

Обратное напряжение на вентиле.

В закрытом (непроводящем) состоянии к вентилю приложено напряжение обратной полярности, называемое обратным. Это напряжение представляет собой алгебраическую разность между  $\varepsilon_{гс}$  фазы, в которую включен вентиль, и выпрямленным напряжением (см. рис 1б). Максимальная величина обратного напряжения и его форма зависит от схемы выпрямления. Для трехфазной схемы и мостовой схемы Ларионова амплитуда обратного напряжения равна амплитуде линейного напряжения  $\varepsilon_{мл}$  (при  $n=0$ ). При  $n \neq 0$  амплитуда обратного напряжения снижается. Для  $m=6; n=12$  (схемы выпрямления с нулевой точкой) амплитуда обратного напряжения равна двойной амплитуде  $\varepsilon_{гс}$  фазы (при  $n=0$ ) и т.д. На рис. 3а для иллюстрации приведена кривая обратного напряжения на вентиле для  $m=3$  при  $n=0$  и  $n \neq 0$ . Учитывая, что холостой ход выпрямителя возможен в любой схеме, следует, в общем случае, выбирать вентили по амплитуде обратного напряжения для случая  $n=0$ , т.е. как при чисто омической нагрузке.

Мощность потерь в вентиле.

Потери энергии в вентиле разделяются на два вида: а) прямые потери – от воздействия прямого тока вентиля, б) обратные потери – от воздействия обратного напряжения (тока). Аппроксимируя истинную характеристику вентиля\* (рис 3б) ломаной линией, получаем выражения для определения мощности прямых ( $P_n$ ) и обратных ( $P_o$ ) потерь в вентиле (Л 3 ) в виде:

$$P_n = \Delta U_{гс} \cdot I_{гс} + R_v I_{гс}^2 \quad (19)$$

$$P_o = \frac{1}{R_v} U_{обр}^2 \quad (20)$$

\*1) Рассматриваются только полупроводниковые вентили.

<sup>1</sup>Стр.1-19 (Ч.1 и Ч.2.1) см. в //НЭА. URL: [www.econf.rae.ru/article/5641./68..](http://www.econf.rae.ru/article/5641./68..)

где:  $\Delta U_g$  определяется по характеристике вентиля (см.рис 6б)

$R_1$  и  $R_2$  - динамические сопротивления, численно равные (см.рис 6б):

$$R_1 = c \operatorname{ctg} \alpha; \quad R_2 = \operatorname{tg} \beta$$

$U_{обp}$  - эффективное значение обратного напряжения

Полная мощность потерь в вентиле

$$P_g = P_n + P_o$$

Общая мощность потерь в вентилях схемы выпрямления

$$P = k_1 P_g$$

где:  $k_1$  - число вентилях в схеме выпрямления.

Коэффициент полезного действия схемы выпрямления.

По общему определению  $\eta$  кпд схемы <sup>находим</sup> как -

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{затp}}$$

где:  $P_{пол}$  - полезная мощность, выделяющаяся в сопротивлении нагрузки  $R$

$P_{затp}$  - затраченная мощность, потребляемая от сети переменного тока.

Очевидно  $P_{затp} = P_{пол} + P_{гр} + P$

где:  $P_{гр}$  - мощность потерь в трансформаторе

$P$  -общая мощность потерь в вентилях

тогда:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{гр} + P}{P_{пол}}} \quad (21)$$

Полезная мощность  $P_{пол} = I_o^2 R$

где:  $I_o$  - эффективное значение выпрямленного тока

Отметим, что в случае  $P_{гр} \gg P$ , потерями в вентилях схемы можно

пренебречь, и выражение для кпд принимает вид:

$$\eta = \frac{1}{1+r} = \bar{\eta}_{вmax}$$

Следовательно, графиком  $\bar{\eta}_{вmax} = f(r)$  можно пользоваться для приближенной оценки кпд схемы.

Выражение для  $\bar{I}_o$  получаем, интегрируя в соответствующих пределах  $\bar{i}_o^+$  и  $\bar{i}_o^-$ . В результате имеем

$$?? \bar{I}_o = \sqrt{\frac{m}{\pi}} \frac{\sin \psi}{2} \sqrt{\left[ \frac{\pi(4-m)}{m} \sin^2 \left( \frac{2\pi}{m} + \psi \right) \right] \frac{1}{\sin^2 \left( \frac{2\pi}{m} + \psi \right)} + \left[ \frac{\pi(m-2)}{m} \sin^2 \left( \frac{2\pi}{m} + \psi \right) \right] \frac{1}{\sin^2 \left( \frac{2\pi}{m} + \psi \right)}} \quad (22)$$

$\xrightarrow{\text{исправлено по К.Н.С.}} \quad \xrightarrow{\text{интеграл}}$

Зависимости  $\bar{I}_o = f(n)$  приведены на рис. 3.4.5 для  $m=3, 6, 12$ .

Отметим, что нередко полезную мощность определяют как  $P_{\text{пол}} = \bar{I}_o \cdot U_o = \bar{I}_o^2 R$ , что является ошибочным и справедливо лишь для чисто постоянного тока (или при достаточно малых его пульсациях).

Величина  $P$  определена выше. Величина  $P_{\text{пр}}$  определяется после расчета трансформатора.

Для случая  $n=0$  имеем  $\psi = \psi_0 = \frac{\pi(m-2)}{2m}$ , и выражение (22)

принимает вид:

$$\bar{I}_o = \sqrt{\frac{m}{2\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{m} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{m}} = \sqrt{m} \bar{I}_e \quad (23)$$

### Порядок расчета схем выпрямления.

Заданными величинами являются:

$\bar{I}_o$  - среднее значение выпрямленного тока (ампер),

$U_o$  - среднее значение выпрямленного напряжения (вольт).

Сопротивление нагрузки  $R = \frac{U_o}{\bar{I}_o}$ .

$\Delta U$  - пульсация выпрямленного напряжения.

#### Расчет

1. Выбирают схему выпрямления, т.е. определяют  $m$ .

2. По заданной величине пульсаций  $\Delta U$  по зависимости  $\Delta U = f(n)$  определяют требуемое  $n$ .

3. По найденному значению  $n$  определяют из графика  $\bar{I}_o$  и нахо-

дят, при известных (заданных)  $R$  и  $\bar{I}_0$ , величину  $\epsilon_m = \frac{\bar{I}_0}{\bar{I}_0} R$  и эффективное значение эдс фазы трансформатора  $e_{эф} = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{2}}$ .

(Для мостовой схемы Ларионова получают линейное напряжение на входе моста. Используют графики для  $m=6$ ).

4. Из графика по  $n$  определяют  $\bar{i}_{в\max}$  и  $\bar{I}_\epsilon$  и находят  $i_{в\max} = \bar{i}_{в\max} \cdot \frac{\epsilon_m}{R}$ ;  $I_\epsilon = \bar{I}_\epsilon \cdot \frac{\epsilon_m}{R}$  и ток фазы трансформатора.

5. Предварительно выбирают тип вентиля по  $U_{обр}$ ;  $\bar{I}_{об} = \frac{\bar{I}_0}{m}$ ;  $i_{в\max}$  и определяют его сопротивление  $R_1$ .

6. Проводят расчёт трансформатора и определяют  $z_{тр}$ .

7. Определяют  $z = z_{тр} + R_1$  \* и уточняют  $n = \frac{z}{R}$ .

8. По уточнённому  $n$  корректируют все величины.

9. Определяют  $P_{тр}$ ,  $P_\epsilon$  и КПД схемы.

### В В О Д Ы

Исследование установившихся режимов в  $m$ -фазных схемах выпрямления при работе на омическую нагрузку с учётом внутреннего активного сопротивления элементов схемы дало возможность выявить ряд принципиальных особенностей работы подобных схем (наличие граничного и критического  $n$  и т.д.), позволило получить расчётные соотношения и дать методику расчёта схем. Контрольные эксперименты полностью подтвердили теоретические выкладки. Работа может служить основой унификации методов расчёта и практического выполнения рассмотренных схем.

Литература:

1. В.Н. Аксенов. "К расчёту управляемого выпрямителя с учётом влияния перекрытия фаз". Электросвязь. 12.1957г.
2. Утевский А.И. "Теория и метод расчёта  $m$ -фазных выпрямителей с ёмкостной фильтрацией" ГЭУ. 1949г.
3. А.С. Богословский. "Силовые полупроводниковые выпрямители". Военное издательство Министерства обороны. 1965 г.

\*) Для однофазной мостовой схемы Греча  $z = z_{тр} + 2R_1$ .  
Для мостовой схемы Ларионова  $z = 2(z_{тр} + R_1)$ .

Из: А.М. Репин. Основные режимы работы вентиляных преобразователей и эффективные практические способы их оценки // ВРЭ. 1991. С. 61-96.

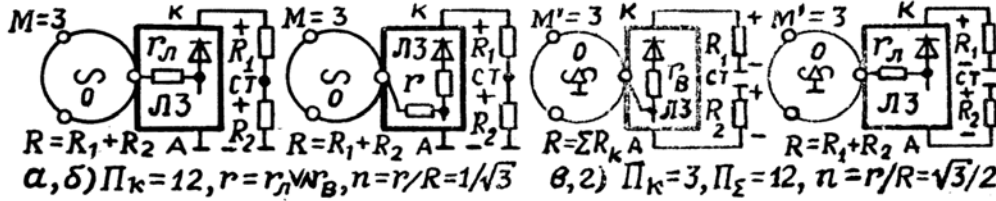
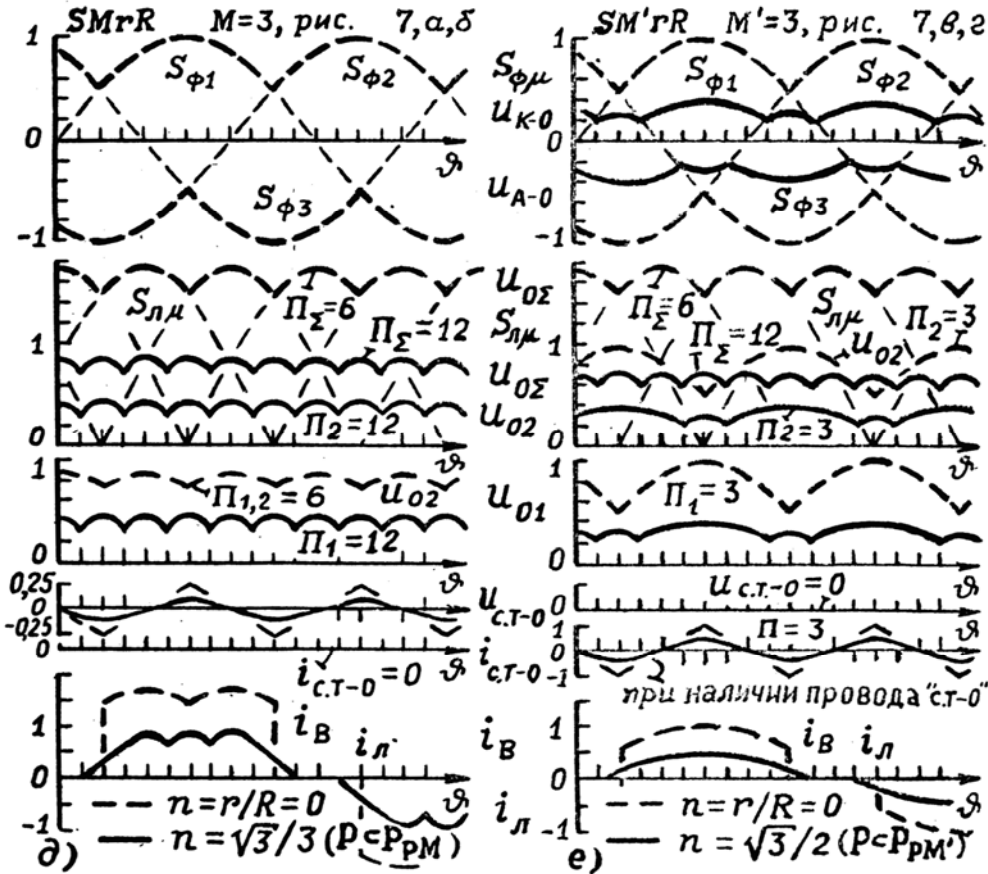


Рис. 7. Резистивные ВК с 3-ячейковыми вентиляльными мостами и средней точкой нагрузки, не соединенной (M=3) (а, б) и соединенной (M'=3) (в, г) с нулевой точкой источника ЭДС, и формы их переменных в идеальном (P < P<sub>ид</sub>, n=0, пунктир) и первом редуцированном (P < P<sub>р1</sub>, n=n<sub>р</sub>, сплошные линии) режимах ([8, 19, 27, 28, 29, 52, 77, 135] при плагиате в [101...110] и замене пат. 56-1877 в [35, с.124] на пат. 56-2502 [103], а также при лучшем КПД в 4 раза, меньшем числе резисторов в 1,7 (при P < P<sub>л</sub>) и ПЭ в 1,3 раза, существенно более простых связях, технологии, меньших габаритах, массе и стоимости, чем в [71])



← Осциллограмма  $U_0$  при  $n = 1/\sqrt{3}$

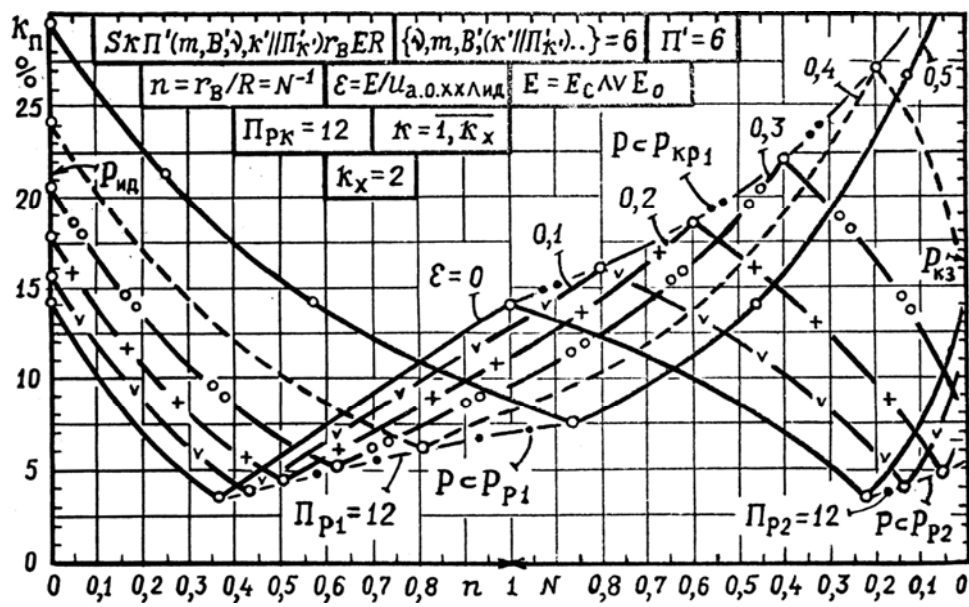


Рис. 7, ж. Универсальные параметрические номограммы коэффициента пульсации неуправляемых резистивных ВК класса  $S_k P'(B', m, \delta, k' // P_k', \dots) r_B ER$  при  $\{P', B', \dots\} = 6$  и работе во всем диапазоне нагрузок от ХХ до КЗ:  $P < P_{ид}$ ,  $P < P_{кр(1,2)}$ ,  $P < P_{р1,2}$

ПРИЛОЖЕНИЕ. Схемы. Диаграммы. Графики

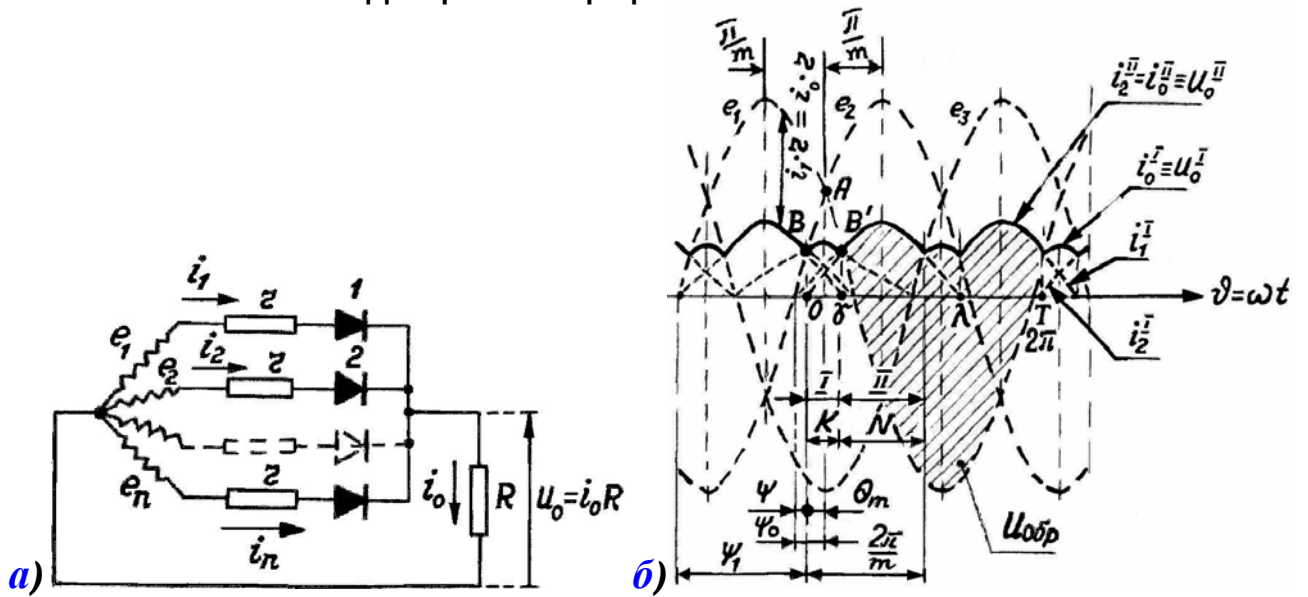


Рис.1.

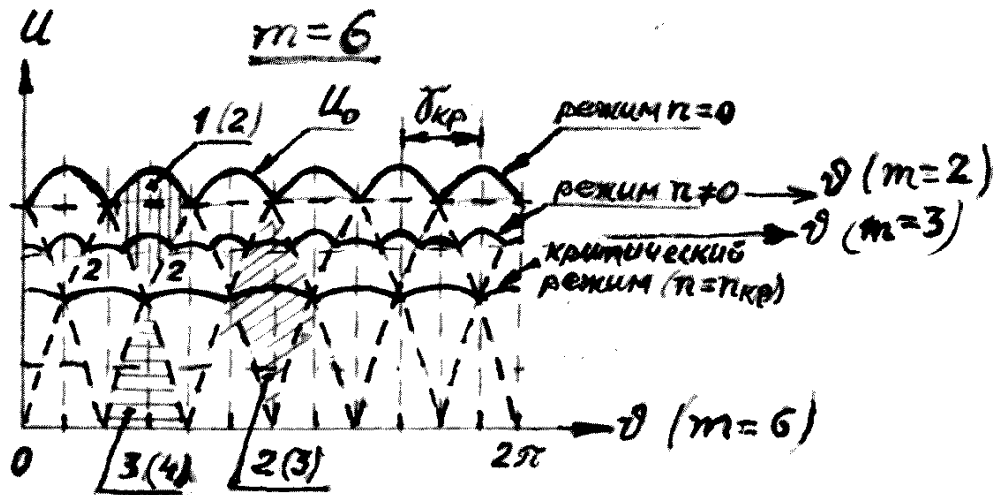
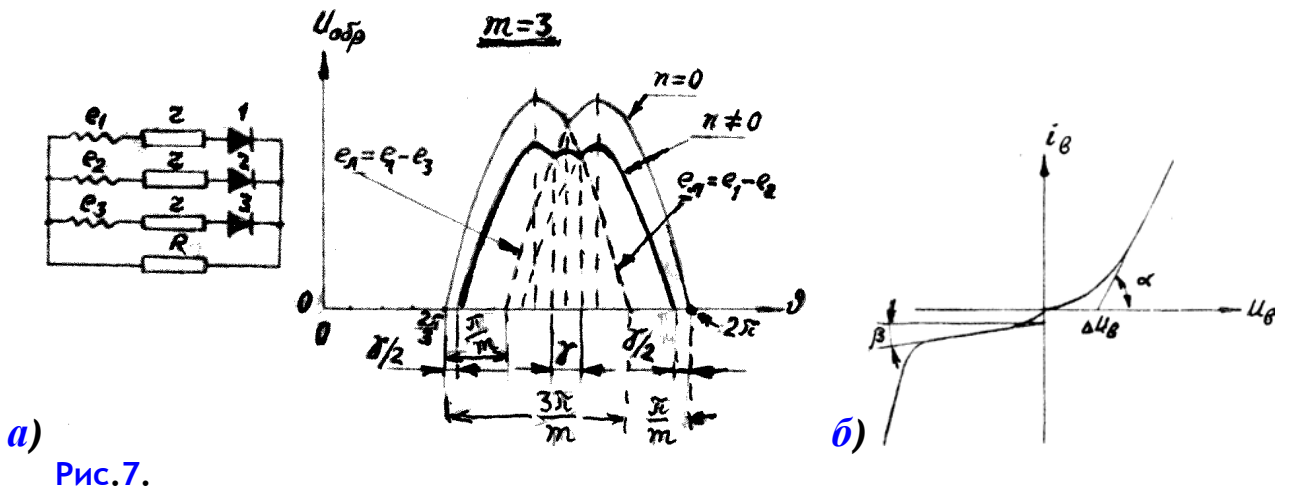


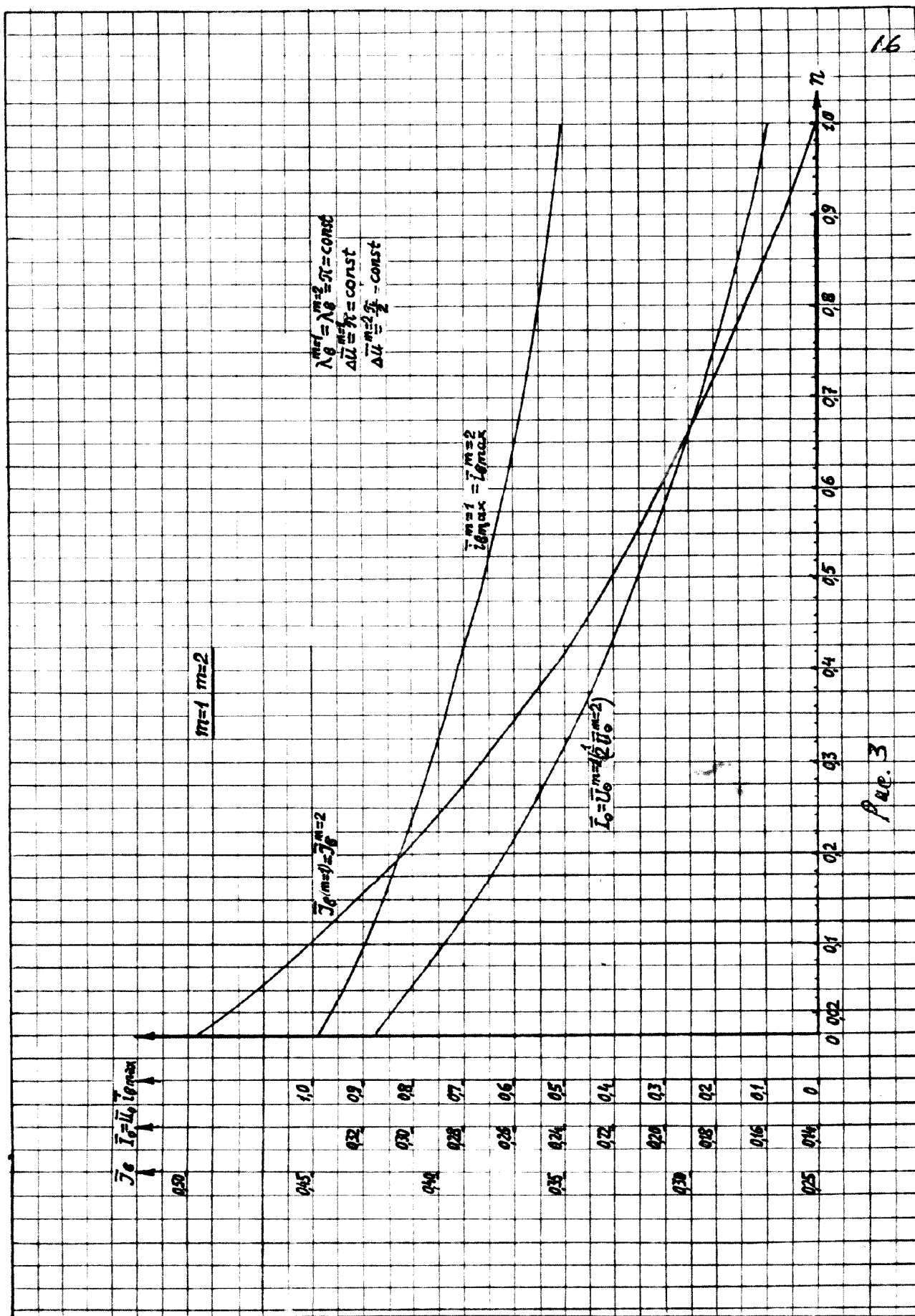
Рис.2.

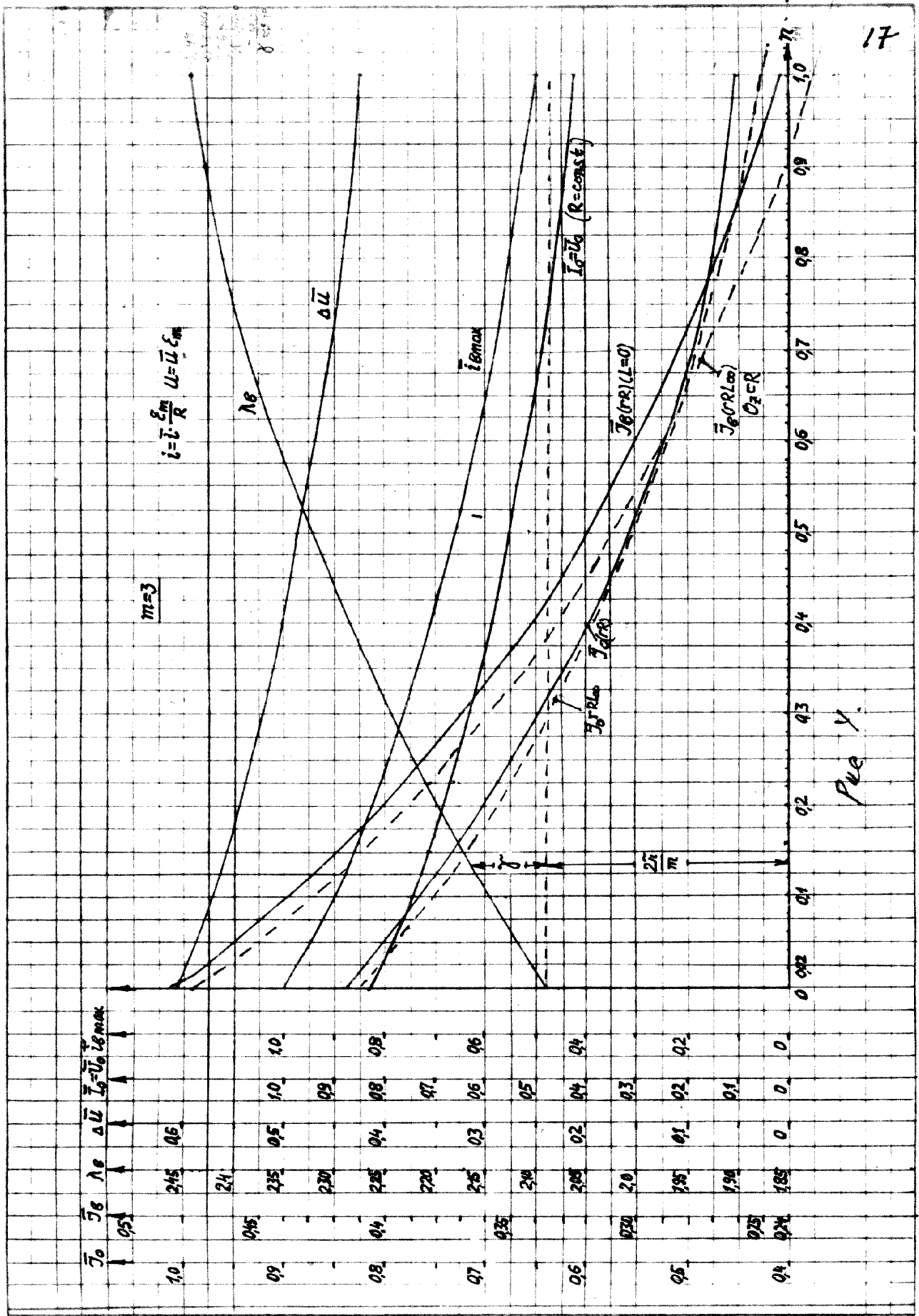


а)

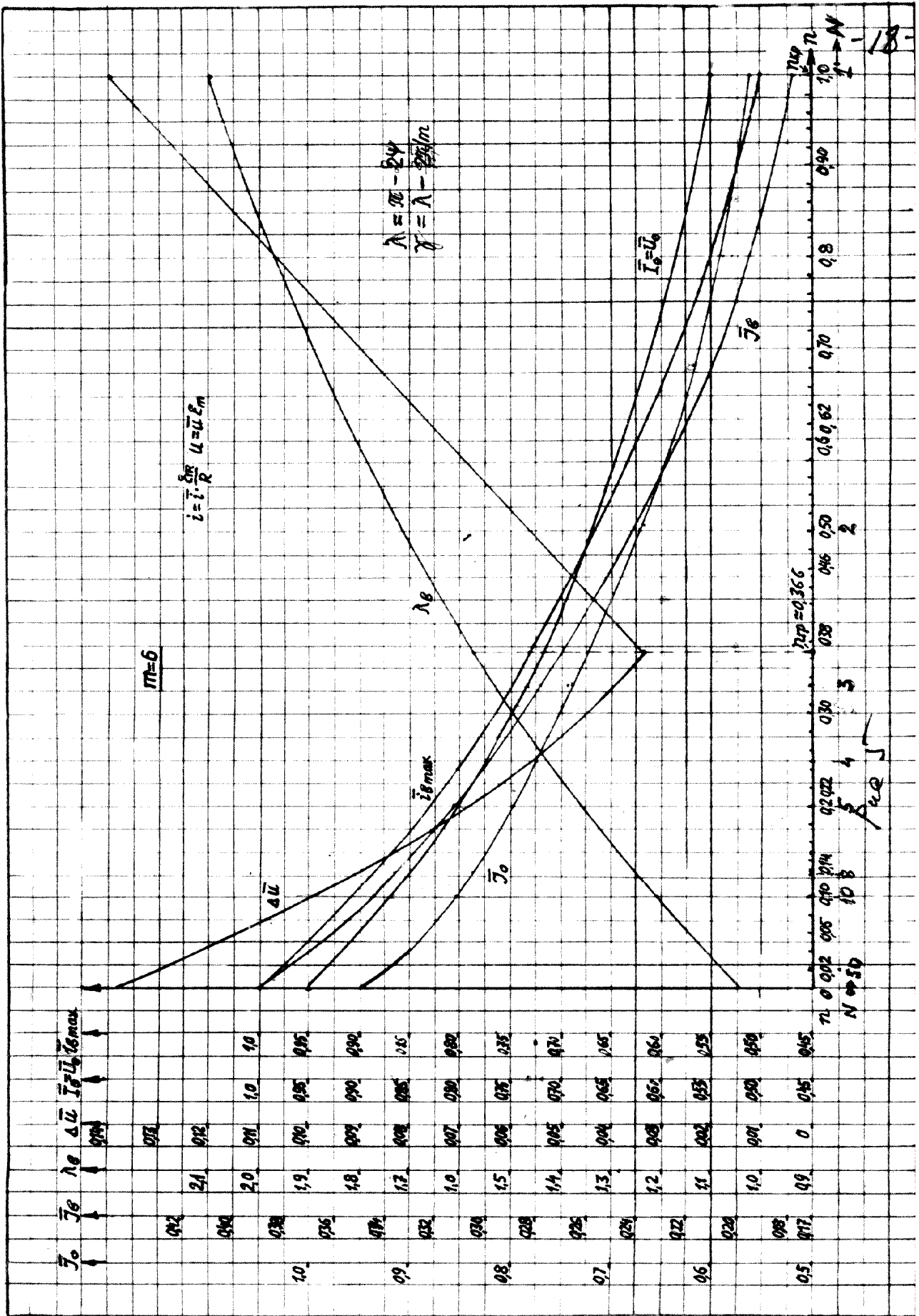
Рис.7.

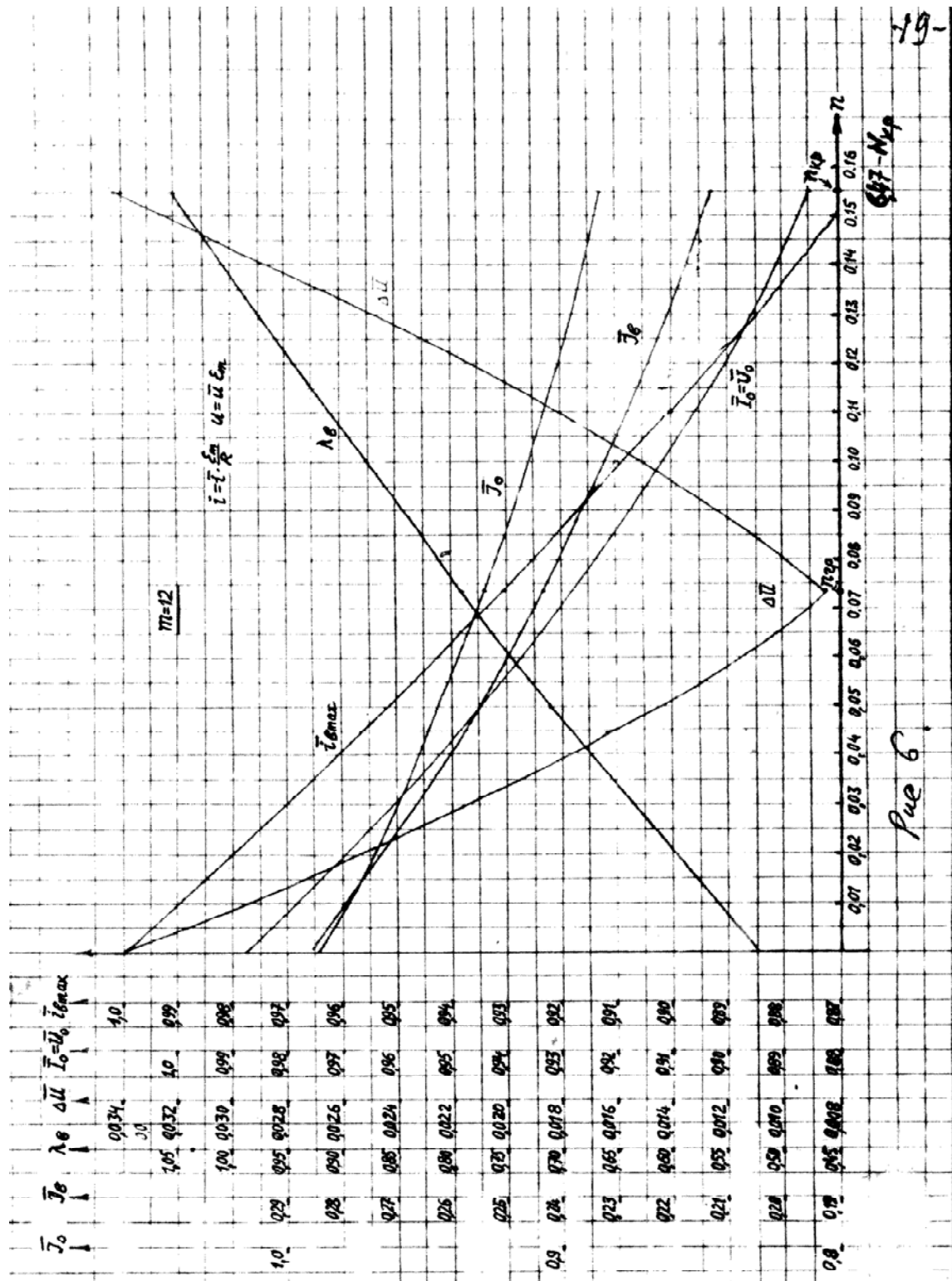
б)











**P.S.** Вспомнился случай. Когда коллега **Кронид Павлович Собинов**, старше по возрасту, скупой на похвалу и уже имевший опыт отношений, в т.ч. горьких, в т.н. научном сообществе, ознакомившись с материалами отчёта, неожиданно сказал: «Это – Ваша будущая **докторская** диссертация». Разговора о диссертации ранее не было. Даже о кандидатской. О докторской, тем более. Как бывает при нормальных отношениях, мы иногда подшучивали. Но взглянув на него, не заметил ни искорок в глазах, ни типичного при шутке выражения лица. Сказано серьёзно. Но мне-то было ясно, что это - обычная работа. Поэтому с шутилой тональностью, соответствующим выражением лица и рук “поблагодарил за столь высокую оценку моих скромных потуг”. Добавив: здесь всё элементарно, но этап кончился, надо срочно сдать отчёт, к тому же, по основным работам тоже кризис со временем, так что орехов предостаточно. К.П.: «Новые физические состояния не каждый день обнаруживают. В т.н. прикладной науке мне не известно ни одного. А орехи устранимы. Они всегда есть. Главное, чтобы не принципиальные». - Спасибо. **Аксёнову В.Н., Белопольскому И.И., Блоху Э.Л., Волкову Ф.Ф., Горбовицкому Р.М., Жекулину Л.А., Лаврову В.М., Нейману Л.Р., Пирогову А.А...**

*Продолжение следует*

© А.М. Репин. 1966–67. 1.11.2011

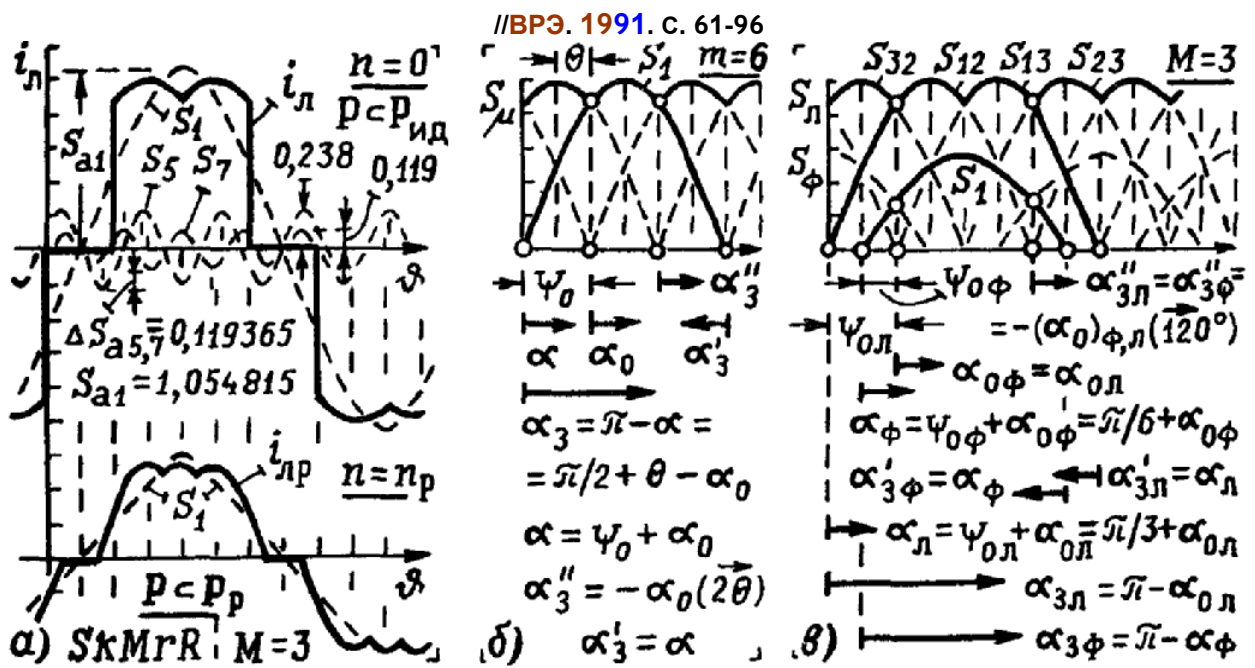
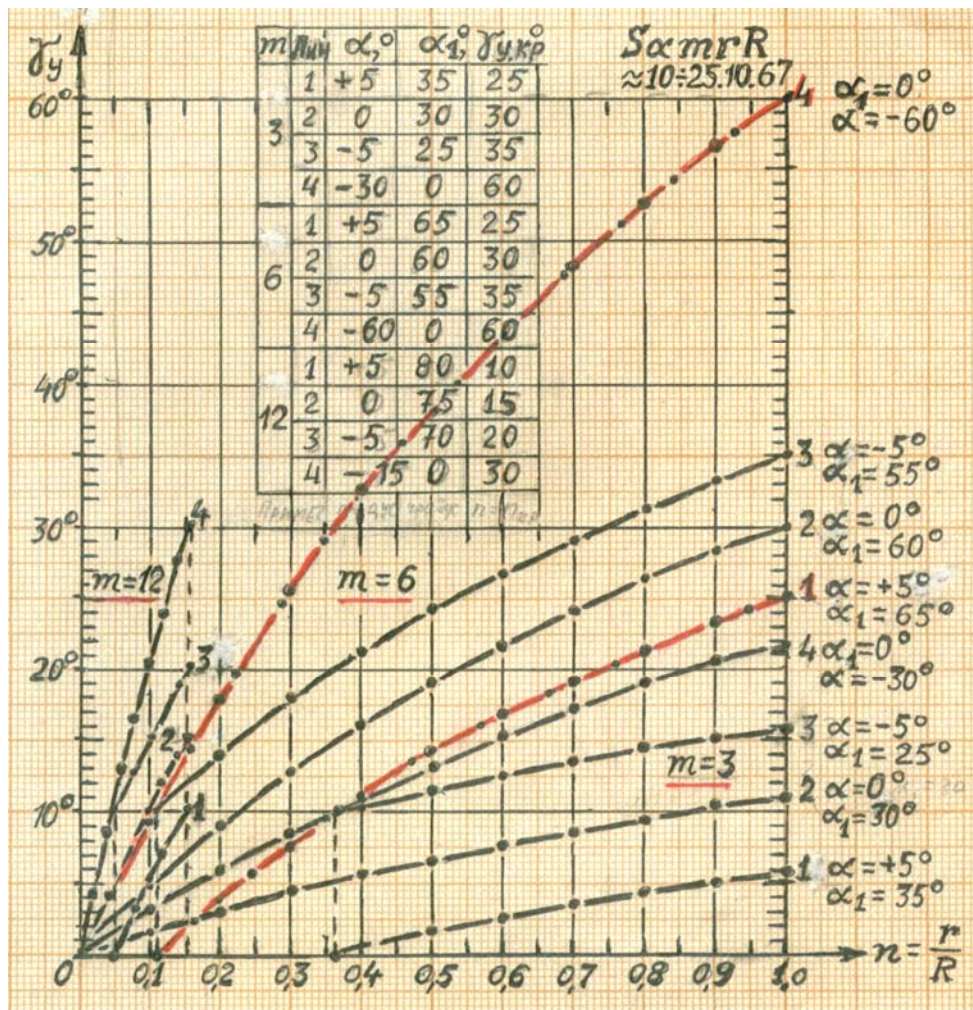


Рис.6.3. Гармоники  $S_1, S_5, S_7$  спектра тока  $i_l$  в режимах  $P < P_{ид}$  и  $P < P_{p1}$  (а) и способ отчета углов управления при  $m=6$  (б) и  $M=3$  (в)



Зависимость угла коммутации. Управляемые схемы класса  $S_{\alpha m r R}$

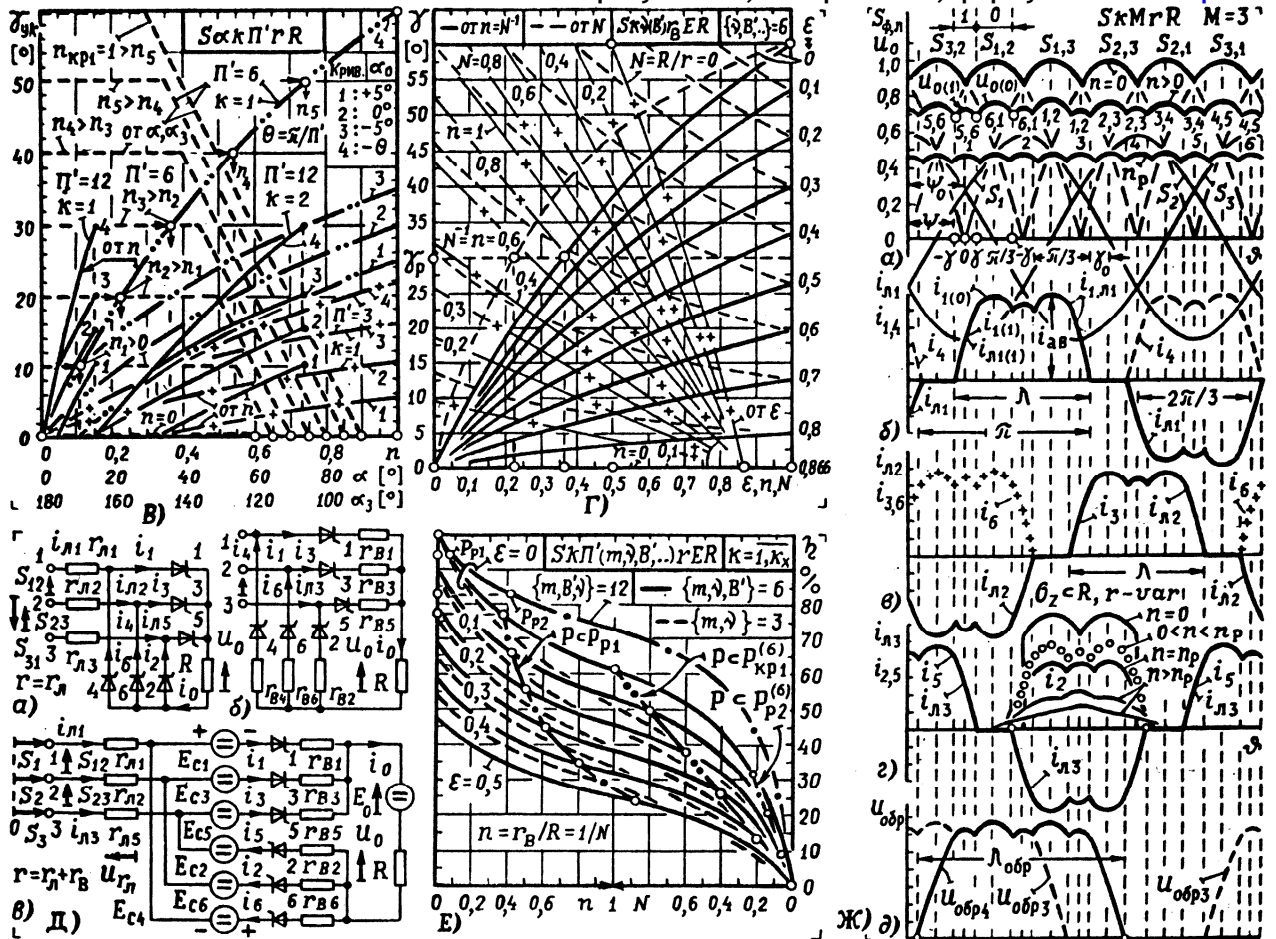


Рис. 6. Параметрическая динамика форм переменных (А,Б,Ж) и универсальные зависимости углов коммутации (В,Г) и КПД (Е) неуправляемых (Г, Е,Ж) и управляемых на закрытие (А,В) и открытии (Б,В) ПЭ мостовой схемы с 3-ячейковым (МЗ, VM3, 1МЗ, ...) вентиляльным мостом (Д,Ж, рис.1,б, 5,а,в,д, 6,3, 7,а..е, 16,В) и  $\{n, \nu, \dots\}$ -лучевых, В'-вентильных кольцевых резистивных ВК (V-, O-, ...) при работе в различных коммутационных, редуцированных, начальных, конечных, промежуточных и критических режимах

67

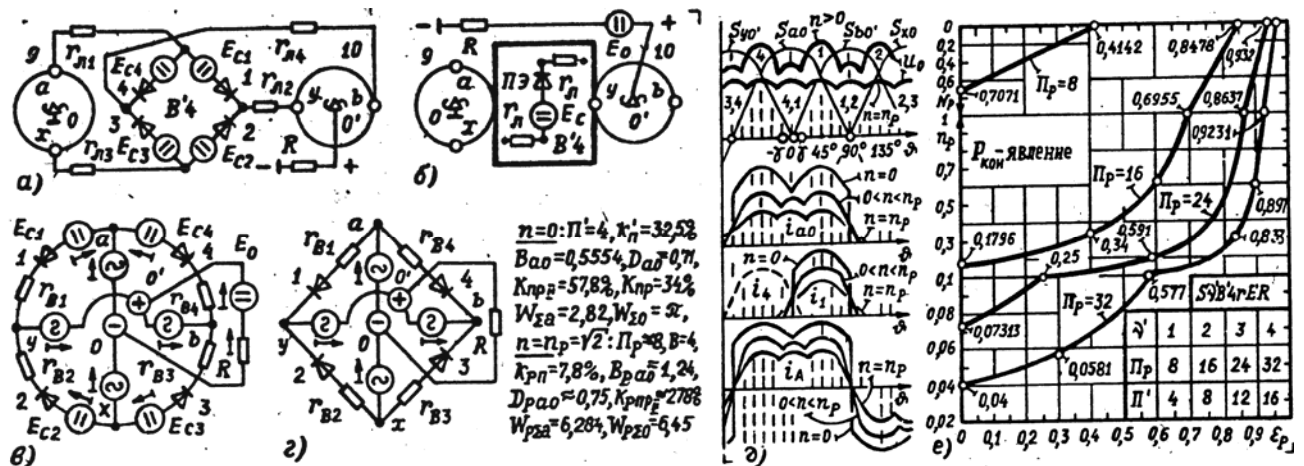


Рис.10. Кольцевой ВВ с источником ортогональных ЭДС и четырехфазным кольцом (а), его упрощенное (блочное) изображение (б) при наличии резисторов  $r_n$  в линиях, противоЭДС  $E_{cm}$  в вентиляльных плечах и  $E_0, R$  в цепи нагрузки - кольцевая, ортогональная схема В'4 класса  $SB'V'4rER$  при  $V'=4, E=E_{cm}(E_c \vee E_0)$ , кс модели с резисторами  $r_B$  (г) и  $E_c, E_0$  (в); параметрическая динамика форм переменных (д) резистивной модели (2) при работе в режимах  $P < P_{pr}$  ( $n = r_B/R = 0$ ),  $P < K_1$  ( $0 < n < n_p$ ),  $P < P_{pr}$  ( $n = n_p$ ), и РЕЖИМНЫЙ ПОРТРЕТ (е) по режиму  $P < P_{pr}$  с P-явлением (д) в кольцевых, ортогональных, интегрированных (КОИ) ВС класса  $S'V'4rER$  при  $r = r_n \vee \lambda r_0$  и  $\nu' = 1,4$  (рис.1,б, 2,б, 2,3, в...е, где  $r_0, r_n$  - ВУТРЕШНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЛИНИЯХ, ПРИСОЕДИНЕННЫХ К ОТВОДАМ И КРАЙНИМ ВЫВОДАМ ИСТОЧНИКОВ ЭДС, СООТВЕТСТВЕННО;  $\nu, \lambda$  - ЗНАКИ "И", "ИЛИ")

Продолжение следует

