

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



Ц76

К-172

2553/2-76

В.В.Калиниченко

5/VI-76  
13 - 9578

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ  
С КОМБИНИРОВАННЫМ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

**1976**

13 - 9578

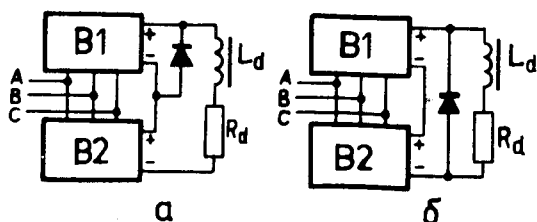
В.В.Калиниченко

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ  
С КОМБИНИРОВАННЫМ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

В системах питания физических установок в последнее время находят применение выпрямители с комбинированным регулированием <sup>/1-4/</sup>. Блок-схемы двух вариантов таких выпрямителей показаны на *рис. 1, а и б*. Представленные здесь преобразовательные установки содержат полупроводниковые управляемые выпрямители с фазовым управлением и полупроводниковые выпрямители с дискретным регулированием напряжения <sup>/5/</sup>.

В установке, выполненной по блок-схеме *рис. 1а*, управляемый выпрямитель работает в выпрямительном режиме во всем диапазоне регулирования выпрямленного напряжения. Во второй установке */рис. 1б/* управляемый выпрямитель работает как в выпрямительном, так и в инверторном режимах.

Комбинированное регулирование позволяет существенно повысить коэффициент мощности выпрямительной установки и снизить коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения /по сравнению с обычным фазовым управлением при широком диапазоне регулирования/. Очевидным недостатком выпрямителей с комбинированным регулированием является увеличение количества силовых элементов и связанное с этим усложнение конструкции таких выпрямителей.



*Рис. 1. Блок-схемы выпрямительных установок с комбинированным регулированием напряжения. В1 - выпрямитель с фазовым управлением, В2 - выпрямитель с дискретным регулированием.*

Энергетические показатели и коэффициент пульсаций являются важнейшими параметрами преобразовательных установок. Определим эти параметры для конкретной схемы, показанной на рис. 2, при следующих допущениях:

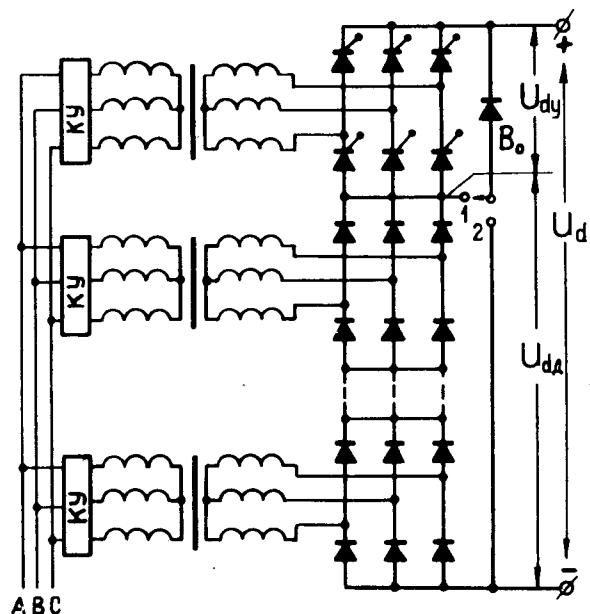


Рис. 2. Принципиальная схема выпрямителя с комбинированным регулированием напряжения.

КУ - коммутационное устройство.

Примечание: подключение анода вентили  $B_0$  к точкам 1 или 2 позволяет реализовать соответственно блок-схемы 1а и 1б.

- а/ ток нагрузки идеально сглажен ( $\chi_d = \infty$ ),
- б/ продолжительность коммутации равна нулю ( $\gamma = 0$ ),
- в/ индуктивное сопротивление  $x_0$  питающей сети незначительно и взаимовлияния между секциями устройства можно не учитывать,
- г/ форма напряжения питающей сети близка к синусоидальной,
- д/ активные сопротивления пренебрежимо малы.

Для расчета интересующих нас параметров воспользуемся соотношениями /6, 7/:

$$\nu = I_1 / I_c, \quad \cos \phi = I_{1a} / I_1, \quad /1/$$

$$\chi = \nu \cos \phi, \quad q = U_{m6} / U_d.$$

Здесь  $\chi$  - коэффициент мощности,  $\nu$  - коэффициент искажений,  $q$  - коэффициент пульсаций,  $I_c$  - действующее значение несинусоидального тока, потребляемого установкой из сети,  $I_1$  - действующее значение первой гармоники этого тока,  $I_{1a}$  - активная составляющая потребляемого тока,  $U_{m6}$  - амплитуда шестой гармоники выпрямленного напряжения,  $U_d$  - постоянная составляющая выпрямленного напряжения.

Действующее значение тока будем определять из соотношения /7/

$$I_c = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_c^2 d\theta}, \quad /2/$$

а для определения  $I_1$  и  $U_{m6}$  воспользуемся формулами для коэффициентов разложения Фурье /8/.

Исследование установки, выполненной по блок-схеме рис. 1а

На рис. 3 приведены временные диаграммы тока /фазного/, потребляемого этой установкой, для некоторых значений углов регулирования  $\alpha$ . Потребляемый ток является суммой двух токов: тока выпрямителя с фазовым управлением  $i_y$  и тока выпрямителя с дискретным регулированием  $i_d$ .

Действующее значение первой гармоники потребляемого тока равно:

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sqrt{I_d^2 + I_y^2 + 2I_d I_y \cos \alpha} \quad /3/$$

при изменении угла регулирования  $\alpha$  в пределах  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sqrt{I_D^2 + 4(I_Y^2 + I_D I_Y) \cos^2 \left( \frac{\pi}{6} + \frac{a}{2} \right)} \quad /4/$$

для  $60^\circ \leq a \leq 120^\circ$ .

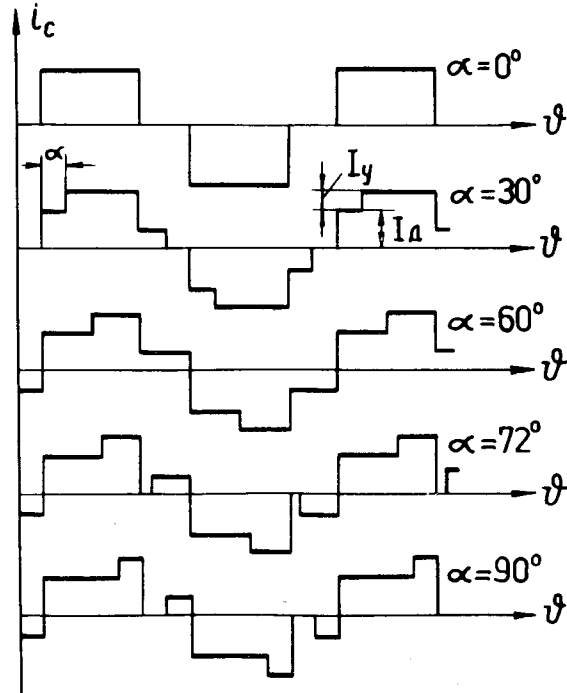


Рис. 3. Временные диаграммы фазного тока, потребляемого установкой по блок-схеме 1а.

Активная составляющая потребляемого тока равна:

$$I_{1a} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} (I_D + I_Y \cos a) \quad /5/$$

при  $0 \leq a \leq 60^\circ$  и

$$I_{1a} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} [I_D + 2I_Y \cos^2 \left( \frac{\pi}{6} + \frac{a}{2} \right)] \quad /6/$$

при  $60^\circ \leq a \leq 120^\circ$ .

Действующее значение потребляемого тока  $I_c$  определим по формуле /2/:

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_D^2 + I_Y^2 + I_D I_Y (2 - 3 \frac{a}{\pi})} \quad /7/$$

при  $0 \leq a \leq 60^\circ$  и

$$I_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_D^2 + (I_Y^2 + I_D I_Y) (2 - 3 \frac{a}{\pi})} \quad /8/$$

при  $60^\circ \leq a \leq 120^\circ$ .

Значения токов  $I_D$  и  $I_Y$  могут быть определены из соотношений:

$$I_D = n_D I_d, \quad I_Y = n_Y I_d, \quad /9/$$

здесь  $I_d$  - выпрямленный ток,  $n_D = U_{2d} / U_1$ ,  $n_Y = U_{2y} / U_1$  - коэффициенты трансформации,  $U_1$  - напряжение, приложенное к первичным обмоткам,  $U_{2d}, U_{2y}$  - вторичные напряжения соответствующих трансформаторов.

Из соотношений /1/, с учетом /3/ и /9/, получим

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{n_D^2 + n_Y^2 + 2n_D n_Y \cos a}{n_D^2 + n_Y^2 + n_D n_Y (2 - 3 \frac{a}{\pi})}} \quad /10/$$

$$\cos \phi = \frac{n_D + n_Y \cos a}{\sqrt{n_D^2 + n_Y^2 + 2n_D n_Y \cos a}} \quad /11/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{n_D + n_Y \cos a}{\sqrt{n_D^2 + n_Y^2 + n_D n_Y (2 - 3 \frac{a}{\pi})}} \quad /12/$$

при  $0 \leq a \leq 60^\circ$  и

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{n_D^2 + 4(n_Y^2 + n_D n_Y) \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{n_D^2 + (n_Y^2 + n_D n_Y)(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /13/$$

$$\cos \phi = \frac{n_D + 2n_Y \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{\sqrt{n_D^2 + 4(n_Y^2 + n_D n_Y) \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}}, \quad /14/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{n_D + 2n_Y \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{\sqrt{n_D^2 + (n_Y^2 + n_D n_Y)(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /15/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ .

Выпрямленное напряжение  $u_d$  равно сумме напряжений  $u_{dD}$  и  $u_{dY}$ , временные диаграммы которых представлены на рис. 4 для трех значений угла регулирования  $\alpha$ . При

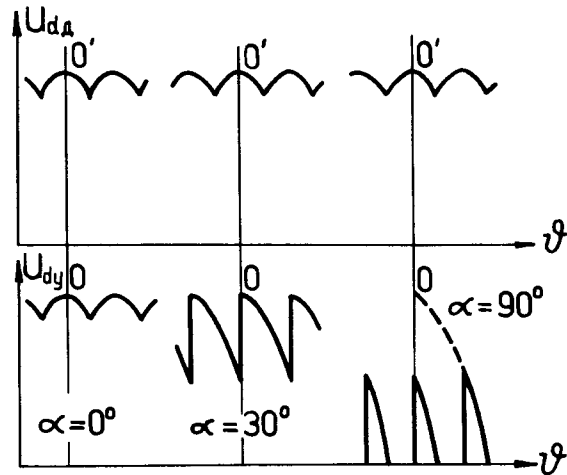


Рис. 4. Временные диаграммы напряжений  $u_{dD}$  и  $u_{dY}$  для установки по блок-схеме 1а.

указанном выборе начала координат  $(0,0')$  амплитуда шестой гармоники на выходе выпрямителя с дискретным регулированием равна /7/

$$U_{m6D} = 2U_{dD} /35. \quad /16/$$

Амплитуды косинусоидальной ( $U'_{m6Y}$ ) и синусоидальной ( $U''_{m6Y}$ ) составляющих шестой гармоники на выходе выпрямителя с фазовым управлением могут быть определены из соотношений:

$$U'_{m6Y} = \frac{6}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} u_{dY} \cos 6\theta d\theta, \quad /17/$$

$$U''_{m6Y} = \frac{6}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} u_{dY} \sin 6\theta d\theta \quad /18/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$  и

$$U'_{m6Y} = \frac{6}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} u_{dY} \cos 6\theta d\theta, \quad /19/$$

$$U''_{m6Y} = \frac{6}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} u_{dY} \sin 6\theta d\theta \quad /20/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ .

Подставив в /17/÷/20/ значение  $u_{dY} = \sqrt{6} u_{2Y} \cos \theta$ , получим:

$$U'_{m6Y} = \frac{U_{dY0}}{35} (7 \cos 5\alpha - 5 \cos 7\alpha), \quad /21/$$

$$U''_{m6Y} = \frac{U_{dY0}}{35} (7 \sin 5\alpha - 5 \sin 7\alpha) \quad /22/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$  и

$$U'_{m6y} = \frac{U_{dy0}}{35} \{7[1 - \sin 5(a - \frac{\pi}{6})] - 5[1 + \sin 7(a - \frac{\pi}{6})]\}, \quad /23/$$

$$U''_{m6y} = \frac{U_{dy0}}{35} [7 \cos 5(a - \frac{\pi}{6}) + 5 \cos 7(a - \frac{\pi}{6})] \quad /24/$$

при  $60^\circ \leq a \leq 120^\circ$ , где  $U_{dy0}$  - постоянная составляющая выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя с фазовым управлением при  $\alpha = 0$ .

Амплитуда шестой гармоники на выходе выпрямительной установки с комбинированным регулированием равна:

$$U_{m6} = \sqrt{(U_{m6d} + U'_{m6y})^2 + (U''_{m6y})^2} \quad /25/$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения равна:

$$U_d = U_{dд} + U_{dy0} \cos \alpha \quad /26/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$  и

$$U_d = U_{dд} + 2U_{dy0} \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2}) \quad /27/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ , где

$$U_{dд} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} n_d U_1, \quad /28/$$

$$U_{dy0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} n_y U_1.$$

Из соответствующего соотношения /1/, с учетом /21/ ÷ /28/, получим:

$$q = 2[n_d^2 + n_d n_y (7 \cos 5\alpha - 5 \cos 7\alpha) + 0,5 n_y^2 (37 - 35 \cos 2\alpha)]^{1/2} / 35(n_d + n_y \cos \alpha) \quad /29/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$  и

$$q = 2\{(n_d + n_y)^2 + 0,5 n_y^2 [37 + 35 \cos 2(a - \frac{\pi}{6})] - n_y (n_d + n_y) [7 \sin 5(a - \frac{\pi}{6}) + 5 \sin 7(a - \frac{\pi}{6})]\}^{1/2} / 35[n_d + 2n_y \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})] \quad /30/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ .

При комбинированном регулировании часто реализуется следующий режим работы /2/. Выпрямитель с дискретным регулированием выпрямленного напряжения обеспечивает ступенчатое изменение величины выходного напряжения с заданным значением шага  $U_{ds} / U_{ds}$  - среднее значение величины шага/; при этом выходное напряжение может принимать значения

$$U_{dд} = i U_{ds}, \quad /31/$$

где  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ , предельное максимальное значение  $i$  равно  $2^n - 1 / n$  - число секций выпрямителя с дискретным регулированием/. Плавное регулирование напряжения в интервалах между дискретными значениями обеспечивается с помощью управляемого выпрямителя, постоянная составляющая напряжения на зажимах которого равна

$$U_{dy} = U_{dy0} f(\alpha).$$

Напряжение на нагрузке  $U_d$  равно

$$U_d = U_{ds} [i + kf(\alpha)], \quad /32/$$

где  $k = U_{dy0} / U_{ds}$ .

Величина  $U_{dy0}$  выбирается больше среднего значения величины шага  $U_{ds}$ , чтобы обеспечить надежное перекрытие

/без "провалов"/ всего диапазона регулирования напряжения.

Для рассмотренного режима регулирования из /10/ ÷ /15/, /29/, /30/, с учетом /31/ и /32/, получаем:

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{i^2 + k^2 + 2ik \cos \alpha}{i^2 + k^2 + ik(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /33/$$

$$\cos \phi = \frac{i + k \cos \alpha}{\sqrt{i^2 + k^2 + 2ik \cos \alpha}}, \quad /34/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{i + k \cos \alpha}{\sqrt{i^2 + k^2 + ik(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /35/$$

$$q = 2[i^2 + ik(7 \cos 5\alpha - 5 \cos 7\alpha) + 0,5k^2(37 - 35 \cos 2\alpha)]^{1/2} / 35(i + k \cos \alpha) \quad /36/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$  и

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{i^2 + 4(k^2 + ik) \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{i^2 + (k^2 + ik)(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /37/$$

$$\cos \phi = \frac{i + 2k \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{\sqrt{i^2 + 4(k^2 + ik) \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}}, \quad /38/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{i + 2k \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})}{\sqrt{i^2 + (k^2 + ik)(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /39/$$

$$q = 2\{(i + k)^2 + 0,5k^2[37 + 35 \cos 2(\alpha - \frac{\pi}{6})]\} -$$

$$- k(i + k)[7 \sin 5(\alpha - \frac{\pi}{6}) + 5 \sin 7(\alpha - \frac{\pi}{6})]^{1/2} / 35[i + 2k \cos^2(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha}{2})] \quad /40/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ .

На рис. 5,6 приведены графики зависимостей  $\nu$ ,  $\cos \phi$ ,  $\chi$ ,  $q$ , вычисленные по формулам /33/ ÷ /40/ для нескольких значений  $i$  и  $k$ .

*Исследование установки, выполненной по блок-схеме рис. 16*

Временные диаграммы потребляемого /фазного/ тока  $i_c$  приведены на рис. 7, а на рис. 8 - временные диаграммы напряжений  $u_{дД}$  и  $u_{дУ}$ . Для режима регулирования, описываемого соотношением /32/, получены следующие выражения для интересующих нас параметров установки:

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{i^2 + k^2 + 2ik \cos \alpha}{i^2 + k^2 + ik(2 - 3\frac{\alpha}{\pi})}} \quad /41/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ ,

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{i^2 + k^2 + 2ik \cos \alpha}{i^2 + k^2 + 3ik(1 - 2\frac{\alpha}{\pi})}} \quad /42/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ ,

$$\nu = \frac{3}{\pi} \sqrt{\frac{i^2 + k^2 + 2ik \cos \alpha}{i^2 + k^2 + ik(1 - 3\frac{\alpha}{\pi})}} \quad /43/$$

при  $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ;



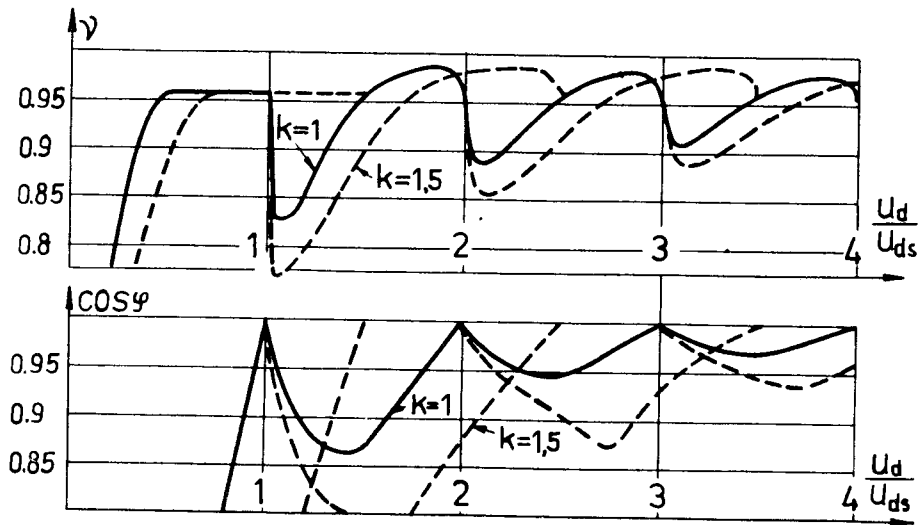


Рис. 5. Зависимости  $\eta$  и  $\cos \phi$  для установки по блок-схеме 1а.

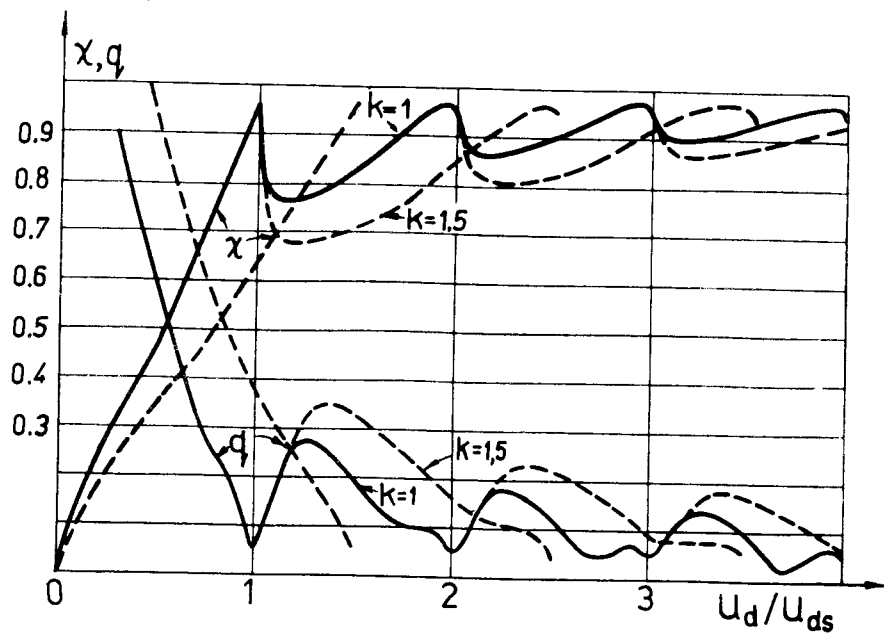


Рис. 6. Зависимости  $\chi$  и  $q$  для установки по блок-схеме 1а.

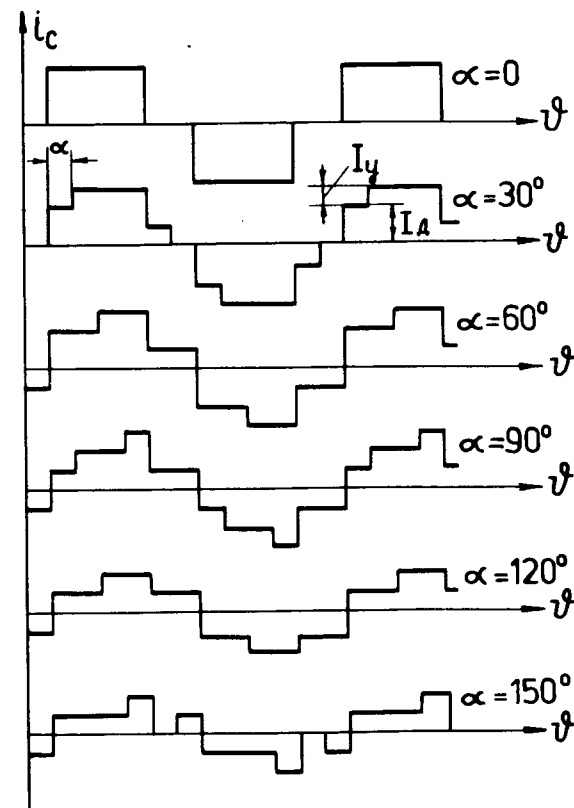


Рис. 7. Временные диаграммы фазного тока, потребляемого установкой по блок-схеме 1б.

$\cos \phi$  определяется из соотношения /34/ при  $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ ,

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{i + k \cos \alpha}{\sqrt{i^2 + k^2 + ik(2 - 3 \frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /44/$$

при  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ ,

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{i + k \cos \alpha}{\sqrt{i^2 + k^2 + 3ik(1 - 2 \frac{\alpha}{\pi})}}, \quad /45/$$

при  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ ,

$$\chi = \frac{3}{\pi} \frac{i + k \cos \alpha}{\sqrt{i^2 + k^2 + ik(1 - \frac{3\alpha}{\pi})}} \quad /46/$$

при  $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  ;  
 коэффициент пульсаций  $q$  определяется из соотношения /36/ во всем диапазоне изменения угла регулирования ( $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ ).

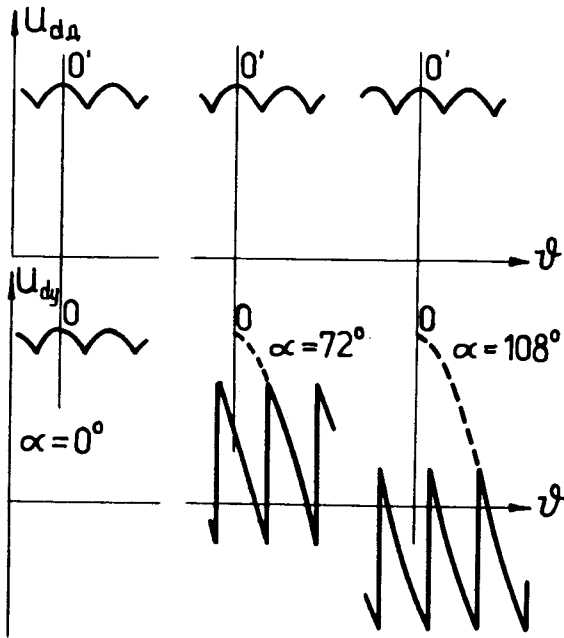


Рис. 8. Временные диаграммы напряжений  $u_{dд}$  и  $u_{dу}$  для установки по блок-схеме 16.

На рис. 9,10 приведены графики зависимостей  $\nu$ ,  $\cos \phi$ ,  $\chi$ ,  $q$ , вычисленные по формулам /34/, /36/, /41/÷/46/ для нескольких значений  $i$  и  $k$ .

Автор благодарит Л.И.Иванникову, выполнившую расчеты на ЭВМ "Найри-2" и оказавшую большую помощь при оформлении рукописи.

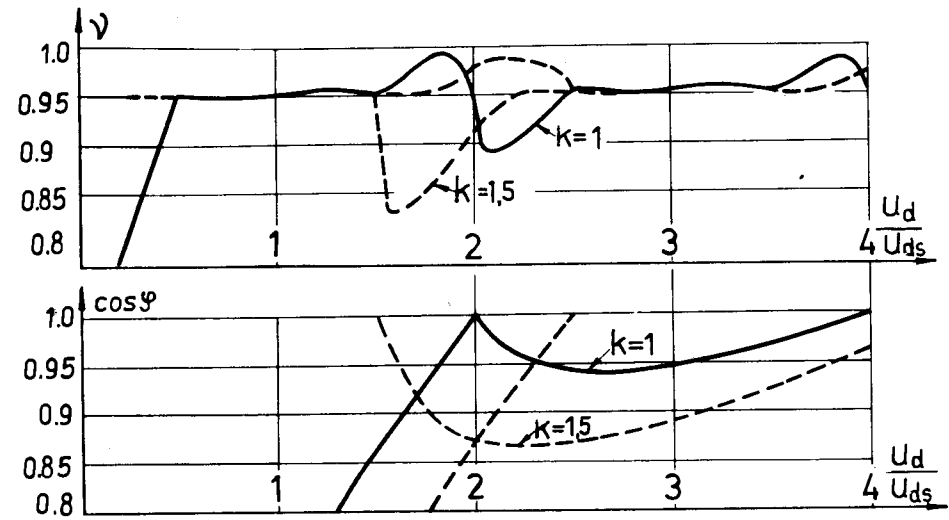


Рис. 9. Зависимости  $\nu$  и  $\cos \phi$  для установки по блок-схеме 16.

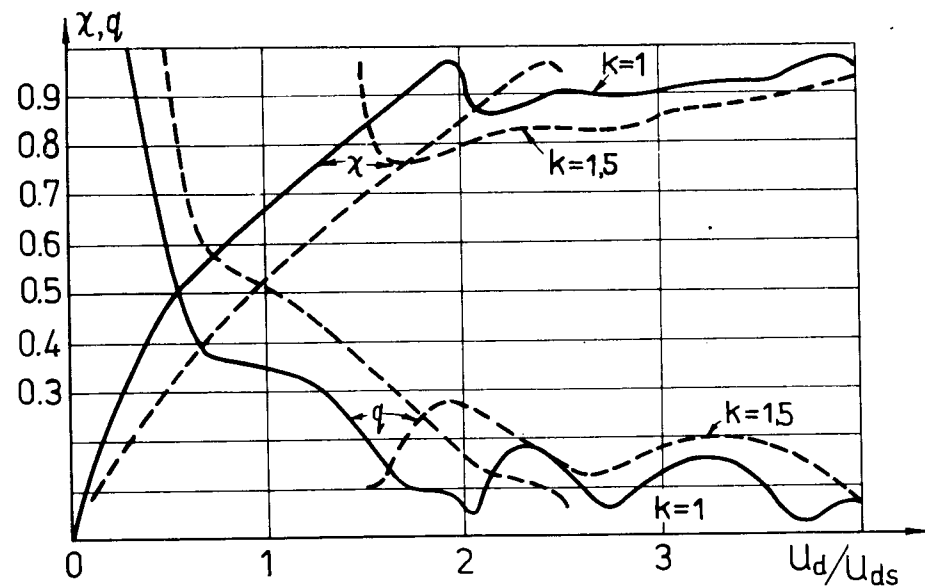


Рис. 10. Зависимости  $\chi$  и  $q$  для установки по блок-схеме 16.

### *Литература*

1. Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, В.А.Пережогин. Препринт ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972.
2. В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-6271, Дубна, 1972.
3. Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, В.А.Пережогин. Сообщение ОИЯИ, 13-6648, Дубна, 1972.
4. А.М.Гусев и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, стр. 118-121, Наука, 1973.
5. В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-6368, Дубна, 1972.
6. М.В.Гельман, С.П. Лохов. Тиристорные регуляторы переменного напряжения. М., Энергия, 1975.
7. Ш.М.Размадзе. Преобразовательные схемы и системы. М., Высшая школа, 1967.
8. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике. М., Наука, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 марта 1976 года.