

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1978.3.11>

УДК 621.314.2.072.2.001.5

Майре ОЯВЕЭР, В. САРВ

## ПРОЦЕССЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ТИРИСТОРНО-ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ НЕПРЕРЫВНОГО АМПЛИТУДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОММУТАЦИИ

На базе тиристорных схем с фазовым управлением в [1] предложены цепи амплитудного регулирования переменного напряжения, а в [2] — переменного тока, форма которого близка к прямоугольной. Режим работы этих цепей основывается на подавлении четных гармоник в токе тиристора путем включения в контур замыкания постоянной и четных переменных составляющих тока тиристора сглаживающего дросселя с относительно большой постоянной индуктивностью [3].

В целях получения многоступенчатой формы тока, близкой к синусоидальной, в Институте термофизики и электрофизики АН ЭССР разработан новый способ, основанный на управлении индуктивным накопителем энергии посредством ритмичного переключения числа витков сглаживающего дросселя. В [4] были проанализированы процессы преобразования энергии в соответствующей новой схеме в условиях принудительной коммутации, т. е. в условиях, когда коммутационные функции всех ключей заданы.

В настоящей статье рассматривается режим естественной коммутации. Знание закономерностей преобразовательных процессов в данном случае позволит расширить область практического применения этого способа, эффективно улучшающего спектральный состав регулируемого переменного тока и напряжения.

Основные схемы тиристорно-индуктивных цепей непрерывного амплитудного регулирования переменного напряжения (рис. 1, а, б, в) дают возможность формировать близкий к синусоидальному ток нагрузки и могут работать как в режиме принудительной, так и в режиме естественной коммутации. В первом случае ключи должны быть полностью управляемы, а это требует применения транзисторов, запираемых тиристором или же дополнительных элементов коммутации для запираания тиристором. Во втором случае реализовать работу схем технически легче. Однако электромагнитные процессы в силовой цепи при естественной коммутации существенно усложняются, так как при этом задаются лишь моменты отпирания тиристором.

С точки зрения обмена энергии между источником питания, нагрузкой и индуктивным накопителем энергии схемы на рис. 1, а, б, в одинаковы. Различаются они только техническими приемами изменения участвующих в работе числа витков  $\omega(t)$  дросселя  $L$ .



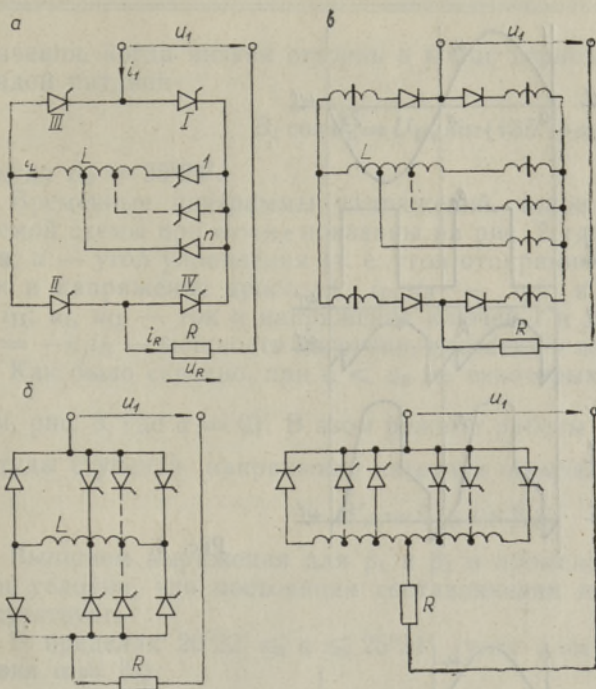


Рис. 1.

В условиях естественной коммутации тиристорные ключи могут быть заменены магнитными. В качестве примера на рис. 1, в изображена силовая схема магнитного варианта непрерывного амплитудного регулятора переменного напряжения, преобразовательные процессы в которой эквивалентны процессам в тиристорно-индуктивной схеме на рис. 1, а.

Работа всех изображенных на рис. 1 схем заключается в ритмичном изменении числа

витков  $\omega(t)$  дросселя  $L$  в каждом полупериоде переменного тока. Поэтому ограничимся рассмотрением преобразовательных процессов в одной из них. Проанализируем схему на рис. 1, а. Здесь функции управления величиной тока выполняют тиристоры I, II, III и IV путем изменения угла управления  $\alpha$ , а функции управления формой тока — тиристоры 1, 2...n. Использование различных тиристоров для выполнения названных функций позволяет лучше понять сущность электромагнитных процессов.

Предположим, что схема 1, а работает при синусоидальном напряжении питания  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ , активной нагрузке  $R$ , бесконечной индуктивности дросселя  $L$ , идеальных тиристорных ключах и двухступенчатой форме тока, т. е. при  $n = 2$ . Кроме того, ширины и относительные амплитуды ступеней выберем из условия подавления самых низких из высших гармоник [5]. При равной ширине ступеней в каждой четверти периода углы отпирания тиристоров 1 и 2 будут равны соответственно

$$\theta_1 \in \left\{ \alpha - \frac{\pi}{4} + l\pi \mid l=0, 1, 2, \dots \right\},$$

$$\theta_2 \in \left\{ \alpha + \frac{\pi}{4} + l\pi \mid l=0, 1, 2, \dots \right\}.$$

Отметим, что при уменьшении угла управления  $\alpha$  от  $\pi/2$  до некоторого предельного значения  $\alpha_n$  преобразовательные процессы в режиме естественной коммутации протекают так же, как и в режиме принудительной [4]. Различие начинается с  $\alpha < \alpha_n$ , когда в течение отдельных этапов работы напряжение на дросселе равняется нулю, в результате чего  $u_R = u_1$ . Поэтому при анализе работы схемы в режиме естественной коммутации необходимо знать предельное значение угла управ-

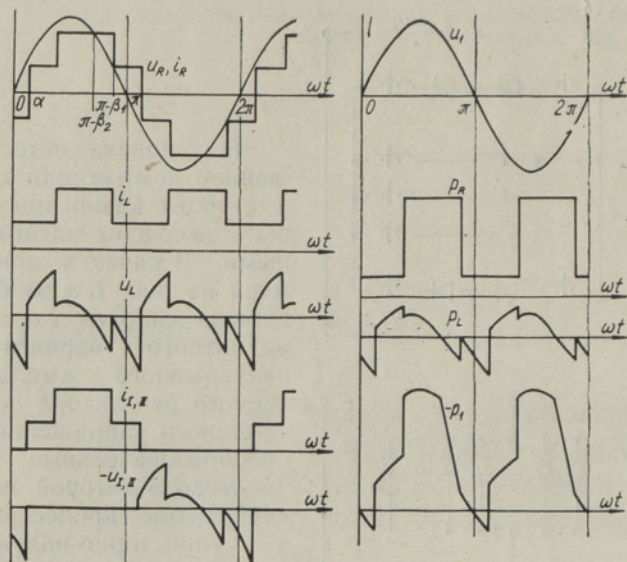


Рис. 2.

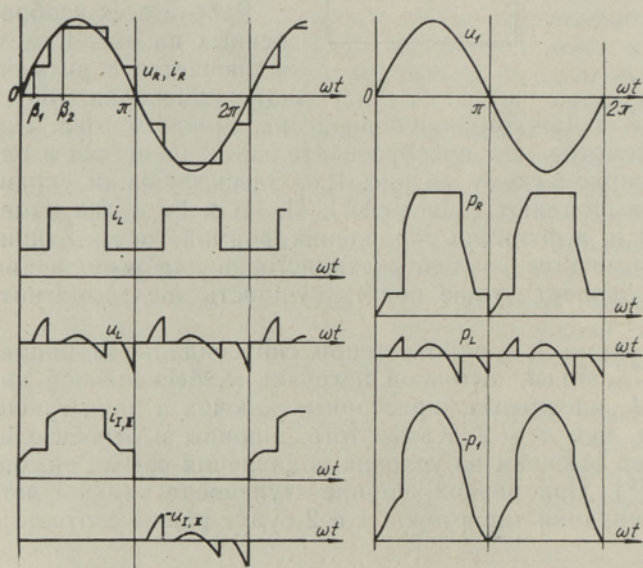


Рис. 3.

ления  $\alpha_{п}$  и мгновенные значения напряжений, токов и мощностей при  $\alpha < \alpha_{п}$ .

Как известно из [4], в промежутке  $\alpha_{п} \leq \alpha \leq \pi/2$  амплитуды ступеней выходного напряжения определяются по формуле

$$B'_m = B_m \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $B_m$  — амплитуда  $m$ -й ступени при  $\alpha = 0$  в режиме принудительной коммутации,  $B'_m$  — то же при  $\alpha \neq 0$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ .

При двухступенчатой форме напряжения нагрузки  $B_1 = 0,395 U_{R(1)m}$  и  $B_2 = 0,954 U_{R(1)m}$  [5], где  $U_{R(1)m}$  — амплитуда первой гармоники выходного напряжения, равная  $0,94 U_{1m}$ .

Угол управления в рассматриваемом случае достигает предельного



значения, когда низкая ступень в конце периода соприкасается с синусоидой питания

$$B_1 \cos \alpha_{\text{п}} = U_{1m} \sin(135^\circ + \alpha_{\text{п}}), \quad (2)$$

откуда  $\alpha_{\text{п}} = 25^\circ 24'$ .

Временные диаграммы напряжений, токов и мощностей анализируемой схемы при  $\alpha = \alpha_{\text{п}}$  показаны на рис. 2, где  $u_1$  — напряжение питания;  $\alpha$  — угол управления (т. е. угол отпирания ключей I—IV);  $i_L, u_L$  — ток и напряжение дросселя;  $i_R, u_R$  — ток и напряжение нагрузки;  $i_I, i_{II}; u_I, u_{II}$  — ток и напряжение ключей I и II;  $p_R = u_R i_R, p_L = u_L i_L, p_I = -u_I i_R$  — мощности нагрузки, дросселя и питания.

Как было сказано, при  $\alpha < \alpha_{\text{п}}$  на некоторых этапах работы  $u_R = u_1$  (см. рис. 3, где  $\alpha = 0$ ). В этом режиме работы  $\left(-\frac{\pi}{2n} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{п}}\right)$  амплитуды ступеней напряжения нагрузки определяются соотношением

$$B'_m = U_{1m} \sin \beta_m. \quad (3)$$

Выпишем выражения для  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в промежутке  $-45^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ 24'$  при условии, что постоянная составляющая напряжения дросселя  $u_L$  отсутствует.

В пределах  $20^\circ 22' \leq \alpha \leq 25^\circ 24'$  (угол  $\alpha = 20^\circ 22'$  определен из условия  $\alpha = \beta_1$ ):

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha + \left(2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cos \alpha - \cos \beta_1 - \left(\frac{\pi}{4} + \alpha + \beta_1\right) \sin \beta_1 - \frac{\pi}{2} \sin \beta_2 = 0; \quad (4)$$

в пределах  $15^\circ 05' \leq \alpha \leq 20^\circ 22'$  (угол  $\alpha = 15^\circ 05'$  определен из условия  $\beta_2 = \frac{\pi}{4} + \alpha$ ):

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha + \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cos \alpha - \left(\frac{\pi}{4} + 2\alpha\right) \sin \beta_1 - \frac{\pi}{2} \sin \beta_2 = 0; \quad (5)$$

в пределах  $-21^\circ 09' \leq \alpha \leq 15^\circ 05'$  (угол  $\alpha = -21^\circ 09'$  определен из условия  $|\alpha| + \beta_1 = \pi/4$ ):

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \sin \alpha + \cos \alpha - \left(\frac{\pi}{4} + 2\alpha\right) \sin \beta_1 + \cos \beta_2 - \\ - \left(\frac{3\pi}{4} + \alpha - \beta_2\right) \sin \beta_2 = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

в пределах  $-24^\circ 01' \leq \alpha \leq -21^\circ 09'$  (угол  $\alpha = -24^\circ 01'$  определен из условия  $\alpha = -\beta_1$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha + \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cos \alpha - \cos \beta_1 - (\alpha + \beta_1) \sin \beta_1 + \cos \beta_2 - \\ - \left(\frac{3\pi}{4} + \alpha - \beta_2\right) \sin \beta_2 = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

в пределах  $-45^\circ \leq \alpha \leq -24^\circ 01'$  (угол  $\alpha = -45^\circ$  определен из условия  $\beta_2 = \pi/2$ ):

$$\cos\left(\frac{3\pi}{4} + \alpha\right) - \cos \beta_2 + \left(\frac{3\pi}{4} + \alpha - \beta_2\right) \sin \beta_2 = 0. \quad (8)$$

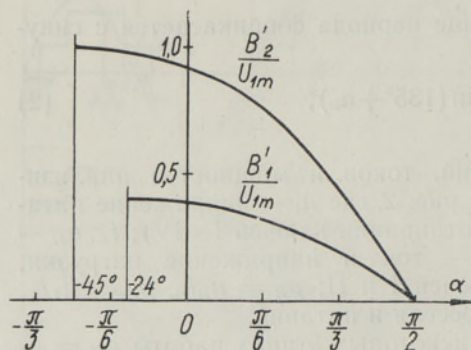


Рис. 4.

При  $\alpha = -24^\circ$  исчезает первая ступень, при  $\alpha = -45^\circ$  — вторая. В интервале  $-\pi/2 \leq \alpha \leq -\pi/4$  форма напряжения нагрузки совпадает с синусоидой.

Временные диаграммы мощностей на рис. 2 и 3 показывают процесс преобразования энергии в режиме естественной коммутации. В течение  $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \beta_2$  нагрузка потребляет не всю энергию источника питания, остаток ее накапливается в дросселе. В промежутке  $\pi - \beta_2 \leq \omega t \leq \pi$  нагрузка питается как от источника питания, так и от дросселя, а в интервале  $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$  — только от дросселя. Остаток накопленной энергии возвращается в источник питания.

Интересно отметить, что по мере уменьшения угла  $\alpha$  влияние, оказываемое дросселем на процесс преобразования энергии, становится все меньше и при  $\alpha = -\pi/2n$  исчезает, так как ток нагрузки достигает синусоидальной формы и  $u_L = 0$ .

Поскольку относительные амплитуды ступеней определяются числом витков дросселя  $L$ , включенных в данный момент в диагональ выпрямленного тока, то  $\beta_1$  и  $\beta_2$  связаны соотношением

$$\frac{0,954}{0,395} = \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}, \quad (9)$$

использование которого позволяет решить приведенные уравнения.

Рис. 4 иллюстрирует изменение амплитуды ступеней во всем диапазоне регулирования. При

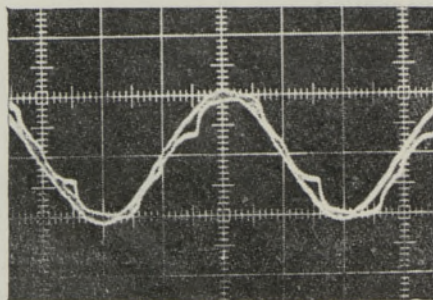
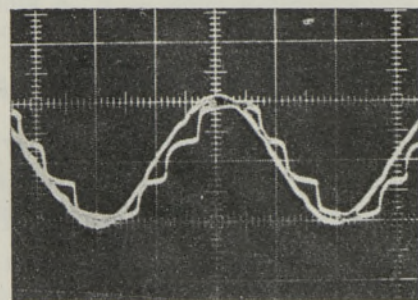
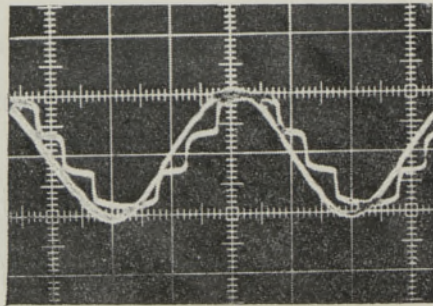
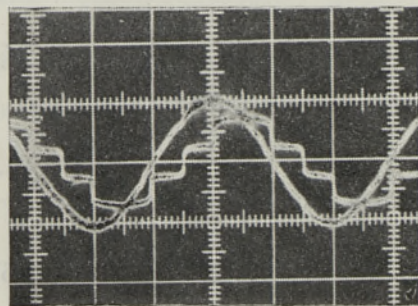


Рис. 5.



Хотя в статье мы ограничились анализом идеализированного случая, осциллограммы напряжений питания  $u_1$  и нагрузки  $u_R$  лабораторного макета при  $n = 2$  и  $\alpha = \text{var}$  (рис. 5) подтверждают совпадение процессов в идеализированных и реальных цепях.

Анализ, проведенный при  $n > 2$ , показал, что характер преобразовательных процессов не зависит от количества ступеней и что каждый полупериод напряжения нагрузки распределяется на два интервала. В первом

$$\alpha \leq \omega t \leq \pi - \arcsin \frac{B'_n}{U_{1m}}$$

дроссель  $L$  накапливает энергию и поэтому  $u_R \leq u_1$ , т. е. напряжение резистивной нагрузки не превышает напряжения питания. Во втором интервале

$$\pi - \arcsin \frac{B'_n}{U_{1m}} \leq \omega t \leq \alpha + \pi$$

дроссель отдает накопленную энергию и потому  $u_R \geq u_1$ .

Изложенное позволяет сделать вывод, что при переходе тиристорно-индуктивного непрерывного амплитудного регулятора переменного напряжения из режима принудительной коммутации в режим естественной формы кривой тока усложняется, если значение угла управления  $\alpha$  ниже некоторого предельного его значения  $\alpha_{\pi}$ , но спектральный состав тока в то же время улучшается. Поэтому предлагаемые схемы тиристорно-индуктивных амплитудных регуляторов с естественной коммутацией заслуживают широкого применения на практике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Emanuel-Eigeles, A., Erlicki, M. S. New aspects of power factor improvement. P. II. — IEEE Trans. Industry and General Applications, 1968, v. IGA-4, N 4, p. 447—455.
2. Lerp, V. R., Sibgatulin, K. M., Cherkasov, J. N. Current stabilizer having a saturable reactor in the mode of forced magnetization. — United States Patent, 1974, N 3 845 380, Oct. 29.
3. Оявээр М., Сарв В. Процессы преобразования в тиристорном регуляторе переменного напряжения с подавленными четными гармониками тока. — Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 1976, т. 25, № 4, с. 392—397.
4. Оявээр М., Сарв В. Анализ преобразовательных процессов в индуктивно-ключевой цепи непрерывного амплитудного регулирования переменного напряжения. — Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 1977, т. 26, № 3, с. 297—303.
5. Тонкаль В. Е., Липковский К. А., Мельничук Л. П. Способы улучшения качества выходного напряжения автономных инверторов. — Препринт-49 ИЭД АН УССР. Киев, 1972.

Институт термофизики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
19/IX 1977

Maire OJAVEER, V. SARV

**MUUNDUSPROTSESSID VAHELDUVPINGE AMPLITUUDI  
SUJUVALT REGULEERIVAS INDUKTIIVSES TÜRISTORAHELAS  
VABAKOMMUTATSIOONI KORRAL**

Artiklis on esitatud vahelduvpinge amplituudi sujuvalt reguleerivate induktiivsete türistorahelate skeemivariandid, mis võimaldavad saada mitmeastmelist siinuselisele lähedast koormusvoolu. On määratud muundusprotsessi seaduspärasused vabakommutatsiooni korral ning neid illustreeritud pingete, voolude ja võimsuste ajaliste diagrammidega kaheastmelise voolu juhul.

Maire OJAVEER, V. SARV

**CONVERSION PROCESSES IN THE THYRISTOR-INDUCTIVE CIRCUIT  
OF ALTERNATING VOLTAGE CONTINUOUS AMPLITUDE-REGULATION  
IN CONDITIONS OF NATURAL COMMUTATION**

Some basic configurations of thyristor-inductive circuits of alternating voltage continuous amplitude-regulation for obtaining a multistep current wave-form near to sinusoidal, are presented. Conversion processes in conditions of natural commutation are described and the wave-forms of voltages, currents and powers in the case of two-step load current wave-form are presented.