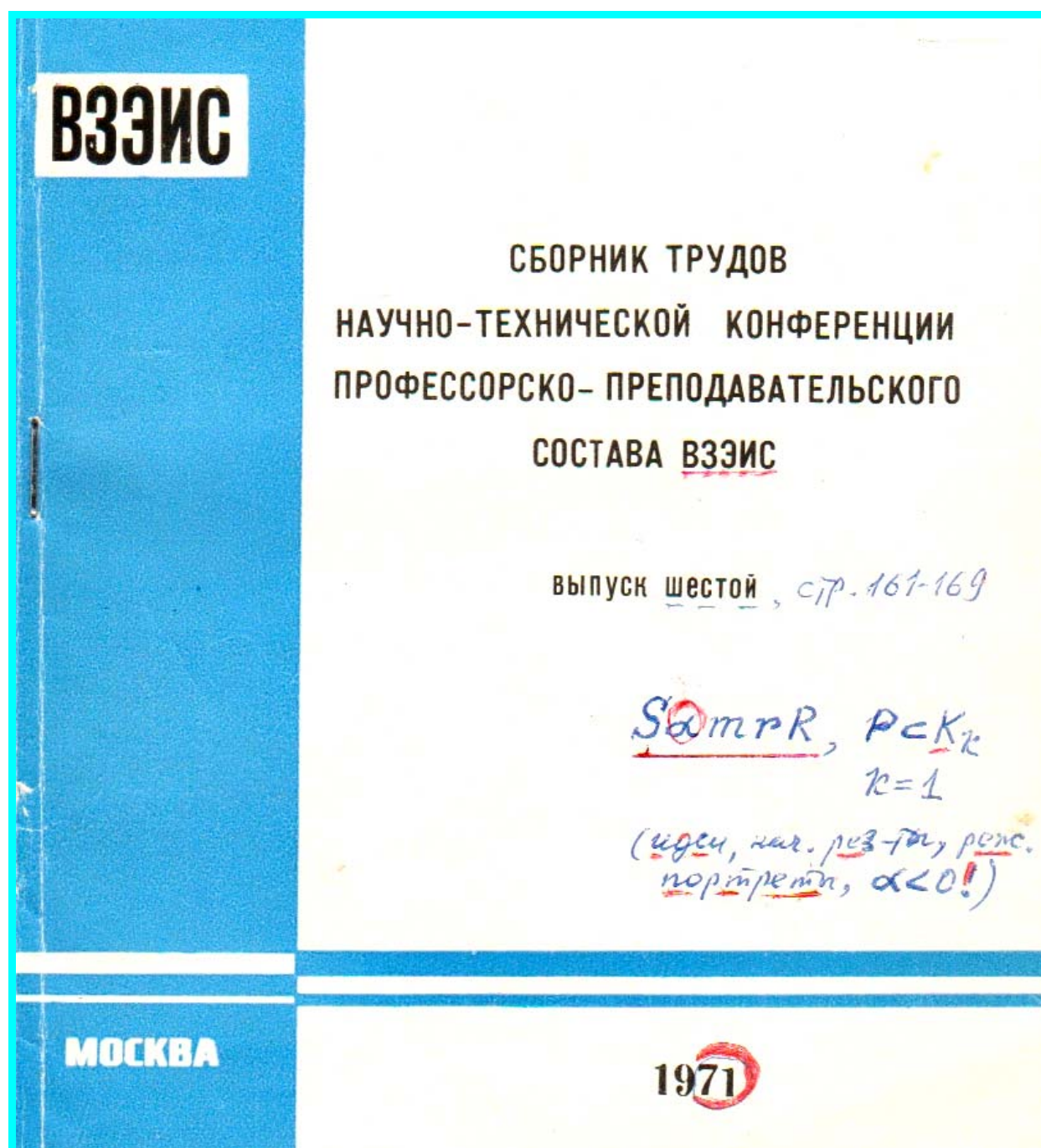


А. М. Репин. Первое авторское исследование управляемых БВК ЭЭ класса  $S_{\alpha m}(\text{Л})rR$ . / *Repin A. M. Research of BVPC class  $S_{\alpha m}(\text{Л})rR$* . Вариант 2.

**Анонс.** С признательностью профессорам, докторам наук А.А. Пирогову и В.Н. Аксёнову впервые при авторском сканировании, дизайне и в цвете<sup>1</sup> приведены в электронной версии первые (1960-х годов) результаты авторского исследования электрических процессов базовых схем управляемых  $m$ -фазных вентильных конвертеров электроэнергии (БВК ЭЭ) при их работе в первом коммутационном режиме на активную нагрузку при учёте активных внутренних сопротивлений, в частности резисторов. Впервые результаты кратко представлены в 1968 году на кафедре Радиопередающих устройств и источников электропитания ВЗЭС. Доложены на апрельской НТК ППС в 1969 году. Опубликованы в марте-апреле 1971 года. Частично приведены в кандидатской и докторской диссертациях автора в 1971 и 1986 годах. И с тех пор не переиздавались в связи с уже тогда же образованным застоем в конверсике и других областях. Особенно усиленным в последнюю четверть века разрушительных т.н. рыночных условий.



<sup>1</sup> Чёрно-белый E-вариант см. в <http://econf.rae.ru/article/10114>.

## Редакционная коллегия

Проф. В.Н. Аксенов (председатель редакционной коллегии), проф. И.А. Подгородецкий, проф. А.А. Вишневский, проф. С.Н. Кризе, проф. К.Е. Кульбацкий, проф. Н.Т. Петрович, проф. А.Д. Харкевич, проф. М.Р. Шебес, доц. А.П. Ефимов, доц. С.А. Заманский, доц. Б.П. Павлов, доц. Н.А. Семенов.

Ответственный секретарь С.А. Старшинова

Доклады, публикуемые в настоящем сборнике, сделаны на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ВЗЭИС в апреле 1969 года.

---

---

СБОРНИК  
ТРУДОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА ВЗЭИС

Выпуск 6

Редактор С.А. Старшинова  
Корректор О.Ф. Чеховская

---

Подписано в печать 30/III-71г., Л-47983, п.л. 13,5, изд. №89, т. 600, зак. тип. № 207, цена 67 коп.

---

Типография ВЗЭИС. Москва, Е-24, Авиамоторная, 8.

А.М.Репин

УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В СХЕМЕ  $m$  - ФАЗНОГО ВЫПРЯМ-  
ЛЕНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ВЕНТИЛЯМИ

Схема замещения приведена на рис.1а<sup>x</sup>). Вентили схемы - управляемые. Угол управления  $\alpha_1$  отсчитывается от момента прохождения через нуль (с положительной производной) э.д.с. фазы, в которую включен вентиль, вступающий в работу (рис.1). Как и при неуправляемых вентилях в общем случае за интервал повторяемости  $\gamma_n = 2\frac{\pi}{m}$  будут иметь место два интервала работы схемы: 1) интервал  $\mathcal{K}$  - интервал коммутации, когда в работе участвует более одного вентиля одновременно (более одной фазы); 2) интервал  $\mathcal{H}$  - интервал нормальной, одиночной работы фазовых э.д.с. (внекоммутационный интервал).

Рассмотрим работу в этих интервалах для схем с числом  $m \geq 3$ <sup>xx)</sup>. Для схем с  $m=1$  и  $m=2$  при  $\alpha_1 > 0$  сразу имеет место режим прерывистого выпрямленного тока.

Используя соотношения установившегося процесса при неуправляемых вентилях [Л.1], получаем зависимость для наименьшего значения  $\alpha_{1H}$  угла регулирования

$$\operatorname{tg} \alpha_{1H} = \frac{\sin 2 \frac{\pi}{m}}{n - 2 \sin^2 \frac{\pi}{m}} \quad (I)$$

x/ Работа мостовых схем принципиально не отличается от рассматриваемой. Некоторые их особенности приведены в тексте.

xx/  $m$  показывает число импульсов воздействия на нагрузку за период сети.

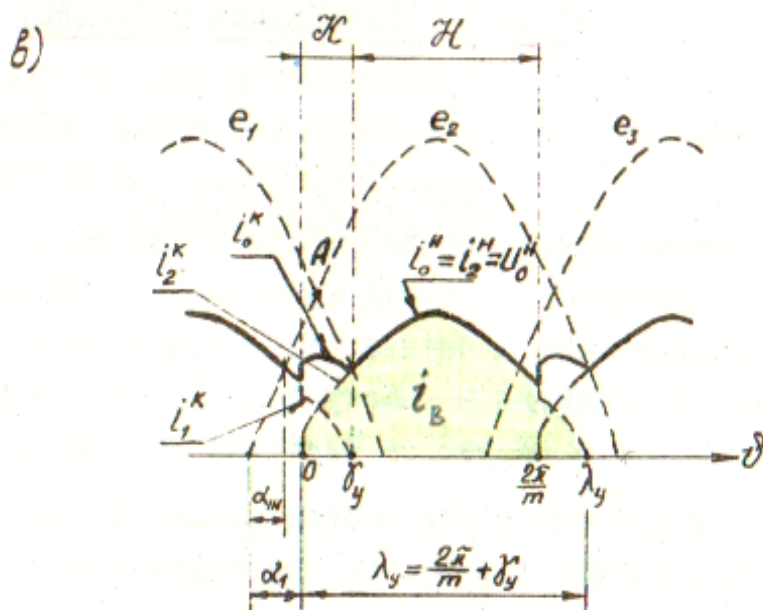
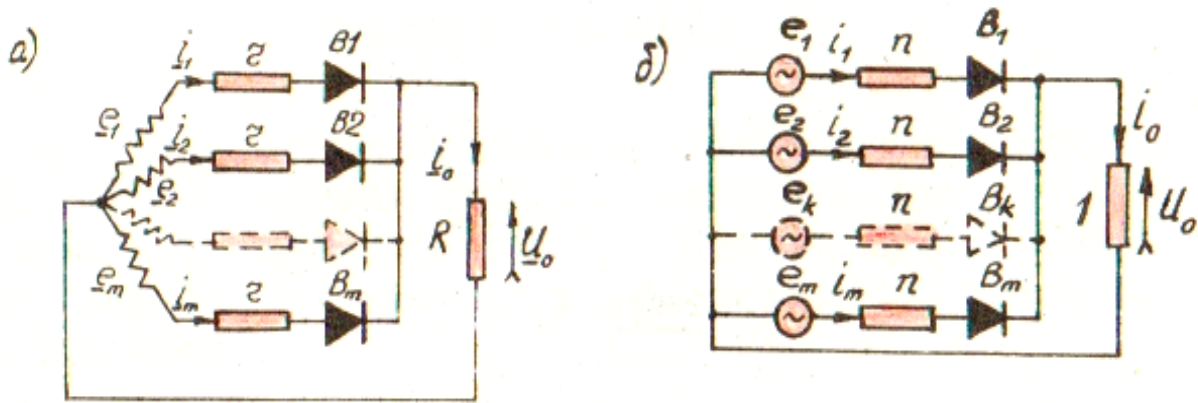


Рис. I. а) схема замещения многофазного выпрямителя (первичная обмотка не указана); б) ее относительный эквивалент; в) диаграмма токов и напряжений

При  $\alpha_1 \leq \alpha_{1H}$  вентили работают как неуправляемые. Рассмотрим процессы при  $\alpha_1 > \alpha_{1H}$ . Анализ проведем в относительных единицах. За основания принимаем амплитуду напряжения питающей сети  $\underline{U}_g = \underline{\varepsilon}_a$  и ток  $\underline{i}_g = \frac{\underline{\varepsilon}_a}{R}$ . Связь между относительными и абсолютными (отмеченными чертой снизу) величинами для любых токов и напряжений

$$\underline{u} = \frac{\underline{u}}{\underline{\varepsilon}_a}; \quad \underline{i} = \frac{\underline{i}}{\underline{\varepsilon}_a / R}.$$

Относительный эквивалент (ОТЭ) [Л.2] схемы рис.1а представлен на рис.1б. Диаграмма токов и напряжений в ОТЭ приведена на рис. рис.1в ( $m=3$ ).

Интервал  $\mathcal{K}$  ( $0 \leq \vartheta = \omega t \leq \gamma_y$ ).

Предположим, что в этом интервале начинает работу вентиль В2 (рис.1а,б). Исходные уравнения запишутся для ОТЭ

$$\left. \begin{aligned} i_0^{\kappa} &= i_1^{\kappa} + i_2^{\kappa} \\ e_1 - n i_1^{\kappa} &= i_0^{\kappa} \\ e_2 - n i_2^{\kappa} &= i_0^{\kappa} \\ i_0^{\kappa} &= u_0^{\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $e_1 = \sin(\vartheta + 2\frac{\pi}{m} + \alpha_1)$ ;  $e_2 = \sin(\vartheta + \alpha_1)$ ;

$n = \gamma/R$  - относительное внутреннее сопротивление;

$\gamma$  - внутреннее сопротивление сети, трансформатора и вентиля, приведенное к стороне выпрямленного тока;

$R$  - сопротивление нагрузки;

$\gamma_y$  - угол коммутации регулируемого выпрямителя.

Решая (2), получаем

$$i_1^{\kappa} = \frac{(1+n) \sin(\vartheta + 2\frac{\pi}{m} + \alpha_1) - \sin(\vartheta + \alpha_1)}{n(n+2)} ; \quad (3)$$

$$i_2^{\kappa} = \frac{(1+n) \sin(\vartheta + \alpha_1) - \sin(\vartheta + 2\frac{\pi}{m} + \alpha_1)}{n(n+2)} ; \quad (4)$$

$$i_0^{\kappa} = \frac{2 \cos \frac{\pi}{m}}{n+2} \sin(\vartheta + \frac{\pi}{m} + \alpha_1) \quad (5)$$

Наибольшее значение выпрямленного тока (максимум) будет при  $\vartheta + \frac{\pi}{m} + \alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ . Откуда

$$\theta_m = \psi_0 - \alpha_1 = \frac{\pi(m-2)}{2m} - \alpha_1$$

Таким образом, при  $\alpha_1 \leq \psi_0$  максимум выпрямленного тока совпадает (как и при неуправляемых вентилях) с моментом пересечения фазовых э.д.с. (точка А рис. Iв). При  $\alpha_1 > \psi_0$  наибольшее значение тока будет при  $\vartheta = 0$ .

Интервал  $\mathcal{H} \left( \delta_y \leq \vartheta \leq 2 \frac{\pi}{m} \right)$

$$i_2^H = i_0^H = U_0^H = \frac{1}{1+k} \sin(\vartheta + \alpha_1) \quad (6)$$

Диаграмма напряжений и токов приведена на рис. Iв. В начале интервала коммутации ( $\vartheta = 0$ ) имеет место скачкообразные изменения токов.

Зависимость для определения угла коммутации  $\delta_y$  получаем из условия  $i_1^k(\delta_y) = 0$

$$\operatorname{tg} \delta_y = \frac{(1+k) \sin\left(2 \frac{\pi}{m} + \alpha_1\right) - \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1 - (1+k) \cos\left(2 \frac{\pi}{m} + \alpha_1\right)} \quad (7)$$

При некотором значении угла регулирования  $\alpha_{1r}$  (назовем его граничным) величина угла коммутации становится равной нулю. Зависимость для  $\alpha_{1r}$  получаем из (7), полагая  $\delta_y = 0$ .

$$\operatorname{tg} \alpha_{1r} = \frac{(1+k) \sin 2 \frac{\pi}{m}}{1 - (1+k) \cos 2 \frac{\pi}{m}} \quad (8)$$

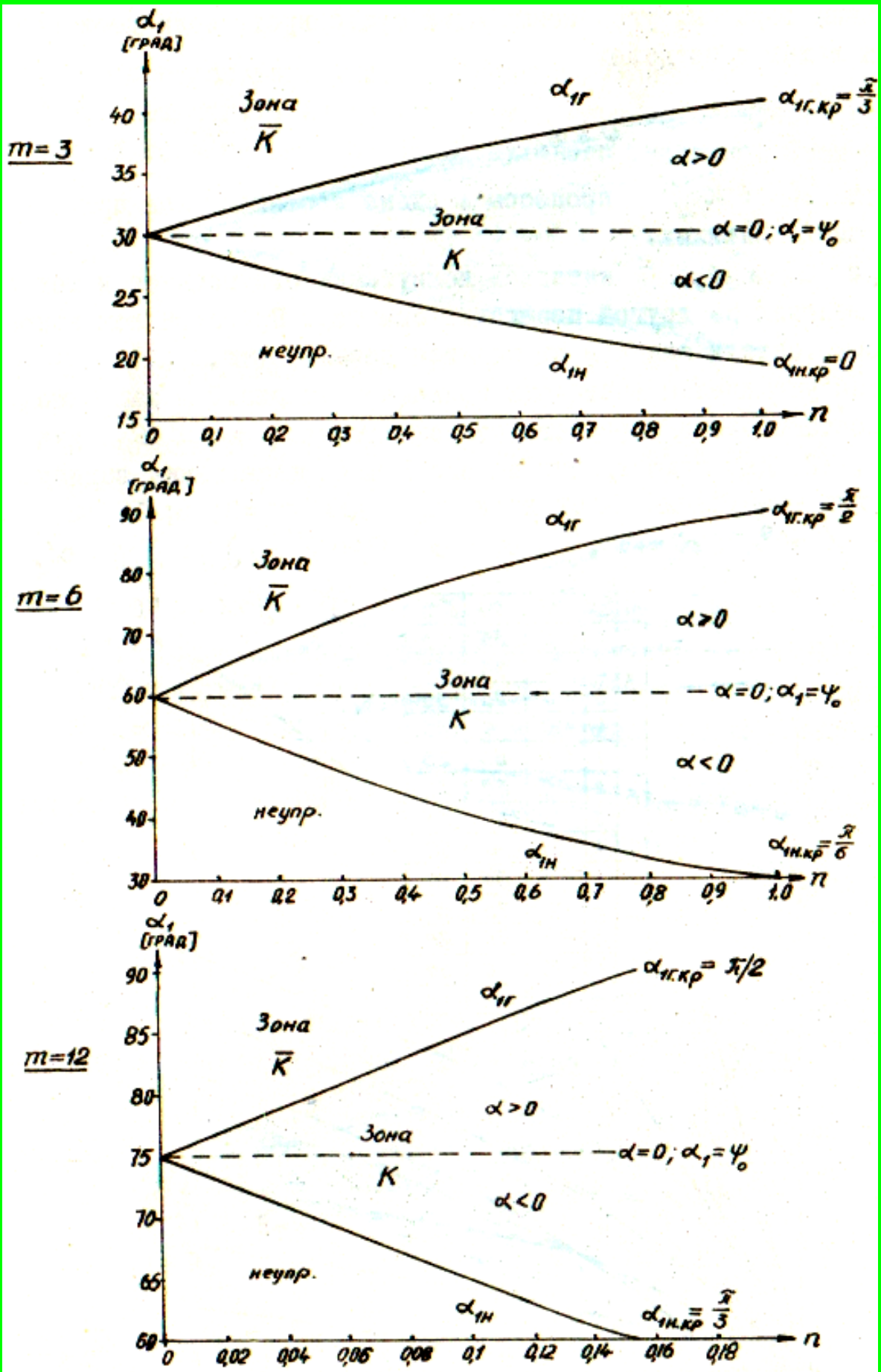


Рис.2. Зоны управления вентилями для разного числа фаз

Таким образом, угол коммутации существует, если угол регулирования лежит в пределах

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_{1r}$$

При  $\alpha_1 \leq \alpha_{1H}$  процессы в схеме протекают как при неуправляемых вентилях.

При  $\alpha_1 \geq \alpha_{1r}$  интервал коммутации отсутствует и ток с одного вентиля на другой переходит скачком. При этом ток закрывающегося вентиля скачком становится равным нулю.

Зоны управления вентилями приведены на рис.2 в зависимости от относительного внутреннего сопротивления  $n = r/R$  для  $m=3; 6; 12$ . Для иллюстрации на рис.3 приведена также зависимость угла коммутации  $\gamma_y$  от величины  $n$  для  $m=3; 6; 12$  и углов  $\alpha = 0^\circ, \alpha = +5^\circ, \alpha = -5^\circ$ . причём,  $\gamma_y = \delta/2 - \alpha$ , где

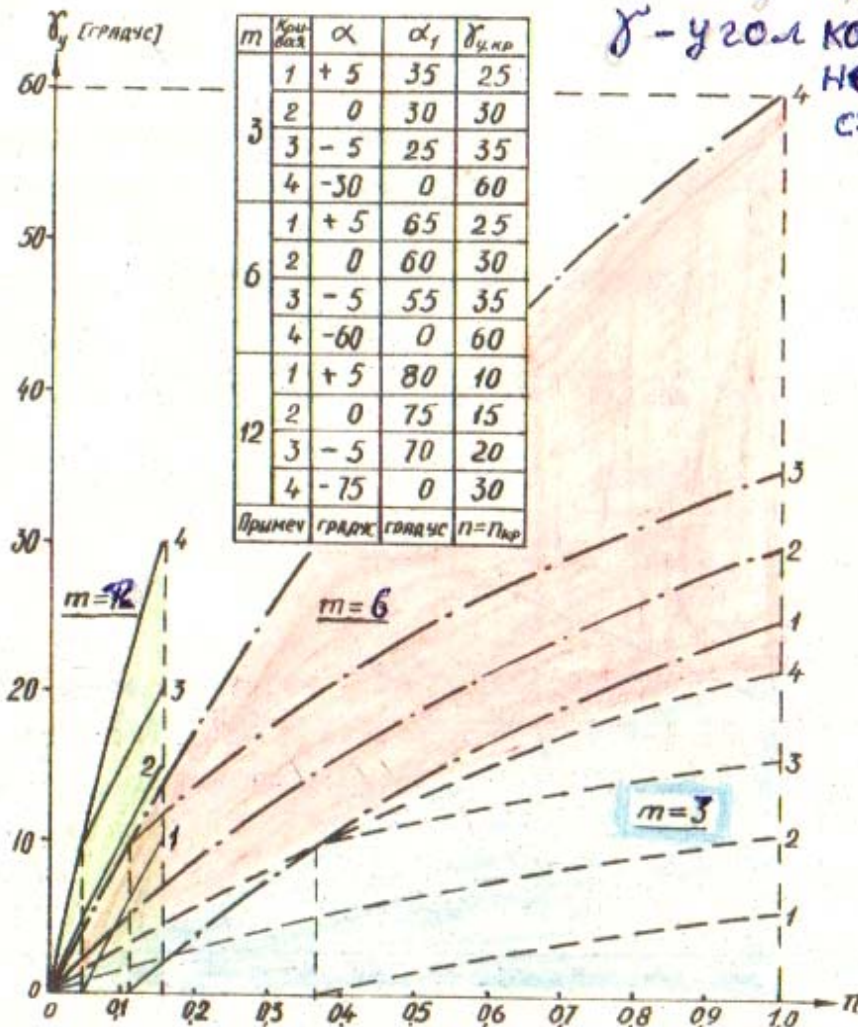


Рис.3. Зависимости угла коммутации от относительного сопротивления фаз при различных углах регулирования и числе фаз



Начиная с некоторого значения угла регулирования  $\alpha_{1K}$  (назовем его конечным), выпрямленный ток становится прерывистым, т.е. в кривой тока появляются паузы нулевого значения. Этот угол равен

$$\alpha_{1K} = 2\psi_0 = \frac{\pi(m-2)}{m} \quad (9)$$

Обычно угол регулирования  $\alpha$  отсчитывают право по оси времени от момента пересечения фазовых э.д.с., т.е. точка А рис.1в соответствует углу  $\alpha = 0$ , или, в принятом здесь обозначении,  $\alpha_1 = \psi_0$ . Связь углов  $\alpha_1$  и  $\alpha$  очевидна

$$\alpha_1 = \alpha + \psi_0$$

Итак, для общепринятого отсчета угла регулирования  $\alpha$  интервал коммутации имеет место как при положительных углах регулирования ( $0 \leq \alpha \leq \alpha_{1r} - \psi_0$ ), так и при отрицательных углах регулирования ( $\alpha_{1H} - \psi_0 < \alpha \leq 0$ ).

Определим среднее значение выпрямленного тока (напряжения)

$$I_0 = U_0 = \frac{1}{2\frac{\pi}{m}} \left[ \int_0^{\sigma_y} i_0^k d\vartheta + \int_{\sigma_y}^{2\frac{\pi}{m}} i_0^H d\vartheta \right]$$

Подставив входящие сюда токи из (5) и (6), после интегрирования и преобразования получаем

$$I_0 = U_0 = \frac{m}{\pi} \left[ \frac{2\cos\frac{\pi}{m}}{n+2} \sin\frac{\sigma_y}{2} + \frac{\sin(\frac{\pi}{m} - \frac{\sigma_y}{2})}{n+1} \right] \sin\left(\frac{\pi}{m} + \alpha_1 + \frac{\sigma_y}{2}\right) \quad (10)$$

Среднее значение тока вентиля определяется как  $I_B = \frac{I_0}{m}$

Для мостовой схемы Ларионова следует брать  $m = 3$ .

Отметим, что все изложенное выше справедливо для относительного внутреннего сопротивления

$$0 \leq \mu \leq \mu_{кр}$$

Критическая величина  $\mu_{кр}$ , определяющая режим, когда выключательный интервал отсутствует, для разного числа фаз составляет

$m$	3	6	12
$\mu_{кр}$	$\infty$	1	0,155

При величине  $\mu > \mu_{кр}$  число ветвей, участвующих в коммутации, увеличивается, и результаты, полученные выше, теряют смысл.

Исследование процессов в закритическом ( $\mu > \mu_{кр}$ ) режиме принципиальных затруднений не представляет (здесь не приводится), но может быть выполнено на основе данной работы.

### Выводы

Исследованы установившиеся процессы в  $m$ -фазной схеме выпрямления с управляемыми вентилями (или регулируемым выходным напряжением трансформатора). Получены выражения для начального, граничного и конечного угла регулирования, определяющие наличие интервала коммутации, его отсутствие и режим прерывистого тока. Показана возможность работы схемы при отрицательных углах регулирования.

168

### Литература

1. Репин А.М. Влияние активного сопротивления трансформатора и ветвей на процессы в схеме  $m$ -фазного выпрямления, доклад НТК, посвященной Дню Радио, МЭИС, 1968. Сборник трудов МЭИС, 1969.
2. Репин А.М. Переходные процессы в многофазном преобразователе с конечной катодной индуктивностью, доклад НТК, посвященной Дню Радио, МЭИС, 1969. Сборник трудов МЭИС, 1969 (в печати).

169

© А.М. Репин. 1968, -69, -71, -86. 2013. 2.6.-29.7.2016