

УДК 621.316.722

А.А. Асабин¹, С.Я. Верховский²**РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПРИ ПООЧЕРЕДНОМ ДВУХЗОННОМ УПРАВЛЕНИИ**Институт прикладной физики Российской академии наук¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Описан способ 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. Получены теоретические и экспериментальные выходные характеристики регулятора в различных рабочих режимах.

Ключевые слова: алгоритм управления, направление потока мощности, однозонное управление, интервал коммутации, стабилизация выходного напряжения.

Известные алгоритмы управления трансформаторно-тиристорных регуляторов переменного напряжения (ТТРН) при импульсно-фазовом методе регулирования подразделяются на две группы:

1. Алгоритмы, основанные на выделении знака потока мощности.
2. Алгоритмы, основанные на синхронизации моментами перехода напряжения сети через нулевое значение.

Алгоритмы, основанные на выделении знака мощности, строятся следующим образом [1]. 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 рекуперирована из нагрузки в сеть. Данные интервалы принято называть интервалами отрицательного направления мощности. В интервалах положительного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования α_1 , выполняют переключение на повышение напряжения. В интервалах отрицательного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования α_2 , выполняют переключение на понижение напряжения. Изменяя значения углов α_1 и α_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 [2]. Он не обеспечивает устойчивой 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.

Известные алгоритмы [3], основанные на синхронизации моментами перехода напряжения сети через нулевые значения, предназначены в основном для регулирования напряжения в интервалах положительного направления мощности. В этом случае угол регулирования определяет только момент переключения на уровень повышенного напряжения. Переключения на понижение напряжения фиксированы и либо совпадают с моментом перехода напряжения сети через нулевое значение, либо происходят в момент смены знака тока нагрузки. Такое однозонное регулирование при смешанной нагрузке (активно-индуктивной или активно-емкостной) сопровождается появлением нерегулируемых интервалов в выходном напряжении регулятора. Длительность нерегулируемых интервалов совпадает с интервалами от-

рицательного направления мощности. Это приводит к ограничениям регулировочной характеристики и может стать причиной возникновения колебательных процессов в системе автоматической стабилизации выходного напряжения, поэтому рассматриваемые алгоритмы распространены в ТТРН, предназначенных для работы на выпрямительную нагрузку или нагрузку с высоким значением коэффициента мощности (активную).

На кафедре «Промышленная электроника» НГТУ разработан способ двухзонного поочередного управления ТТРН с синхронизацией моментами перехода напряжения сети через нулевое значение [4]. Данный способ не требует применения датчика тока, поэтому регулировочные свойства ТТРН сохраняются при глубоком изменении величины тока нагрузки. Он обеспечивает двухзонное регулирование, реализуемое в интервалах положительного и отрицательного направления мощности.

Следовательно, ограничения регулировочной характеристики отсутствуют и устраняются причины возникновения колебательных процессов в системе автоматической стабилизации напряжения нагрузки. Теоретические и экспериментальные исследования ТТРН с двухзонным поочередным управлением выполнялись при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6016 от 11.10.11 г.).

Схема исполнительного органа ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора $TV1$ приведена на рис. 1. Применяемый способ обеспечивает двухзонное поочередное регулирование выходного напряжения в интервалах положительного и отрицательного направления мощности. При этом используются три основных режима работы вольтодобавочного трансформатора (ВДТ): "вольтоотбавка" – включены тиристоры $V3, V4$ и $V5, V6$; "закоротка" – включены тиристоры $V1, V2$ и $V5, V6$; "вольтодобавка" – включены тиристоры $V1, V2$ и $V7, V8$. В режиме "вольтоотбавка" ВДТ включается по схеме понижающего автотрансформатора и напряжение нагрузки (u_H) ниже напряжения сети (u_C) на величину э.д.с. регулировочной ступени $u_H = u_C - e_{CT}$. В режиме "закоротка" ВДТ находится в режиме короткого замыкания (к.з.) и включен последовательно с нагрузкой (Z_H). В этом случае практически все напряжение сети приложено к сопротивлению нагрузки $u_H = u_C$, поскольку сопротивление к.з. трансформатора мало. В режиме "вольтодобавка" ВДТ включается по схеме повышающего автотрансформатора и напряжение нагрузки больше напряжения сети на величину э.д.с. регулировочной ступени $u_H = u_C + e_{CT}$.

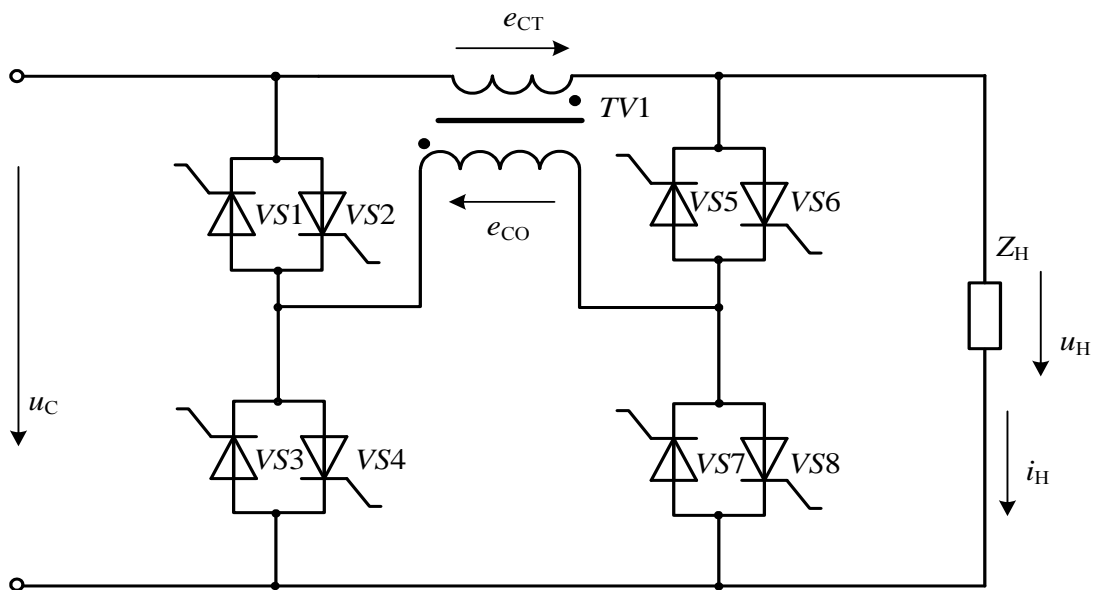


Рис. 1. ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора

Переход из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка", согласно предложенному в [4] способу, начинается с увеличения угла регулирования на понижение напряжения α_2 от 0

до π при фиксированном значении угла регулирования на повышение напряжения $\alpha_1 = \pi$. Такое изменение α_2 позволяет реализовать регулирование выходного напряжения в интервалах отрицательного направления мощности. Далее реализуется регулирование в интервалах положительного направления мощности путем уменьшения значения угла регулирования α_1 от π до 0 при фиксированном значении $\alpha_2 = \pi$. Такое же поочередное двухзонное регулирование применяется и для плавного перехода из режима "закорotka" 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 регулирования α_1 и α_2 показаны на рис. 2. Моменты переключения тиристоров не всегда определяются значениями углов регулирования, поскольку они также зависят от фазового угла нагрузки (φ_H). Совпадение значений моментов переключения тиристоров на повышение напряжения с углом регулирования α_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 φ_H .

Следовательно эффективное изменение угла α_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 регулирования α_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 заданному значению угла $\alpha_1 = \pi$. Поэтому эффективное изменение угла α_2 в целях регулирования напряжения нагрузки находится в интервале $0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_H$ (рис. 2, б).

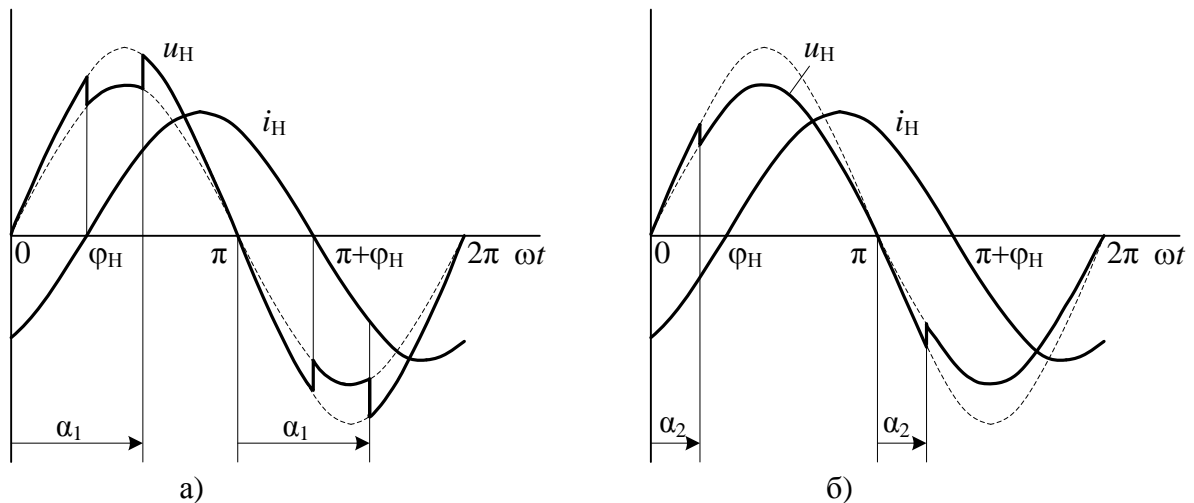


Рис. 2. Напряжение (u_H) и ток (i_H) нагрузки в интервалах:

а – эффективного изменения угла регулирования α_1 на повышение напряжения;

б – эффективного изменения угла регулирования α_2 на понижение напряжения

Анализ 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.

В процессе регулирования изменяется гармонический состав напряжения и тока нагрузки. Это может сместить момент перехода тока нагрузки через ноль относительно значения фазового угла нагрузки на дополнительный угол $\Delta\beta$. Данное обстоятельство может привести к смещению интервалов эффективного регулирования выходного напряжения ТТРН изменением углов α_1 и α_2 . Как показали результаты исследований, при рекомендуемом

в [5] значении коэффициента трансформации вольтодобавочного трансформатора $K_2=e_{CT}/e_{CO}=0.1$ во всем диапазоне регулирования дополнительный угол $\Delta\beta \leq 3^0$. Ввиду малости значений дополнительного угла $\Delta\beta$ в дальнейшем считаем, что моменты перехода тока нагрузки через ноль и интервалы эффективного регулирования определяются лишь фазовым углом нагрузки φ_H .

Регулировочные характеристики удобно выражать в относительных единицах. В качестве базисной величины примем номинальное действующее значение напряжения сети ($U_B=U_{H,НОМ}$). Относительные значения действующих и средних величин напряжений будем обозначать в дальнейшем символами со звездочкой, например U_H^* . В режиме "закоротка" все токи и напряжения ТТРН имеют синусоидальный характер, поэтому относительные значения действующих, амплитудных и средних величин напряжений нагрузки в этом режиме равны соответственно:

$$U_H^*=1, \quad U_{Hm}^*=\sqrt{2}, \quad U_{H,CP}^*=2\sqrt{2}/\pi. \quad (1)$$

Мгновенные значения напряжения нагрузки в относительных единицах, согласно рис. 1 и рис. 2, для перехода ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка" можно записать в следующем виде:

- в интервале эффективного изменения α_2 ($\alpha_1=\pi$)

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

- в интервале эффективного изменения α_1 ($\alpha_2=\varphi_H$)

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

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

- в интервале эффективного изменения α_2' ($\alpha_1'=\pi$)

$$u_H^* = \begin{cases} \sqrt{2} \sin \omega t & \alpha_2' \leq \omega t \leq \pi \\ \sqrt{2}(1+K_2) \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha_2'; \end{cases} \quad (4)$$

- в интервале эффективного изменения α_1' ($\alpha_2'=\varphi_H$)

$$u_H^* = \begin{cases} \sqrt{2} \sin \omega t & \varphi_H \leq \omega t \leq \alpha_1' \\ \sqrt{2}(1+K_2) \sin \omega t & \alpha_1' \leq \omega t \leq \pi + \varphi_H. \end{cases} \quad (5)$$

Так как кривые напряжений симметричны относительно оси абсцисс, действующие значения напряжения нагрузки определяем, используя выражение

$$U_H^* = \sqrt{\frac{T}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} (u_H^*)^2 dt}.$$

Для перехода ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка" получим:

- в интервале эффективного изменения α_2

$$U_H^* = \sqrt{\frac{2\pi + (2K_2 + K_2^2)(2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2)}{2\pi(1+K_2)^2}}; \quad (6)$$

- в интервале эффективного изменения α_1

$$U_{H*} = \sqrt{1 - \frac{(2K_2 + K_2^2)[\alpha_1 - \varphi_H - \sin(\alpha_1 - \varphi_H)\cos(\alpha_1 + \varphi_H)]}{\pi(1 + K_2)^2}}. \quad (7)$$

Для перехода ВДТ из режима "закоротка" в режим "вольтдобавка":

- в интервале эффективного изменения α'_2

$$U_{H*} = \sqrt{1 + \frac{(2K_2 + K_2^2)(2\alpha'_2 - \sin 2\alpha'_2)}{2\pi}}; \quad (8)$$

- в интервале эффективного изменения α'_1

$$U_{H*} = \sqrt{(1 + K_2)^2 - \frac{(2K_2 + K_2^2)[\alpha'_1 - \varphi_H - \sin(\alpha'_1 - \varphi_H)\cos(\alpha'_1 + \varphi_H)]}{\pi}}. \quad (9)$$

Среднее относительное значение выходного напряжения определяется так же интегрированием выражений (2)–(5) для напряжения нагрузки u_H^* на интервале, равном полупериоду напряжения сети.

Для перехода ВДТ из режима "вольтотбавка" в режим "закоротка" получим:

- в интервале эффективного изменения α_2

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[2 - \frac{K_2}{1 + K_2} (\cos \alpha_2 + 1) \right]; \quad (10)$$

- в интервале эффективного изменения α_1

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[2 - \frac{K_2}{1 + K_2} (\cos \varphi_H - \cos \alpha_1) \right]. \quad (11)$$

Для перехода ВДТ из режима "закоротка" в режим "вольтдобавка":

- в интервале эффективного изменения α'_2

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} [2 + K_2(1 - \cos \alpha'_2)]; \quad (12)$$

- в интервале эффективного изменения α'_1

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} [2 + K_2(2 - \cos \varphi_H + \cos \alpha'_1)]. \quad (13)$$

Анализируя полученные выражения (6)–(13), можно заметить, что при поочередном двухзонном управлении величины действующего и среднего значений выходного напряжения ТТРН зависят от фазового угла нагрузки φ_H , значений углов переключения на понижение α_2 и повышение α_1 напряжения, а также от величины коэффициента трансформации K_2 вольтдобавочного трансформатора.

Регулировочные характеристики, рассчитанные по аналитическим выражениям (6)–(13) при переводе ВДТ с рекомендуемым коэффициентом трансформации $K_2=0.1$ из режима "вольтотбавка" в режим "вольтдобавка" и значении фазового угла нагрузки $\varphi_H=90^\circ$, приведены на рис. 3. На регулировочных характеристиках совмещены интервалы эффективного изменения углов α_2 , α_1 , α'_2 , α'_1 . На рис. 3 штриховой линией показана регулировочная характеристика при однозонном регулировании. Из анализа характеристик видно, что при поочередном двухзонном управлении существует плавный переход напряжений из режима "вольтотбавка – закоротка" ВДТ в режим "закоротка - вольтдобавка", а при однозонном регулировании – скачкообразный.

В связи с этим, диапазон стабилизации при однозонном регулировании сокращается. Анализ регулировочных характеристик также показывает, что из-за наличия скачкообразного перехода с режима "вольтотбавка - закоротка ВДТ" на режим "закоротка ВДТ - вольтдобавка" при однозонном регулировании практически невозможна стабилизация выходного напряжения. Стабилизацию напряжения при однозонном регулировании можно осуществлять только при работе ТТРН отдельно в каждом из рассматриваемых режимов или при ча-

стичном совмещении этих режимов. В этих случаях искажение кривой выходного напряжения значительно выше, чем при двухзонном управлении.

Аналитические исследования подтверждены результатами моделирования ТТРН в пакете Matlab-simulink и экспериментальными испытаниями макета ТТРН мощностью 3,5 кВА. Экспериментальная зависимость действующего значения напряжения нагрузки, совмещенная в одной системе координат с рассчитанной по аналитическим выражениям и полученной на виртуальной модели ТТРН, приведена на рис. 4.

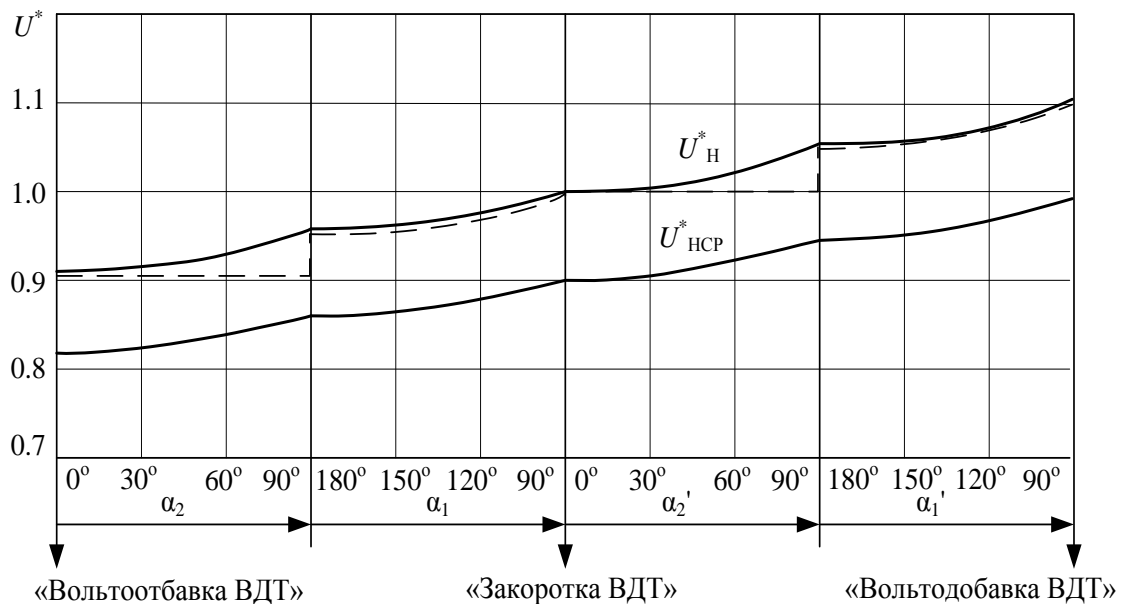


Рис. 3. Регулировочные характеристики при переводе ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "вольтодобавка" ($K_2=0.1$, $\varphi_n=90^\circ$)

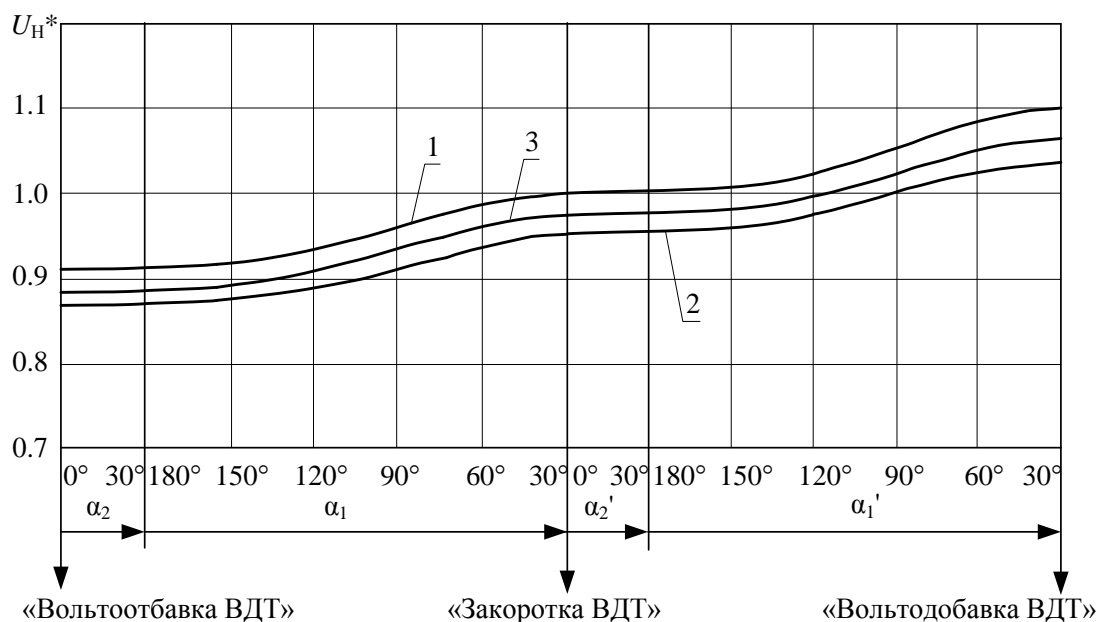


Рис. 4. Зависимость действующего значения напряжения нагрузки при переводе ВДТ из режима «вольтоотбавка» в режим «вольтодобавка» ($K_t=0.1$, $\varphi_n=30^\circ$)

Сопоставление экспериментальной зависимости действующего значения напряжения нагрузки (3) с рассчитанной по аналитическим выражениям (1) и полученной на виртуальной модели (2) позволяет сделать следующие выводы.

1. Форма и характер экспериментальной зависимости совпадает с формой и характером зависимостей, построенной по аналитическим выражениям и полученной на виртуальной модели.

2. Экспериментальная и уточненная зависимость, полученная на виртуальной модели, располагаются ниже, чем зависимость, рассчитанная методом припасовывания. Это объясняется учётом падений напряжений в линии питающей сети и на силовых элементах виртуальной модели ТТРН, а также учётом коммутационных интервалов, в течение которых напряжение нагрузки практически равно нулю.

3. Неполное совпадение экспериментальной и уточненной зависимостей объясняется тем, что при моделировании питающей сети принято максимально допустимое значение сопротивления короткого замыкания линии питающей сети. Это обусловило завышенные значения падений напряжения в линии питающей сети при моделировании, не соответствующие условиям эксперимента.

4. Наибольшее отклонение зависимости действующего значения напряжения нагрузки, рассчитанной по полученным аналитическим выражениям, от экспериментальной зависимости составляет 3%.

Библиографический список

1. Пат. 3621374 (США), МКИ G 05 F 1/30. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer/ General Electric Co.// Kestler Clarence J. 1971.
2. **Петров, Ю.Н.** Двухзонные трансформаторно-тиристорные стабилизаторы напряжения для электроустановок с активно-индуктивным сопротивлением: дисс. ...канд. техн. наук. – Горький, 1975. – 239 С..
3. А.с. 1003294 СССР, МКИ G 05 F 1/24. Способ управления регулятором напряжения и устройство для его осуществления/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Асабин, Л.А. Зубов, Л.А., Соловьев, В.С. Шлентов// Оpubл. в Б. И., 1983. №9.
4. Пат. на изобретение RU №2398342 С1, МПК H02M5/12. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора/ Асабин А.А.; Оpubл. 27.08.2010.
5. **Асабин, А.А.** Энергетические характеристики плавноступенчатого трансформаторно-тиристорного стабилизатора переменного напряжения с поочередным двухзонным регулированием / А.А. Асабин, К.А. Журинов // Тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

A.A. Asabin¹, S.Y. Verkhovskiy²

REGULATION CHARACTERISTICS IN THE TWO-ZONE CONTROL OF THE THYRISTOR AC VOLTAGE REGULATOR WITH BOOSTER TRANSFORMER

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Purpose: Research and comparative analysis of the output characteristics of the thyristor AC voltage regulators in the two-zone control.

Design/methodology/approach: Implementation of a two-zone control alternating control algorithm for thyristor AC with transformer allows to create an automated system continuously stabilize the load voltage for deep change in the value of the load current at intervals of positive and negative direction of power flow.

Findings: The shape and character of the experimental output voltage dependence regulator coincide with the form and character of the relationships obtained by analytical expressions and the virtual model.

Research limitations/implications: Research limitations – electric power industry. Control algorithm is proposed and analyzed for the thyristor AC voltage regulator.

Originality/value: As a result, research has shown the effectiveness of the proposed method of alternating two-zone control thyristor AC regulator of power line voltage.

Key words: control algorithm, power flow direction, one-zone control, switching interval, output voltage stabilization.