением является наличие высших гармонических составляющих в выходном напряжении. В системе относительных единиц получены аналитические выражения, позволяющие выполнить расчет амплитудных значений первой и высших гармонических составляющих напряжения при двухзонном поочередном управлении. На основе полученных выражений выполнены исследования, позволившие определить факторы, которые влияют на содержание высших гармонических составляющих. Предложено выбирать коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора из условия ограничения значений коэффициентов гармонических составляющих на допустимом для потребителя уровне.

**Ключевые слова:** двухзонное регулирование, импульсно-фазовое управление, коэффициент гармонических составляющих, направление потока мощности, регулятор, трансформатор, тиристор.

### 1. Введение

В настоящее время в целях стабилизации напряжения ответственных потребителей в сетях 0,4 кВ применяют трансформаторно-тиристорные регуляторы напряжения (ТТРН) с дискретным или импульсно-фазовым управлением [1-3]. Дискретные регуляторы выполняются по достаточно сложным схемам и имеют высокую стоимость. Существенное

упрощение схемного решения и удешевление стабилизатора возможно путем реализации его силовой части на основе вольтодобавочного трансформатора (ВДТ), регулируемого тиристорными коммутаторами по импульсно-фазовому методу. При этом наилучшие регулировочные характеристики обеспечивают алгоритмы управления тиристорами, реализующие двухзонное регулирование [4]. Данные алгоритмы исключают появление нерегулируемых интервалов в выходном напряжении регулятора и устраняют причину возникновения колебательных процессов при его автоматической стабилизации [5].

Наибольшее распространение получил алгоритм двухзонного регулирования, основанный на выделении знака мощности. Рассмотрим его построение [4]. По сигналам датчика тока нагрузки и сигналам датчика напряжения сети выделяются интервалы совпадения знаков тока и напряжения. Данные интервалы принято называть интервалами положительного направления мощности, так как в течение их энергия передается из сети в нагрузку. В интервалах с противоположными знаками тока нагрузки и напряжения сети энергия рекуперируется из нагрузки в сеть. Данные интервалы принято называть интервалами отрицательного направления мощности. В интервалах положительного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования  $\alpha_1$ , выполняют переключение на повышение напряжения. В интервалах отрицательного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования  $\alpha_2$ , выполняют переключение на понижение напряжения. Изменяя значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , регулируют выходное напряжение в пределах регулировочной ступени. Данный алгоритм, при совместном изменении углов регулирования на повышение и понижение напряжения, известен как алгоритм с одновременным двухзонным регулированием [6]. Он не обеспечивает надежной работы ТТРН при глубоком изменении тока нагрузки. Например, при отключении нагрузки ток равен нулю и выделение интервалов направления мощности невозможно. В этом случае нарушаются регулировочные свойства ТТРН.

На кафедре «Промышленная электроника» НГТУ разработан способ двухзонного поочередного управления ТТРН с синхронизацией моментами перехода напряжения сети через нулевое значение [7]. Он обеспечивает двухзонное регулирование, реализуемое в интервалах положительного и отрицательного направления мощности. Данный способ не требует применения датчика тока. Поэтому регулировочные свойства ТТРН сохраняются при глубоком изменении величины тока нагрузки, а также на холостом ходу [8].

## **II. Цель и задачи исследования**

Особенностью регуляторов, работающих по импульсно-фазовому методу, является несинусоидальная форма выходного напряжения. Целью

проводимых исследований является определение факторов, влияющих на содержание высших гармонических составляющих при двухзонном поочередном управлении ТТРН и выработка рекомендаций по их ограничению в пределах, разрешенных нормативными документами [9].

### III. Материалы и методы решения поставленных задач

Анализ работы ТТРН проводим с использованием метода припасовывания при идеализации вольт-амперных и динамических характеристик тиристоров. Пренебрегаем сопротивлениями магнитной цепи и обмоток ВДТ. При анализе принимаем, что нагрузка линейна и имеет активно-индуктивный характер, как наиболее распространенная.

Схема исполнительного органа ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора  $TV1$  приведена на рисунке 1.

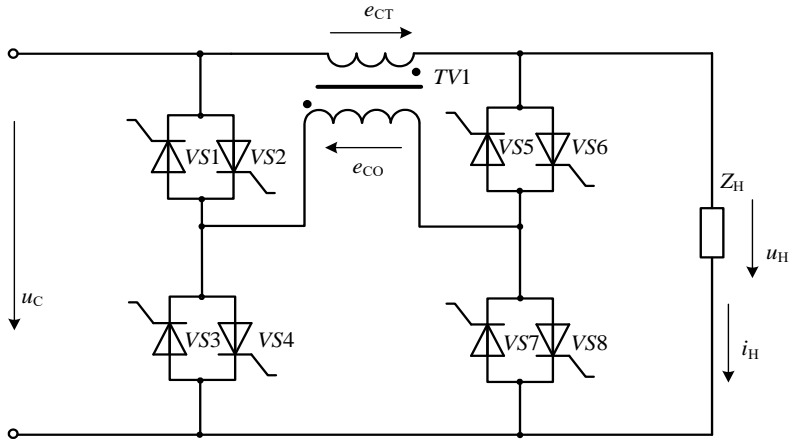


Рис. 1. ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора

Схема обеспечивает три стационарных режима работы ВДТ: «вольтоотбавка» – включены тиристоры  $VS3$ ,  $VS4$  и  $VS5$ ,  $VS6$ ; «закоротка» – включены тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$  и  $VS5$ ,  $VS6$ ; «вольтодобавка» – включены тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$  и  $VS7$ ,  $VS8$ . В режиме «вольтоотбавка» ВДТ включается по схеме понижающего автотрансформатора и напряжение нагрузки ( $u_H$ ) ниже напряжения сети ( $u_c$ ) на величину электродвижущей силы (ЭДС)  $e_{CT}$  регулировочной ступени  $u_H = u_c - e_{CT}$ . В режиме «закоротка» ВДТ находится в режиме короткого замыкания (КЗ) и включен последовательно с нагрузкой ( $Z_H$ ). В этом случае практически все напряжение сети приложено к сопротивлению нагрузки  $u_H = u_c$  поскольку сопротивление КЗ трансформатора мало. В режиме «вольтодобавка» ВДТ включается по

схеме повышающего автотрансформатора и напряжение нагрузки больше напряжения сети на величину ЭДС регулировочной ступени  $u_H = u_c + e_{ст}$ .

Переход из режима «вольтоотбавка» в режим «закоротка», согласно предложенному способу, начинается с увеличения угла переключения на понижение напряжения  $\alpha_2$  от 0 до  $\pi$  при фиксированном значении угла переключения на повышение напряжения  $\alpha_1 = \pi$  [7]. Такое изменение  $\alpha_2$  позволяет реализовать регулирование выходного напряжения в интервалах отрицательного направления мощности. Далее реализуется регулирование в интервалах положительного направления мощности путем уменьшения значения угла переключения  $\alpha_1$  от  $\pi$  до 0 при фиксированном значении  $\alpha_2 = \pi$ . Такое же поочередное двухзонное регулирование применяется и для плавного перехода из режима «закоротка» в режим «вольтодобавка». Плавный переход из режима «вольтодобавка» в режим «вольтоотбавка» производится в обратной последовательности.

Диаграммы изменения напряжения ( $u_H$ ) и тока ( $i_H$ ) нагрузки при поочередном изменении углов переключения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  показаны на рисунке 2.

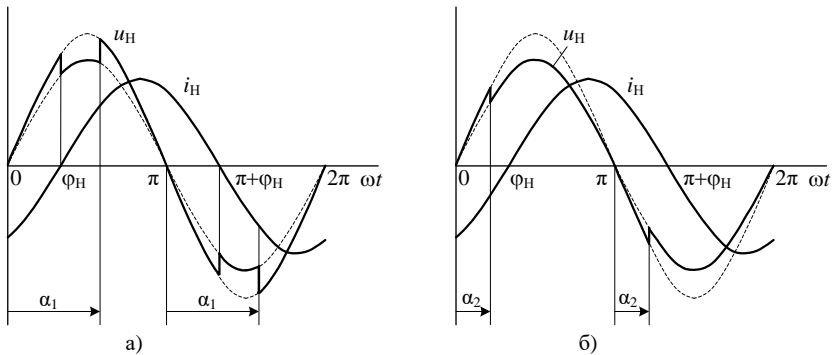


Рис. 2. Напряжение ( $u_H$ ) и ток ( $i_H$ ) нагрузки в интервалах: эффективного изменения угла переключения  $\alpha_1$  на повышение напряжения (а); эффективного изменения угла переключения  $\alpha_2$  на понижение напряжения (б).

Моменты коммутации тиристоров не всегда определяются значениями углов переключения, поскольку они также зависят от фазового угла нагрузки ( $\varphi_H$ ). Совпадение значений моментов переключения тиристоров на повышение напряжения с углом  $\alpha_1$  имеет место только в интервалах положительного направления мощности ( $\varphi_H \leq \alpha_1 < \pi$ ). Моменты переключения тиристоров на понижение напряжения в данном режиме совпадают с моментом перехода тока нагрузки через ноль, т.е. определяются фазовым углом нагрузки  $\varphi_H$ . Следовательно эффективное изменение угла  $\alpha_1$  в целях регулирования напряжения нагрузки находится в интервале  $\varphi_H \leq \alpha_1 < \pi$

(рис. 2, а). Совпадение значений моментов переключения тиристоров на понижение напряжения с углом  $\alpha_2$  имеет место только в интервалах отрицательного направления мощности ( $0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_H$ ). Моменты переключения тиристоров на повышение напряжения в данных режимах соответствуют значению угла  $\alpha_1 = \pi$ . Поэтому эффективное изменение угла  $\alpha_2$  в целях регулирования напряжения нагрузки находится в интервале  $0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_H$  (рис. 2, б).

Из представленных на рис. 2 диаграмм следует, что напряжение нагрузки описывается на различных интервалах синусоидальными функциями. Степень искажения выходного напряжения ТТРН можно определить, разложив в ряд Фурье кривую напряжения нагрузки. Поскольку степень искажения напряжения пропорциональна величине ступени регулирования, целесообразно анализ энергетических показателей выполнить для перевода из режима «закоротка» в режим «вольтодобавка». В данном режиме ТТРН имеет наибольший диапазон регулирования, зависящий в основном от величины коэффициента трансформации ВДТ –  $K_2 = e_{CT} / e_{CO}$  [10, 11].

В целях получения обобщенных результатов, не зависящих от уровня напряжения сети, анализ выполним в относительных единицах. В качестве базисной величины примем номинальное действующее значение напряжения сети ( $U_B = U_{H,НОМ}$ ). Относительные значения напряжений будем обозначать в дальнейшем символами со звездочкой, например  $U_H^*$ . При номинальном напряжении сети ВДТ включается в режим «закоротка». Следовательно, все напряжения ТТРН имеют синусоидальную форму. Поэтому в режиме «закоротка» относительные значения действующего и амплитудного значений напряжения нагрузки равны соответственно:  $U^* = 1$ ,  $U_{Hm}^* = \sqrt{2}$ . В режиме «вольтодобавка» напряжение нагрузки также синусоидально и больше напряжения сети на ЭДС вторичной обмотки ВДТ. Поэтому его действующее и амплитудное значения в относительных величинах равны соответственно:

$$U^* = 1 + K_2, U_{Hm}^* = \sqrt{2} \cdot (1 + K_2). \quad (1)$$

Мгновенные значения напряжения нагрузки в относительных единицах для перехода ВДТ из режима «закоротка» в режим «вольтодобавка»:

– в интервале эффективного изменения  $\alpha_2$  ( $\alpha_1 = \pi$ ):

$$u_{H}^* = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sin \omega t & \alpha_2 \leq \omega t \leq \pi; \\ \sqrt{2} \cdot (1 + K_2) \cdot \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha_2, \end{cases} \quad (2)$$

– в интервале эффективного изменения  $\alpha_1$  ( $\alpha_2 = \varphi_H$ ):

$$u_H^* = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \sin \omega t & \varphi_H \leq \omega t \leq \alpha_1; \\ \sqrt{2} \cdot (1 + K_2) \cdot \sin \omega t & \alpha_1 \leq \omega t \leq \pi + \varphi_H, \end{cases} \quad (3)$$

Напряжение нагрузки симметрично относительно оси абсцисс. Следовательно, оно не содержит постоянной составляющей и четных гармоник. В таком случае кривая выходного напряжения ТТРН описывается выражением:

$$u_H^* = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (a_n^* \cdot \cos(n \cdot \omega t) + b_n^* \cdot \sin(n \cdot \omega t)), \quad (4)$$

где  $n$  – номер гармонической составляющей.

Определим с помощью интеграла Фурье амплитудные значения косинусной  $a_n^*$  и синусной  $b_n^*$  составляющих каждой гармоники:

в интервале эффективного регулирования  $\alpha_2$ :

$$a_n^* = \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \cdot \left[ \frac{\cos(n-1)\alpha_2}{n-1} - \frac{\cos(n+1)\alpha_2}{n+1} - \frac{2}{n^2-1} \right];$$

$$b_n^* = \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \left[ \frac{\sin(n-1)\alpha_2}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\alpha_2}{n+1} \right]. \quad (5)$$

в интервале эффективного регулирования  $\alpha_1$ :

$$a_n^* = \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \cdot \left[ \frac{\cos(n+1)\alpha_1}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha_1}{n-1} - \frac{\cos(n+1)\varphi_H}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\varphi_H}{n-1} \right];$$

$$b_n^* = \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \cdot \left[ \frac{\sin(n-1)\varphi_H}{n-1} - \frac{\sin(n+1)\varphi_H}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha_1}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha_1}{n+1} \right]. \quad (6)$$

Амплитудные значения  $c_n^*$  и начальные фазы  $\theta_n$  гармонических составляющих напряжения нагрузки определяются через составляющие  $a_n^*$  и  $b_n^*$  по выражениям:

$$c_n^* = \sqrt{(a_n^*)^2 + (b_n^*)^2}; \quad \theta_n = \operatorname{arctg} \frac{b_n^*}{a_n^*}. \quad (7)$$

Выражения (5), (6) справедливы при нечетном номере  $n$ , не равном 1. Учитывая периодичность кривой  $i_n^*$ , найдем для нее коэффициенты  $a_1^*$ ,  $b_1^*$ , необходимые для расчета первой гармоники напряжения нагрузки в рассматриваемых режимах ТТРН:

– в интервале эффективного регулирования  $\alpha_2$ :

$$\begin{aligned} a_1^* &= \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \cdot \sin^2 \alpha_2; \\ b_1^* &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left( \pi + K_2 \cdot \alpha_2 - K_2 \cdot \frac{\sin 2\alpha_2}{2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

– в интервале эффективного регулирования  $\alpha_1$ :

$$\begin{aligned} a_1^* &= \frac{\sqrt{2}K_2}{\pi} \cdot (\sin^2 \varphi_H - \sin^2 \alpha_1); \\ b_1^* &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left[ \pi(1 + K_2) - K_2 \left( \alpha_1 - \varphi_H - \frac{\sin 2\alpha_1}{2} + \frac{\sin 2\varphi_H}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Амплитудные значения  $c_1^*$  и начальные фазы  $\theta_1$  первой гармонической составляющей напряжения нагрузки определяются по выражениям (7).

#### IV. Результаты исследования

Ограничиваются значения коэффициентов гармонических составляющих  $K_{U(n)}$  в точках передачи электрической энергии в соответствии с ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [9]. Для сетей напряжением 0,4 кВ их предельно допустимые значения следующие:  $K_{U(5)} = 6\% \cdot U_1$ ,  $K_{U(7)} = 5\% \cdot U_1$ ,  $K_{U(3)} = 5\% \cdot U_1$ . Расчеты, выполненные по выражениям (5)-(7) показали, что наибольший вес из высших гармонических составляющих имеет напряжение утроенной частоты. Амплитудные значения других гармонических составляющих снижаются пропорционально номеру гармоники. Максимальное амплитудное значение напряжения утроенной частоты имеет место при значениях  $\varphi_H = 60^\circ$  и  $\alpha_1 = 120^\circ$ . При таких условиях амплитудное значение напряжения утроенной частоты составляет 57% от величины коэффициента трансформации ВДТ. Таким образом, гармонический состав кривой напряжения нагрузки в основном определяется коэффициентом трансформации ВДТ. Рекомендуется величину коэффициента трансформации ВДТ выбирать из условия ограничения значений коэффициентов гармоник на допустимом для потребителя уровне. Графические зависимости, показывающие изменение амплитудных значений третьей, пятой и

седьмой гармоник при рекомендуемом значении  $K_2 = 0,1$  и значении фазового угла нагрузки  $60^\circ$  в процессе регулирования выходного напряжения показаны на рисунке 3. На представленных зависимостях совмещены интервалы эффективного изменения углов переключения  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$ .

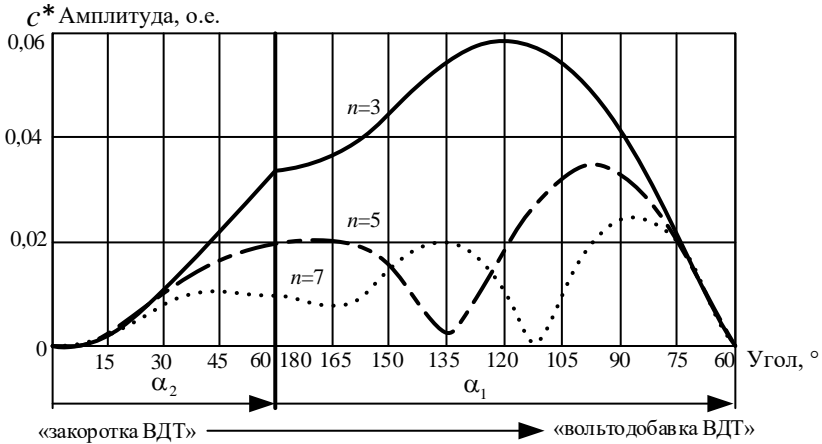


Рис. 3. Амплитудные значения высших гармоник в напряжении нагрузки ( $K_2 = 0,1$  и  $\varphi_n = 60^\circ$ )

Зависимость амплитудного значения первой гармонической составляющей в процессе регулирования напряжения нагрузки при  $\varphi_n = 60^\circ$  и рекомендуемом значении коэффициента трансформации  $K_2 = 0,1$  приведена на рисунке 4. Из представленной зависимости следует, что при поочередном двухзонном управлении реализуется плавный перевод ВДТ из режима «закоротка» в режим «вольтдобавка» и обратно. Аналогичным образом реализуется плавный перевод ВДТ из режима «закоротка» в режим «вольтдобавка».

Из сопоставления графических зависимостей (рис. 3 и рис. 4) следует, что при рекомендуемом значении коэффициента трансформации ВДТ ( $K_2 = 0,1$ ) коэффициенты третьей, пятой и седьмой гармонических составляющих не превышают следующих значений:  $K_{U(3)} = 4,1\% \cdot U_1$ ;  $K_{U(5)} = 2,3\% \cdot U_1$ ;  $K_{U(7)} = 1,37\% \cdot U_1$ . Эти значения соответствуют требованиям, предъявляемым нормативными документами к качеству электроэнергии.



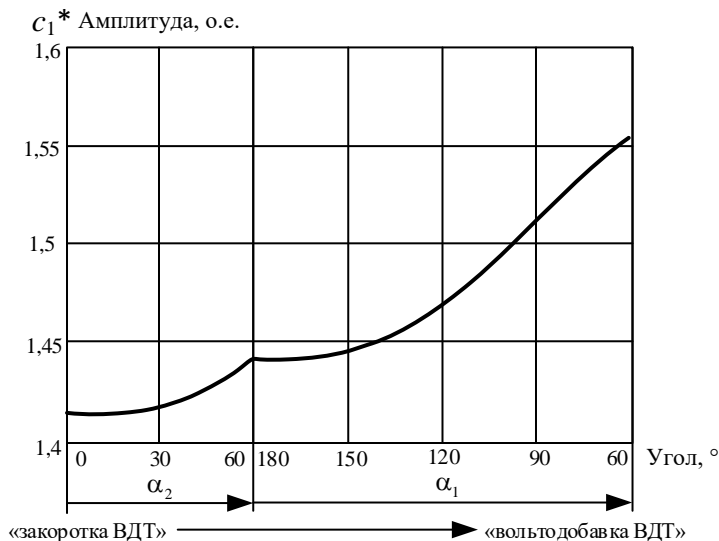


Рис. 4. Амплитудное значение первой гармоники в напряжении нагрузки ( $K_2 = 0,1$  и  $\varphi_n = 60^\circ$ )

### В. Заключение

В результате исследований показано, что при поочередном двухзонном управлении ТТРН обеспечивается плавный перевод ВДТ из режима «вольтотдобавка» в режимы «закоротка» и «вольтодобавка». Поэтому данный способ регулирования рекомендуется для применения в стабилизаторах переменного напряжения.

Установлено, что гармонический состав кривой напряжения нагрузки в основном определяется коэффициентом трансформации вольтдобавочного трансформатора  $K_2$ . Наибольший вес из высших гармонических составляющих имеет напряжение утроенной частоты. Его амплитудное значение достигает при поочередном двухзонном регулировании  $0,57 \cdot K_2$ . Рекомендуется его величину выбирать в интервале  $K_2 < 0,1$  из условия ограничения значений коэффициентов гармонических составляющих на допустимом для потребителя уровне.

## Библиографический список

- [1] Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения, Пат. 2621062 РФ, заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017. – Бюл. № 16.
- [2] Соснина Е.Н., Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш. Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6-20 кВ // Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Пром-инжиниринг», Челябинск, Россия. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2016. С. 322-327.
- [3] Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. Универсальное фазоповоротное устройство для сетей среднего и высокого напряжения, Пат. 180964 РФ, заявл. 01.12.2017; опубл. 02.07.2018. – Бюл. № 19.
- [4] Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer, General Electric Co. Пат. 3621374 США, Kestler Clarence J. 1971.
- [5] Петров Ю.Н. Двухзонные трансформаторно-тиристорные стабилизаторы напряжения для электроустановок с активно – индуктивным сопротивлением: дис. канд. техн. наук, Горький, 1975. – 239 с.
- [6] Алтунин Б.Ю., Асабин А.А., Зубов Л.А., Соловьев Л.А., Шлентов В.С. Способ управления регулятором напряжения и устройство для его осуществления, Пат. 1003294 СССР; опубл. 1983. – Бюл. № 9.
- [7] Асабин А.А. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора, Пат. 2398342 РФ, заявл. 23.06.2009; опубл. 27.08.2010. – Бюл. № 24.
- [8] Асабин А.А., Белянин И.В., Лоскутов А.Б., Чивенков А.И. Технологическая система управления трансформаторно-тиристорным регулятором напряжения и мощности // Материалы XII ежегодной конференции компании National Instruments, Москва, Россия. 2013. С. 101-106.
- [9] ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [10] Асабин А.А., Верховский С.Я. Регулировочные характеристики тиристорного регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным трансформатором при поочередном двухзонном управлении // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 189-196.
- [11] Асабин А.А., Журин К.А. Энергетические характеристики плавноступенчатого трансформаторно-тиристорного стабилизатора переменного напряжения с поочередным двухзонным регулированием // Тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции, НГТУ им. Р.Е. Алексеева «Будущее технической науки», Н. Новгород, Россия, 2007. С. 1-7.

**A.A. Asabin, A.A. Kralin**

## **ENERGY INDICATORS OF THYRISTOR AC VOLTAGE REGULATOR WITH BOOSTER TRANSFORMER UNDER ALTERNATE TWO-ZONE CONTROL**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** A modern solution to the problem of high – quality power supply to responsible consumers is associated with the development of devices based on semiconductor elements, which allow a control of voltage parameters. The major trends in the implementation of a transformer – thyristor regulators with pulse – phase control for 0.4 kV alternative current (AC) networks was considered in this article. The application of alternate two-zone control of the transformer–thyristor regulator of AC voltage synchronized with the moments of transition of mains voltage through zero value was offered. This method allows one to implement an automatic system of smooth regulation and stabilization of the load voltage with a deep change in the magnitude of the load current at intervals of positive and negative directions of power flow. The presence of higher harmonic components in the output voltage is a peculiarity of regulators with a pulse phase control. Analytical expressions in the system of relative units are received that allow one to calculate the amplitude values of the first and highest harmonic components of the voltage for an alternate two – zone control. Studies have been performed on the basis of the obtained expressions which have made it possible to determine the factors that influence the content of higher harmonic components. The transformation ratio of booster transformer was offered to choose from the condition limiting the values of the harmonic components at the acceptable level for the consumer.

**Keywords:** two-zone control, pulse-phase control, harmonic component ratio, power flow direction, regulator, transformer, thyristor.

### **References**

- [1] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov. Thyristor phase shifter with booster transformer for medium voltage network // Patent 2621062, Jul. 6, 2016.
- [2] E.N. Sosnina, A.A. Asabin and R.Sh. Bedretdinov. Investigation of a solid-state voltage and power regulator in a 6-20 kV network // in proc. Proceedings of the 2nd International Scientific-Technical Conference «Industrial Engineering». Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2016, Russia, pp. 322-327.
- [3] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov. Universal phase shifter for medium and high voltage networks // Patent 180964, Dec. 1, 2017.
- [4] Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer, General Electric Co // Patent 3621374, USA, Kestler Clarence J. 1971

- [5] Yu.N Petrov. Two-zone transformer-thyristor voltage stabilizers for electrical installations with active-inductive resistance // Cand. of Tech. S. thesis, Gorky, Russia. 1975.
- [6] B.Yu. Altunin, A.A. Asabin, L.A. Zubov, L.A., Soloviev and V.S. Shlentov. The method of controlling the voltage regulator and device for its implementation // A. S. Patent 1003294, USSR, 1983.
- [7] A.A. Asabin. The control method of the thyristor voltage regulator of the transformer // Patent 2398342, June 23, 2009.
- [8] A.A. Asabin, I.V. Belyanin, A.B. Loskutov and A.I. Chivenkov. Technological control system of transformer – thyristor voltage and power regulator // in proc. Materials XII annual conference of the company National Instruments, Moscow, p. 101-106, 2013.
- [9] Voltage Characteristics of Energy Supplied by Public Electricity Networks, EN 50160-2010 ed.3.0, July 2010.
- [10] A.A. Asabin and S.Ya. Verkhovsky. Regulation characteristics in the two-zone control of the thyristor ac voltage regulator with booster transformer // Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, vol. 2, pp.189-196, 2013.
- [11] A.A. Asabin and K.A. Zhurin. Energy characteristics of a smooth-step transformer-thyristor AC voltage regulator with alternate two-zone regulation // in proc. Abstracts of the VI International Youth Scientific and Technical Conference «The future of technical science», N. Novgorod, Russia, pp. 1-7, 2007.