

Ю. А. ГУНЧЕНКО

Украина, г. Одесса, Гос. политехнический ун-т

Дата поступления в редакцию
22.09 1999 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ

РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ОДНИМ КЛЮЧЕВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Показана возможность работы исследуемых устройств в различных режимах. Обобщены формулы выходного напряжения, построены типовые регулировочные характеристики.

The work possibility of investigated devices in different modes has been shown. The output voltage formulae have been generalized, the standard adjustment characteristics have been plotted.

Проблемы энергоснабжения породили повсеместное ухудшение качества переменного напряжения в электросетях. Поэтому остается актуальной задача регулирования напряжения для различных групп потребителей.

В литературе [1–3] описаны различные устройства регулирования переменного напряжения. Однако до сих пор мало исследованы и, соответственно, редко применяются регуляторы переменного напряжения с одним ключевым элементом.

Принципиально возможно создание достаточно простых одноключевых исполнительных органов (ИО) с плавным регулированием переменного напряжения [1, с. 233, 240; 2; 3, с. 12] (рис. 1, где $U_{вх}$, $U_{вых}$ – соответственно входное и выходное напря-

жение; K – ключ переменного тока; L – катушка индуктивности; T – трансформатор; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – обмотки трансформатора). Простота исполнения, снижение стоимости, упрощение систем автоматического регулирования, возможность плавного регулирования напряжения в широком диапазоне при одновременном уменьшении аварийных режимов (и, следовательно, повышение надежности) позволяет выделить описываемые устройства в отдельный класс. Форма выходного напряжения в зависимости от используемого алгоритма и выполнения ключа представлена на рис. 2.

При использовании в качестве ключа переменного напряжения достаточно дешевых и исследованных тиристоров либо симисторов возможен лишь один алгоритм работы – система импульсно-фазового управления (СИФУ). При таком алгоритме ключ открывается в каждом полупериоде переменного напряжения в момент, соответствующий углу управления α . Закрывается ключ в момент уменьшения тока через него до нулевого значения. Этот момент соответствует углу φ – углу сдвига фаз между током и напряжением.

При этом для схемы рис. 1, а выходное напряжение при включенном ключе равно входному, а в выключенном состоянии ключа равно 0 –

$$\begin{cases} u_{\text{вых}} = 0, & \varphi < \alpha < \alpha_{\text{рег}}; \\ u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} = U_m \sin \alpha, & 0 < \alpha < \varphi, \alpha_{\text{рег}} < \alpha < \pi; \end{cases} \quad (1)$$

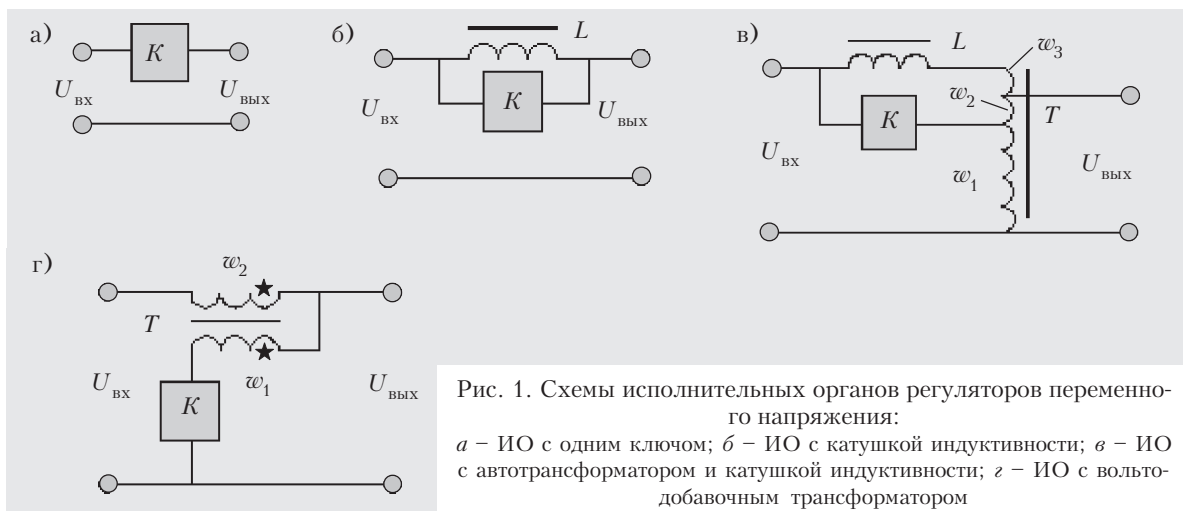


Рис. 1. Схемы исполнительных органов регуляторов переменного напряжения:

а – ИО с одним ключом; б – ИО с катушкой индуктивности; в – ИО с автотрансформатором и катушкой индуктивности; г – ИО с вольтодобавочным трансформатором

Номер рисун- ка	Коэффициенты					
	A	B	C	D	E	F
Для формулы (5) при СИФУ						
1, а	1	1	-1	0		
1, б	1	0	0	1		
1, в	k_2	$k_2 - k_1$	$k_1 - k_2$	k_1		
1, г	k	$k - 1$	$1 - k$	1		
Для формулы (6) при СИФУ						
1, а	1	-1	1	0		
1, б	1	0	0	1		
1, в	k_2^2	$k_1^2 - k_2^2$	$k_2^2 - k_1^2$	k_1^2		
1, г	k^2	$1 - k^2$	$k^2 - 1$	1		
Для формулы (7) при ШИР (вариант 1)						
1, а	1	1	0	-	-	
1, б	2	0	1	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$	
1, в	$k_1 + k_2$	$k_2 - k_1$	k_1	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$	
1, г	$1 + k$	$k - 1$	1	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$	
Для формулы (7) при ШИР (вариант 2)						
1, а	1	1	0	-	-	
1, б	2	0	1	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$	
1, в	$k_1 + k_2$	$k_1 - k_2$	k_1	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$	
1, г	$1 + k$	$1 - k$	1	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$	
Для формулы (8) при ШИР (вариант 1)						
1, а	1	$-n$	-1	0	-	-
1, б	1	0	0	1	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$
1, в	k_2^2	$n(k_1^2 - k_2^2)$	$k_2^2 - k_1^2$	k_1^2	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$
1, г	k^2	$n(1 - k^2)$	$k^2 - 1$	1	$i\pi/n$	$i\pi/n + \alpha$
Для формулы (8) при ШИР (вариант 2)						
1, а	0	n	-1	0	-	-
1, б	1	0	0	1	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$
1, в	k_1^2	$n(k_2^2 - k_1^2)$	$k_1^2 - k_2^2$	k_1^2	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$
1, г	1	$n(k^2 - 1)$	$1 - k^2$	1	$i\pi/n + \alpha$	$(i+1)\pi/n$

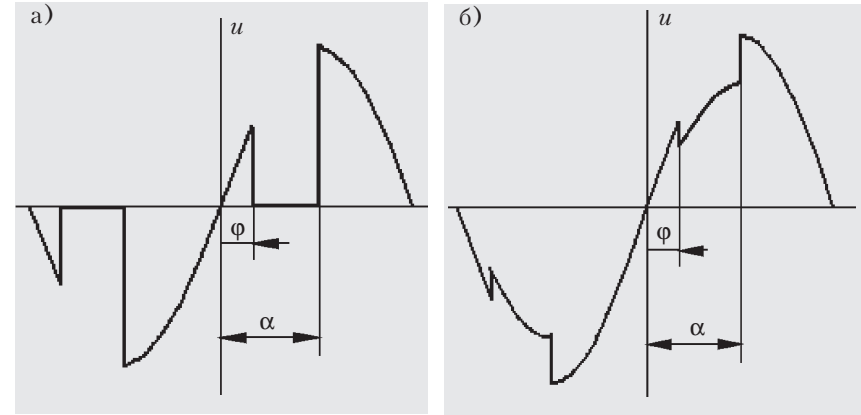


Рис. 2. Выходное напряжение регулятора:
а – для ИО по схеме рис. 1, а; б – для ИО по схемам рис. 1, б, в, г

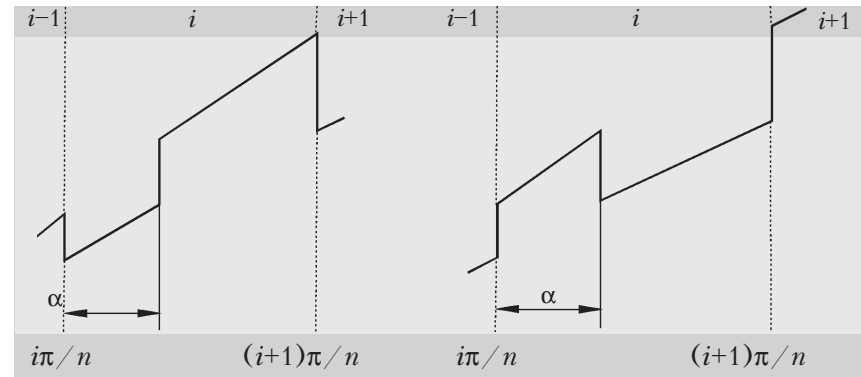


Рис. 3. Выходное напряжение при ШИР при различных алгоритмах коммутации

для схемы рис. 1, б

$$\begin{cases} u_{\text{ввых}} = u_{\text{вх}} - u_L = U_m \sin \alpha - u_L(i, \alpha), & \varphi < \alpha < \alpha_{\text{пер}}; \\ u_{\text{ввых}} = u_{\text{вх}} = U_m \sin \alpha, & 0 < \alpha < \varphi, \alpha_{\text{пер}} < \alpha < \pi; \end{cases} \quad (2)$$

для схемы рис. 1, в

$$\begin{cases} u_{\text{ввых}} = k_1(u_{\text{вх}} - u_L) = k_1(U_m \sin \alpha - u_L(i, \alpha)), & \varphi < \alpha < \alpha_{\text{пер}}; \\ u_{\text{ввых}} = k_2 u_{\text{вх}} = k_2 U_m \sin \alpha, & 0 < \alpha < \varphi, \alpha_{\text{пер}} < \alpha < \pi, \end{cases} \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты трансформации трансформатора –

$$k_1 = \frac{w_1 + w_2}{w_1 + w_2 + w_3} = 1 - \frac{w_3}{w_1 + w_2 + w_3};$$

$$k_2 = \frac{w_1 + w_2}{w_1} = 1 + \frac{w_2}{w_1};$$

для схемы рис. 1, г

$$\begin{cases} u_{\text{ввых}} = u_{\text{вх}} - u_L = U_m \sin \alpha - u_L(i, \alpha), & \varphi < \alpha < \alpha_{\text{пер}}; \\ u_{\text{ввых}} = k u_{\text{вх}} = k U_m \sin \alpha, & 0 < \alpha < \varphi, \alpha_{\text{пер}} < \alpha < \pi, \end{cases} \quad (4)$$

где k – коэффициент трансформации трансформатора, приведенный ко входу, –

$$k = 1 + \frac{w_2}{w_1}.$$

В вышеприведенных выражениях α – текущий угол, $\alpha_{\text{пер}}$ – угол, устанавливаемый системой автоматического регулирования, φ – угол сдвига фаз между напряжением и током нагрузки, U_m – амплитудное значение входного напряжения, $u_L(i, \alpha)$ – напряжение на катушке индуктивности L для схем рис. 1, б, в и на индуктивном сопротивлении трансформатора в схеме рис. 1, г. (В общем случае это напряжение имеет нелинейную зависимость от тока и угла регулирования, и для каждого конкретного случая должно рассчитываться отдельно. При токе равно нулю оно также равно нулю.)

Вычисляя выражения (1) – (4), средние и действующие значения выходного напряжения для каждой из схем можно записать общими выражениями (5), (6). При этом коэффициенты A, B, C, D можно вывести с использованием, например, таблицы интегралов [4] (они сведены в **таблицу**).

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{вхср}} \left(A + \frac{1}{2} B \cos \alpha + \frac{1}{2} C \cos \varphi \right) - \frac{D}{\pi} \int_{\varphi}^{\alpha} u_L d\alpha; \quad (5)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{X}, \quad (6)$$

где

$$X = \frac{U_m^2}{2} \left(A\pi + B\alpha + C\varphi + \frac{1}{2} C \sin 2\alpha + \frac{1}{2} B \sin 2\varphi \right) + D \int_{\varphi}^{\alpha} (u_L^2 - 2u_L U_m \sin \alpha) d\alpha.$$

При использовании в качестве ключей полностью управляемых элементов, таких как транзисторы или запираемые тиристоры, появляется возможность широтно-импульсного регулирования (ШИР). При

таком виде регулирования полупериод напряжения разбивается на n участков, при этом обычно $n \leq 10$. Каждый участок имеет длительность π/n . На каждом i -м участке (**рис. 3**), согласно первому алгоритму коммутации, ключ закрыт в моменты времени от $i\pi/n$ до $(i+1)\pi/n$ и открыт в моменты времени от $(i-1)\pi/n$ до $i\pi/n$. Согласно второму алгоритму ключ открыт в моменты времени от $i\pi/n$ до $(i+1)\pi/n$ и закрыт в моменты времени от $(i-1)\pi/n$ до $i\pi/n$. При этом угол управления α может меняться от 0 до π/n .

Возникает вопрос о законах коммутации и вызванных ими перенапряжениях. При идеальном ключе и активно-индуктивной нагрузке перенапряжения на ключе могут достигать бесконечных значений. Однако при демпфировании ключа дополнительными элементами (например RC-цепочкой) эти перенапряжения можно снизить до заданного уровня. Так, можно считать удвоительным результатом трехкратное превышение напряжения.

Моделирование при помощи пакета Pspice-8.0 [5] схемы рис. 1, а при работе на активно-индуктивную нагрузку и $n=4$ позволило добиться перенапряжений, не превышающих 800 В при регулировании синусоидального напряжения 220 В (амплитудное значение 311 В). При этом нагрузка составляла 6 кВ·А ($R=5$ Ом, $X_L=6$ Ом, $\cos \varphi=0,6$), параметры демпфирующей цепи – $R=25$ Ом, $C=10$ мкФ. Следует отметить, что в той же модели при отсутствии RC-цепи перенапряжения на ключе достигали 35 МВ.

В описываемых схемах при ШИР устанавливаются демпфирующие цепочки – параллельно ключу либо индуктивности. Кроме того, во всех схемах необходимо применение входных и выходных фильтров для сглаживания ВЧ-составляющей и уменьшения крутизны фронтов.

Средние и действующие значения выходного напряжения при разных алгоритмах коммутации сведены в общие формулы (7), (8), коэффициенты в них можно определить из таблицы.

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{вхср}} \frac{1}{2} \left(A + B \sum_{i=0}^{n-1} \cos \left(\frac{i\pi}{n} + \alpha \right) \right) - \frac{C}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} \int_{D} u_L d\alpha; \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Y}, \quad (8)$$

где

$$Y = \frac{U_m^2}{2} \left(A\pi + B\alpha + \frac{1}{2} C \sum_{i=0}^{n-1} \sin \left(\frac{2i\pi}{n} + 2\alpha \right) \right) + D \sum_{i=0}^{n-1} \int_{E} (u_L^2 - 2u_L U_m \sin \alpha) d\alpha.$$

При этом имеется в виду, что для любого значения n выполняются равенства

$$\sum_{i=0}^{n-1} \cos \frac{i\pi}{n} = 1; \quad \sum_{i=0}^{n-1} \cos \frac{(i+1)\pi}{n} = -1;$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sin \frac{2i\pi}{n} = \sum_{i=0}^{n-1} \sin \frac{2(i+1)\pi}{n} = 0.$$

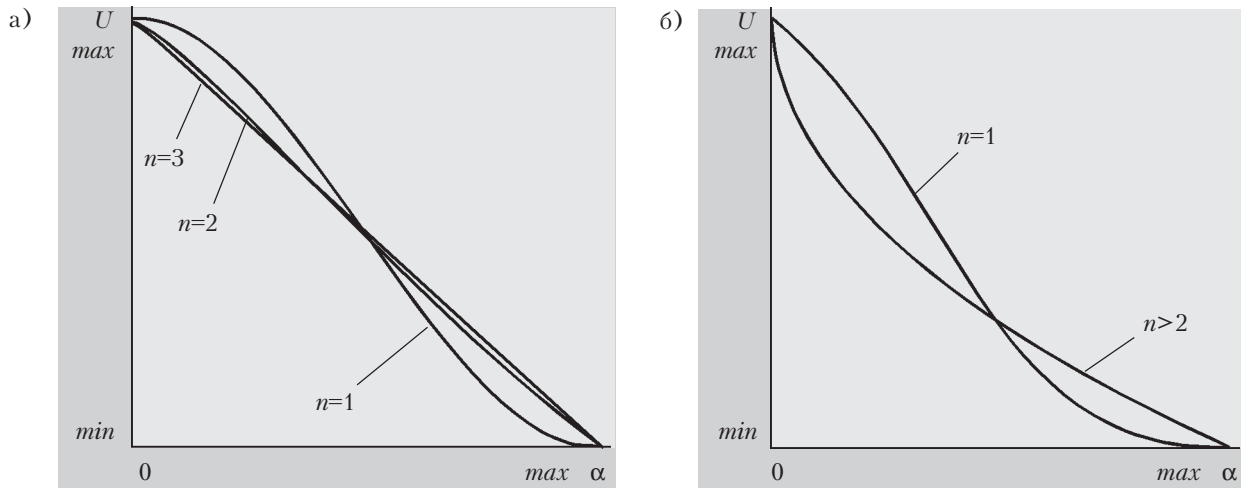


Рис. 4. Регулировочные характеристики при различном числе участков разбиения:
 а – для среднего значения напряжения; б – для действующего значения

Для схем рис. 1, б, г наличие слагаемого $u_L(i, \alpha)$ означает возможность понижения напряжения под нагрузкой. В схеме рис. 1, в это означает расширение диапазона регулирования в режиме понижения напряжения.

Анализируя полученные регулировочные характеристики (рис. 4), можно сделать вывод об их однотипном характере. Это позволяет построить одну систему регулирования для всех схем. Характер регулирования требуемой САР зависит только от выбранного алгоритма работы, и не зависит от реализации силовой части.

В заключение следует отметить, что несмотря на однотипность описанных устройств область применения их различна. Схему с одним ключом (рис. 1, а) целесообразно применять для регулирования в широком диапазоне напряжений на активной нагрузке (нагревательные элементы, освещение). Схему с катушкой индуктивности (рис. 1, б) лучше использовать в применениях с небольшим диапазоном регулирования, где нет необходимости в повышении выходного напряжения. Схема с автотрансформатором и катушкой индуктивности (рис. 1, в) эффективна в случаях резкопеременной нагрузки. При за-

мене автотрансформатора на трансформатор ее можно рекомендовать для сварочных аппаратов и для электродуговых печей. Схема с вольтодобавочным трансформатором (рис. 1, г) наиболее универсальна, ее можно рекомендовать для регулирования напряжения всех типов потребителей.

Описанные схемы силовой части можно также рассматривать как частные случаи и режимы работы более сложных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. Преобразовательная техника. – К.: Вища школа, 1983.
2. А.с. 760875 СССР. Устройство для регулирования напряжения / Л. В. Ярных, Ю. Л. Коротецкий, В. Г. Рудницкий, А. Ю. Бутрий. – Оpubл. в Б. И. № 32, 1980.
3. Говоров Ф. П., Папко М. А. Регулирование напряжения в электрических сетях с помощью вольтодобавочных трансформаторов с тиристорным управлением. – К.: Техніка, 1994.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Наука, 1980.
5. Программа моделирования электронных схем: MicroSim Design. Version 8.0. – July 1997.

в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции

в портфеле редакции

- Резистивные элементы, полученные на анодном оксиде алюминия имплантацией ионов Ti и Mo. *Г. В. Литвинович, В. А. Сокол, В. В. Углов, И. З. Занг, И. И. Абрамов, А. Л. Данилюк (Белоруссия, г. Минск; КНР, г. Пекин)*
- Исследование технологических режимов температурной обработки медных оболочек тепловых микротруб. *Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец (Украина, г. Киев)*
- Информационное обеспечение разработки технологических процессов и наукоемкой продукции. *С. Г. Радченко (Украина, г. Киев)*
- Особенности деградации керамических терморезисторов в режиме импульсных токовых нагрузок. *Н. М. Вакив, Ю. Мацяк, О. Я. Мруз, Ю. Погужельска, О. И. Шпотюк (Украина, г. Львов; Польша, г. Варшава)*
- Совмещение изображений в системах автоматического оптического контроля печатных плат. *В. Н. Крылов, Г. Ю. Щербакова (Украина, г. Одесса)*

в портфеле редакции

в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции