

Результаты исследования вентильных схем класса $Sm(L)R/C$
/ Repin A.M. The results of the study of ventil circuits of class $Sm(L)R/C$

Анонс. Даны первоначальные авторские результаты исследования многофазных схем выпрямления с ёмкостным R/C-фильтром. Они получены в 1960-х годах начавшим приобщаться к конверсике автором совместно с коллегой К.П. Собиновым. Оформлены в виде научного отчёта. Исправлены и дополнены автором в то же время. И впервые предлагаются в электронной версии ныне. Как обещанное в econf.rae.ru продолжение цикла авторских работ по вентильным конвертерам электроэнергии.

Арх. № 5788

Литературный архив
РР

RC

 КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО НОРМАЛИЗАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ
ВНИИНМАШ

Т е м а

Переходные процессы в источниках питания и импульсных устройствах

Научный отчёт

Исследование электромагнитных процессов в схеме замещения m -фазного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, шунтированную ёмкостью

SmR/C P-3

Комитет стандартов, мер и измерительных
приборов при Совете Министров СССР

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по нормализации в машиностроении

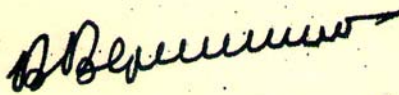
ВНИИНМАШ

Тема: Переходные процессы в источниках питания и
импульсных устройствах.

Научный отчет

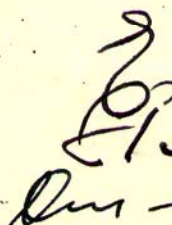
Исследование электромагнитных процессов в схеме заме-
щения m -фазного выпрямителя, работающего на активную
нагрузку, шунтированную емкостью.

Директор института
к.т.н.



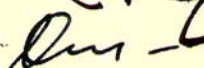
В.Верченко

Зам. директора по
научной части



Е.Панфилов

Начальник отдела № 32

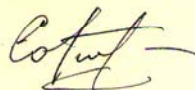


В.Сельский

Руководители темы,
ответственные испол-
нители и исполнители:



А.Репин



К.Собинов

Согласовано:

Начальник научно-
технического отдела



В.Виноградов

Москва
1967 г.

ПРОТОКОЛ № 11

заседания НТС отдела № 31 от 1.9.67 г.

Председатель - начальник отдела № 31 Тетерюков В.А.
Секретарь - инженер Фадеева Г.П.
Члены НТС -
начальник отдела № 32 Сельский В.А.
зам.начальника отдела № 31 Гаврилов А.В.
зам.начальника отд. № 30 Лоттерштейн А.Х.
зам.начальника отдела № 32 Релин А.М.
руководитель темы Собинов К.П.
руководитель темы Подкаминер Л.Л.
ведущий инженер Матусовский А.М.
ведущий инженер Виноградов В.П.

Обсуждён научный отчет "Исследование электромагнитных процессов в схеме замещения m - фазного выпрямителя, работающего на активную нагрузку, шунтированную ёмкостью" по теме "Электромагнитные процессы в источниках питания и импульсных устройствах".

НТС отмечает:

I. Проведён полный анализ указанной системы без учёта внутреннего сопротивления трансформатора и вентилях. Получены аналитические выражения напряжений и токов. Построены расчётные графики. Дана методика расчёта. Выявлено наличие двух принципиальных режимов работы схемы - докритического и критического, определяемых критической величиной ёмкости. Подобный анализ и методика расчёта в литературе отсутствует. Результаты работы найдут применение в практике и теории преобразовательной техники.

2. Работа может быть рекомендована к опубликованию.

3. Работа рекомендуется к утверждению.

Председатель НТС



В.Тетерюков

Члены НТС



В.Сельский



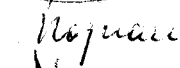
А.Гаврилов



А.Лоттерштейн



А.Репин



К.Собинов



Л.Подкаминер



А.Матусовский



В.Виноградов

"Исследование электромагнитных процессов
в схеме замещения m - фазного выпрями-
теля, работающего на активную нагрузку,
шунтированную емкостью".

АННОТАЦИЯ

В работе выполнен анализ электромагнитных процессов в схеме замещения m - фазного выпрямителя, работающего на параллельную цепь "активное сопротивление - ёмкость". Внутреннее сопротивление трансформатора выпрямителя не учитывается. К указанной схеме сводится обширный круг практических схем из областей выпрямителей, фильтров, вычислительной техники и т.п. На основе анализа дана методика расчёта подобных схем, позволяющая с малыми затратами времени проводить их анализ и практическое исполнение, а так же проводить их унификацию. Работа имеет и теоретическое значение, освещая по новому ряд вопросов преобразовательной техники.

=====

Схема замещения m - фазного выпрямителя с нулевой точкой трансформатора ^{х)} изображена на рис. 1. Первичная обмотка трансформатора не указана. На рис. 2 приведены диаграммы токов и напряжений в рассматриваемой схеме.

Приняты обозначения:

C - ёмкость конденсатора.

R - сопротивление нагрузки.

T_p - m - фазный трансформатор.

$B_1; B_2; \dots; B_k$ - вентили.

$e_1; e_2; \dots; e_k$ - мгновенные значения ЭДС соответствующих фаз трансформатора T_p .

$i_c; i_o; i_e$ - мгновенные значения токов ёмкости, нагрузки R и вентиля соответственно.

$U_o = i_o R = U_c$ - мгновенное значение напряжения на нагрузке R (или на ёмкости C).

$T_m = \frac{2\pi}{m}$ период $T_m = \frac{T}{m}$.

m - число фаз выпрямления.

$\vartheta = \omega t$ - независимая переменная ¹

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота; $f = \frac{1}{T}$ частота; t - время.

ψ - начальная фаза ЭДС e_i .

$\theta_{om}; \theta_{em}; \theta_{cm}$ - ^{момента} $\sqrt{\quad}$ максимума выпрямленного тока, тока вентиля и тока ёмкости соответственно.

λ_e - длительность горения вентиля.

$\bar{I}_o; \bar{I}_e$ - среднее значение выпрямленного тока и тока вентиля соответственно.

^{х)} Работа мостовых схем выпрямления (однофазной и трёхфазной Ларионова) в принципе не отличается от анализируемой. Некоторые особенности работы этих схем отмечены в тексте.

\mathcal{I}_E - эффективное значение тока вентиля.

$U_{обр}$ - мгновенное значение обратного напряжения вентиля.

$\Delta U = U_{оmax} - U_{оmin}$ - пульсация выпрямленного напряжения.

($U_{оmax}$; $U_{оmin}$ - соответственно максимальное и минимальное напряжение на нагрузке).

i_o^I ; i_o^{II} ; i_c^I ; i_c^{II} ; U_o^I и т.д. - мгновенные значения соответствующих токов и напряжений в I и II интервалах.

\bar{i}_o ; \bar{U}_o ; $\bar{U}_{обр}$ и т.д. - мгновенные значения величин в относительных единицах.

e - основание натуральных логарифмов.

I - интервал работы вентиля (вентиль открыт).

II - интервал самостоятельного разряда ёмкости (вентили закрыты).

Вывод основных соотношений

Принимаем следующие допущения:

1. Трансформатор и вентили считаем идеальными, т.е. пренебрегаем внутренним сопротивлением трансформатора и работающего вентиля, а также обратными токами вентиляей.

2. Для анализа установившегося режима достаточно рассмотреть один период $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Как видно из рис. 2 период содержит три интервала:

а) Интервал заряда ёмкости ($0 \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2} - \psi$)

В этом интервале источник с электродвижущей силой (ЭДС) e питает нагрузку R и обеспечивает заряд ёмкости C .

б) Интервал вынужденного разряда ёмкости ($\frac{\pi}{2} - \psi \leq \vartheta \leq \lambda_B$)

В этом интервале нагрузку R питают и источник и конденсатор.

в) Интервал самостоятельного разряда емкости C
 ($\lambda_e \leq \vartheta \leq \frac{2\pi}{\pi}$)

В этом интервале вентили закрыты, источник отключен и нагрузку питает только емкость.

Поскольку возможны только два режима работы схемы в целом, соответствующие двум состояниям вентиля (открытое и закрытое), то и систем уравнений, описывающих процессы, оказывается две, и для анализа процессов достаточно рассмотреть два интервала: Интервал I (рис. 2), когда вентиль открыт и интервал II - интервал самостоятельного разряда конденсатора (вентиль закрыт). Предположим, что в I интервале работает вентиль B_1 . Питаящая ЭДС $e_1 = \epsilon_m \sin(\vartheta + \psi)$, *момент вступления в работу вентиля относительно нуля, возрастающей части синусоиды питающей ЭДС.* где: ϵ_m - амплитуда; $\vartheta = \omega t$; ψ - начальная фаза, (коэффициент трансформации трансформатора принят за единицу).

Интервал I ($0 \leq \vartheta \leq \lambda_e$)

Для выбранных направлений токов (рис. 1) имеем:

$$i_e^i = i_o^i + i_c^i$$

Токи i_o^i и i_c^i определяются как:

$$i_o^i = \frac{e_1}{R} ; \quad i_c^i = C \frac{dU_c}{dt} = \omega C \frac{de_1}{d\vartheta} ,$$

что очевидно, ибо при открытом вентиле B_1

$$U_c^i = U_o^i = e_1 = \epsilon_m \sin(\vartheta + \psi).$$

В итоге получаем

$$i_o^i = \frac{\epsilon_m}{R} \sin(\nu + \psi); \quad i_c^i = \epsilon_m \omega C \cos(\nu + \psi).$$

$$i_B^i = \frac{\epsilon_m}{R} [\sin(\nu + \psi) + \omega RC \cos(\nu + \psi)].$$

Обозначим $\text{tg} \beta = \omega RC$ и перейдем к относительным величинам $\bar{i} = \frac{i}{\frac{\epsilon_m}{R}}; \quad \bar{u} = \frac{u}{\epsilon_m}$.

Выражения для токов и напряжений принимают вид:

$$\text{если: } \text{ctg} \varphi = \omega RC = g,$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi, \text{ то:}$$

$$\bar{i}_o^i = \sin(\nu + \psi). \quad (1)$$

$$\bar{i}_c = \sin(\nu + \psi),$$

$$\bar{i}_c^i = \cos(\nu + \psi) \cdot \text{tg} \beta. \quad (2)$$

$$\bar{i}_c = \text{ctg} \varphi \cos(\nu + \psi),$$

(3.5)

$\lambda - \nu = \pi - \lambda$.

(3.3)

$$\bar{i}_c = \frac{1}{\cos \beta} \sin(\lambda - \nu)$$

$$\bar{i}_c^i = \frac{1}{\cos \beta} \sin(\nu + \psi + \beta). \quad (3)$$

$$\bar{i}_B = \frac{1}{\sin \varphi} \cos(\nu + \psi + \varphi) =$$

$$\bar{i}_B = \frac{1}{\sin \varphi} \sin(\lambda - \nu),$$

$$\bar{u}_o^i = \bar{i}_o^i = \bar{u}_c^i = \sin(\nu + \psi). \quad (4)$$

$$\bar{u}_c = \sin(\nu + \psi).$$

Интервал II ($\underline{\lambda}_B \leq \nu \leq \frac{2\pi}{m}$)

В данном интервале вентили закрыты, конденсатор C разряжается на нагрузку R :

$$i_o^{\text{II}} = -i_c^{\text{II}},$$

$$i_c = -\frac{u_c(\lambda)}{R} e^{-(\nu - \lambda) \text{tg} \varphi}$$

где $i_c^{\text{II}} = -\frac{u_c^i(\lambda_e)}{R} e^{-(\nu - \lambda_e) \text{ctg} \beta}$

- известное выражение для

тока ёмкости при разряде на активное сопротивление.

Таким образом,

$$i_o^{\text{II}} = \frac{u_c^i(\lambda_e)}{R} e^{-(\nu - \lambda_e) \text{ctg} \beta}; \quad u_o^{\text{II}} = u_c^{\text{II}} = i_o^{\text{II}} \cdot R = u_c^i(\lambda_e) e^{-(\nu - \lambda_e) \text{ctg} \beta}$$

Величина начального (т.е. перед разрядом) напряжения конденсатора $U_c^i(\lambda_0)$ определяется из (4) при $\psi = \lambda$:

что даёт $U_c^i(\lambda_0) = \epsilon_m \sin(\lambda + \psi) = \sin \beta = \cos \psi$.

Введя относительные величины $\bar{i}_0^i = \frac{i_0^i}{\epsilon_m}$ и $\bar{U}_0^i = \frac{U_0^i}{\epsilon_m}$,

получаем в относительных единицах:

$$\bar{i}_0^i = \bar{U}_0^i = \sin(\lambda_0 + \psi) e^{-(\psi - \lambda_0) \text{ctg} \beta} \quad (4)$$

Найдём зависимости, позволяющие определить ψ и λ_0 :

Из условия $i_0^i(0) = i_0^i\left(\frac{2\pi}{m}\right)$ получаем:

$$\text{tg} \psi = \frac{\sin \lambda_0 \cdot e^{-(\frac{2\pi}{m} - \lambda_0) \text{ctg} \beta}}{1 - \cos \lambda_0 \cdot e^{-(\frac{2\pi}{m} - \lambda_0) \text{ctg} \beta}} \quad (4')$$

Из условия $i_0^i(\lambda_0) = 0$ находим

$$-\text{ctg} \psi = \text{tg}\left(\psi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{tg}(\lambda_0 + \psi) = -\text{tg} \beta, \quad \frac{\pi}{2} - \lambda + \psi$$

откуда $\lambda_0 + \psi = \pi - \beta$ или $\psi = \pi - (\beta + \lambda_0)$. (5)

λ_B зависит от m (или ψ).

Подставив ψ из (5) в (4)', окончательно имеем: (6)

Проще: $\sin(\lambda + \beta) = \sin \beta e^{-(2\theta - \lambda) \text{ctg} \beta}$ или $\cos(\lambda - \psi) = \cos \psi e^{-(2\theta - \lambda) \text{ctg} \beta}$, $\theta = \frac{\pi}{m}$. (6') (6'')

$$\text{tg}(\lambda_0 + \beta) = \frac{\sin \lambda_0 \cdot e^{-(\frac{2\pi}{m} - \lambda_0) \text{ctg} \beta}}{\cos \lambda_0 \cdot e^{-(\frac{2\pi}{m} - \lambda_0) \text{ctg} \beta} - 1} \quad (6)$$

$$\text{ctg}(\lambda + \beta) = \text{ctg} \lambda - \frac{1}{\sin \lambda} e^{(\frac{2\pi}{m} - \lambda) \text{ctg} \beta}$$

$$\frac{\sin \beta}{\sin \lambda \sin(\lambda + \beta)} = \frac{1}{\sin \lambda} e^{(\frac{2\pi}{m} - \lambda) \text{ctg} \beta}$$

$$\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda\right) \text{ctg} \beta = \ln \frac{\sin \beta}{\sin(\lambda + \beta)}$$

отсюда $\text{ctg} \beta$, когда $\theta = 0, \lambda = \pi/2$, получаем $\frac{2\pi}{m} - \frac{\pi}{2} - \text{ctg} \beta \ln \text{ctg} \beta = 0$

$$\left(\frac{4 - m}{2m} \pi - \text{ctg} \beta \ln \text{ctg} \beta\right) \lambda = 2\theta - \text{ctg} \beta \ln \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \lambda)} \quad (6''') (6''')$$

Зависимости (5) и (6) позволяют определить λ_β и ψ , как функции параметра β (т.е. как функции параметров схемы, ибо $\beta = \arctg \omega RC$).

Определим характерные точки зависимостей \bar{i}_c^I ; \bar{i}_o^I ; \bar{i}_β^I .

Ток \bar{i}_c^I : максимума не имеет,
ибо :

$$\left. \frac{d \bar{i}_c^I}{d \vartheta} \right|_{\vartheta = \vartheta_{cm}} = - \operatorname{tg} \beta \cdot \sin(\vartheta_{cm} + \psi) < 0,$$

где ϑ_{cm} - момент максимума \bar{i}_c^I .

Наибольшее значение тока \bar{i}_c^I будет при $\vartheta = 0$ ($\vartheta_{cm} = 0$)
(момент $\vartheta = \lambda_\beta$ не рассматривается):

$\bar{i}_{c \max}^I = \operatorname{ctg} \psi \cdot \cos \psi$. Или после подстановки ψ из (5):

$$\bar{i}_{c \max}^I = - \operatorname{tg} \beta \cdot \cos(\lambda_\beta + \beta) \quad \text{х) } \operatorname{tg} \beta \cos \psi = \operatorname{ctg} \psi \cos \psi = \psi \cos \psi. \quad (7)$$

В момент $\vartheta = \vartheta_{om}$ ток $i_c = C \frac{d u_c}{d t} = \omega C \frac{d e}{d \vartheta} = C \frac{d (E_m \sin(\vartheta + \psi))}{d \vartheta} \Big|_{\vartheta = \vartheta_{om}} = 0$
 $= C E_m \cos(\vartheta_{om} + \psi) = C E_m \cos \frac{\pi}{2} = 0$.

где: ϑ_{om} - момент максимума тока \bar{i}_o^I .

Ток \bar{i}_o^I :
Имеет максимум в момент $\vartheta = \vartheta_{om}$

$$\left. \frac{d \bar{i}_o^I}{d \vartheta} \right|_{\vartheta = \vartheta_{om}} = \cos(\vartheta_{om} + \psi) = 0, \text{ т.е. } \vartheta_{om} + \psi = \frac{\pi}{2}, \text{ откуда } \vartheta_{om} = \frac{\pi}{2} - \psi, \quad \vartheta_c = \lambda - \psi.$$

(где ϑ_c при $\pi/2$ имеет)

что следует и непосредственно из рис. 2, максимум.

Подставив ψ из (5), получаем

$$\vartheta_{om} = \lambda_\beta + \beta - \frac{\pi}{2} = \lambda - \psi. \quad (8)$$

х) т.к. $\frac{\pi}{2} < \lambda_\beta + \beta < \pi$ всегда, то $\cos(\lambda_\beta + \beta) < 0$ и $\bar{i}_{c \max}^I > 0$.

$$i_B = \frac{1}{\sin \psi} \sin(\lambda - \nu)$$

Ток вентилля $\bar{i}_B^i : = \frac{1}{\cos \beta} \sin(\lambda - \nu)$ (8')

В момент θ_{em} должен иметь максимум

$$i_B' = -\frac{1}{\sin \psi} \cos(\lambda - \nu) / \epsilon_B = -\frac{1}{\sin \psi} \cos(\lambda - \theta_B) = 0$$
$$\lambda - \theta_B = \frac{\pi}{2}$$

$$\left. \frac{di_B^i}{d\nu} \right|_{\nu = \theta_{em}} = \cos(\theta_{em} + \psi) - \text{tg} \beta \cdot \sin(\theta_{em} + \psi) = 0,$$

откуда $\text{ctg}(\theta_{em} + \psi) = \text{tg} \beta,$

т.е. $\theta_{em} + \psi = \frac{\pi}{2} - \beta$. Или после подстановки ψ из (5):

$$\theta_{em} = \lambda_e - \frac{\pi}{2} = \quad (9)$$

Как и следовало ожидать, $\theta_{em} < \theta_m$. $(\theta_{em} = \frac{\pi}{2} - \psi - \beta = \theta_m - \beta)$
 $(\theta_{em} = \lambda_e - \frac{\pi}{2} = \lambda_e - \frac{\pi}{2} + \beta - \beta = \theta_m - \beta)$

Из (9) следует, что максимум тока вентилля существует при

$$\lambda_e \geq \frac{\pi}{2}$$

В точке $\nu = 0$ ток $\bar{i}_B^i(0) = \frac{1}{\cos \beta} \sin(\psi + \beta)$. Или после подстановки ψ из

(5):

$$\bar{i}_B^i(0) = \frac{1}{\cos \beta} \cdot \sin \lambda_e = \frac{1}{\sin \psi} \sin \lambda$$
 (10)

В момент $\nu = \lambda_e$ ток

$$\bar{i}_B^i(\lambda_e) = 0.$$

Начальный

(при $\nu = 0$) бросок зарядного ^{x)} тока ёмкости в этом случае всегда больше тока нагрузки $\bar{i}_B^i(0)$.

Далее, поскольку длительность горения вентилля ни при каких соотношениях R и C схемы не может превышать $\lambda_{кр} = \frac{2\pi}{m}$, то, подставив $\lambda_{кр}$ в (9), получаем критическое значение момента максимума тока вентилля

$$\theta_{emкр} = \frac{\pi(4-m)}{2m}. \text{ Откуда следует, что при } m > 3 \theta_{emкр} < 0, \text{ т.е.}$$

x) зарядным назван положительный ток ёмкости (рис. 2)

xx) Продолжение данного текста см. на стр. 17 /10/.

Вставки.

О **границном режиме**. / К стр./10/, после формулы (10).

Для $m = 1$, $m = 2$, $m = 3$ существует **границное** значение $\lambda_{вгр}$, когда $\Theta_{вm} = 0$: $\lambda_{вгр} = \pi/2$.

Из (6) определяем $\beta_{гр}$. Из (5): $\Psi_{гр} = \pi/2 - \beta_{гр}$. При $\text{tg}\beta > \text{tg}\beta_{гр}$, значение $(\beta > \beta_{гр}) \rightarrow \lambda < \lambda_{гр}$. Следовательно, **экстремума** импульса тока $i_{в}$ **нет**.

На обороте (pto) стр.9 **отчёта 1967** по **SmR/IC**. К стр./10/ после "**Границный режим**".

Кратко об энергии.

Физика.

С ростом ёмкости C конденсатора увеличивается энергия зарядного импульса. Иначе, импульса тока вентиля, обмоток трансформатора и сети. Это ясно из очевидных физических соображений. Действительно, с увеличением (\uparrow) C при прочих равных условиях возрастает (\uparrow) интервал свободного разряда конденсатора. Постоянная времени цепи разряда увеличивается. Экспонента разряда на графике, начинаясь выше по напряжению u и раньше по времени t (или $\vartheta = \omega t$), идёт положе (см. рис.18), что приводит к увеличению напряжения на нагрузке и росту её тока при неизменном значении сопротивления R . Следовательно, при $\uparrow C$ конденсатор должен питать нагрузку не только более длительное время, но и обеспечить **большой** её ток и **большее** напряжение на ней. Иначе говоря, обеспечить **большую** мощность за более длительное время. То есть **большую энергию**.

Согласно закону баланса энергии, конденсатор, как пассивный источник энергии, может, в установившемся режиме, отдать лишь столько энергии в нагрузку за время свободного разряда (за время паузы), сколько он приобретёт её во время заряда (во время импульса) за вычетом энергии, отданной нагрузке в интервале вынужденного разряда (об интервалах см. стр.4). При условии, что увеличение ёмкости C уменьшает длительность импульса зарядного тока, рост энергии возможен при увеличении **амплитуды** этого импульса.

Математика.

О росте энергии можно судить по росту площади импульса тока вентиля $i_{в}$.

$$S_{i_{в}} = \int i_{в} d\vartheta \mid \forall \vartheta \in [0, \lambda] = [(-)(-) \cos(\lambda - \vartheta) / \cos\beta] \mid \forall \vartheta \in [0, \lambda] = (1 - \cos\lambda) / \cos\beta.$$

Например, для $m = 2$.

При $\lambda_{\max} = \pi$: $\beta = 0$, $\cos\beta = 1$, $S_i = 1 - \cos\pi = 2$.

При $\lambda \rightarrow 0$: $\beta = \pi/2$, $\cos\beta \rightarrow 0$, $S_i = 0/0$. Неопределённость.

$\lambda = f(\beta)$. $\beta \rightarrow \pi/2$ быстрее, чем $\lambda \rightarrow 0$. $1/\cos\beta \rightarrow \infty$ быстрее, чем $(1 - \cos\lambda) \rightarrow 0$.

Для иллюстрации при $m = 2$: приближённый (на логарифмической линейке) расчёт для небольшого диапазона значений $\text{tg}\beta = \omega RC = 0 \div 50$.

$\text{tg}\beta \mid 0 \quad 2,4 \quad 4 \quad 10 \quad 20 \quad 50$

$S_i \mid 2 \quad 2,6 \quad 2,7 \quad 2,9 \quad 3 \quad 3,2$. Площадь увеличилась примерно в полтора раза.

21.8.67

СтРНС

Р.5, к сгр. 10 Отгггг67

Граничный режим, когда $\lambda = \frac{\pi}{2}$; $\theta_B = 0$;

из (6): $\cos(\lambda - \varphi) = \cos \varphi e^{-(2\theta - \lambda) \operatorname{tg} \varphi} \Big|_{\lambda = \pi/2}$ имеем:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \cos \varphi e^{-\left(2\frac{\pi}{\pi} - \frac{\pi}{2}\right) \operatorname{tg} \varphi}$$

$$\sin \varphi = \cos \varphi e^{-\dots}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{гр} = e^{-\pi \left(\frac{4-m}{2m}\right) \operatorname{tg} \varphi_{гр}}$$

$$\psi_{гр} = \frac{\pi}{2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \varphi_{гр} \quad ; \quad \psi_{гр} = \varphi_{гр}$$

$$\psi_{гр} = \frac{\pi}{2} - \beta_{гр}$$

$$2\theta - \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg} \beta_{гр} \ln \operatorname{tg} \beta_{гр} = 0$$

$$\frac{4-m}{2m} \pi - \operatorname{tg} \beta_{гр} \ln \operatorname{tg} \beta_{гр} = 0$$

$$\frac{4-m}{2m} \pi - \operatorname{ctg} \varphi_{гр} \ln \operatorname{ctg} \varphi_{гр} = 0$$

Гранич. режим возм. при $m \leq 4$

т.е. уже при $m = 4$,
граничный режим

сущ-т! точно
тоже, когда
и критич-й!

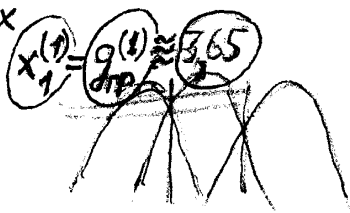
при $m > 3$: $\theta_B < 0$ всегда

т.е. $\theta_B = 0$

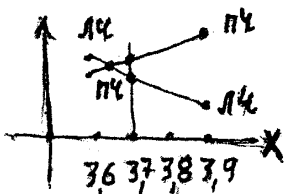
$$\theta_{B \text{ кр}} = \frac{\pi(4-m)}{2m}$$

$$m=3: \theta_{B \text{ кр}}^{(3)} = \frac{\pi}{6}$$

$m=1$ $\frac{1}{2}\pi = x \ln x$
 $\frac{4,712388}{x} = \ln x$



X	3.6	3.9	3.7
лч	1,31	1,21	1,272
пч	1,28	1,36	1,308



Т.к.:

$$\ln \operatorname{tg} \beta_{гр} = 0, \text{ т.е.}$$

$$\operatorname{tg} \beta_{гр} = 1, \text{ то}$$

$$\beta_{гр}^{(4)} = 45^\circ = \theta,$$

$$\alpha \beta_{\text{крит}}^{(4)} = \theta = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$$

о,к!

Обратное напряжение на вентиле

Обратное напряжение на вентиле $U_{обр}$ определяется как напряжение между катодом и анодом вентиля в непроводящем его состоянии. В общем случае находится как алгебраическая разность выходного (выпрямленного) напряжения $U_o = U_c$ и ЭДС фазы трансформатора.

Весьма наглядно форма обратного напряжения отображается ординатами заштрихованной части графика Рис.2' ($U_{обр}$ для вентиля 1). Кривая $U_{обр}$ относительно катода вентиля построена на рис. по ординатам Рис.2' (заштриховано вертикальными линиями). Аналогично получаем $U_{обр}$ для любой схемы m -фазного выпрямления. В интервалах самостоятельного разряда конденсатора (интервалы II', II" и т.д.) обратное напряжение равно: $U_{обр} = U_o - e_k$, где e_k – ЭДС соответствующей фазы (см.Рис.).

В остальных интервалах (когда открыты вентили, кроме рассматриваемого):

$$U_{обр} = e_k - e_1.$$

Для выбора вентиля важно знать амплитуду обратного напряжения. Учитывая, что в режиме холостого хода ($XХ, R \rightarrow \infty$) конденсатор заряжается до величины E_m , и что режим ХХ возможен в любой схеме, следует выбирать вентили по максимальному значению обратного напряжения $U_{обр max}$.

Для схем ы Ларионова $U_{обр} = \sqrt{3}$ – при соединении вторичных обмоток трансформатора звездой и $U_{обр} = 1$ – при соединении вторичных обмоток треугольником.

$$e_k e_k ,$$

точки максимума тока \bar{i}_B^i нет. Для $m=3$ $\theta_{втр} = \frac{\pi}{6}$

Поскольку при $C \neq 0$ всегда $\lambda_B \leq \lambda_{кр} = \frac{2\pi}{m}$, то при $m > 3$ максимума \bar{i}_B^i нет. В этом случае наибольшее значение тока вентиля будет при $\nu = 0$ и определяется выражением (10)

Итак: для определения максимального тока вентиля схем выпрямления с $m=1$ и $m=2$, при $\lambda_B \geq \frac{\pi}{2}$ следует пользоваться зависимостью (3), которая после подстановки ψ из (5) и $\theta_{вм}$ из (9), принимает вид (при $\omega RC < (\omega RC)_{тр}$):

$$\bar{i}_{Bmax} = \frac{1}{\cos\beta} = \frac{1}{\sin\psi} \quad (10^a)$$

При определении i_{Bmax} схем выпрямления с $m > 3$ и схем с $m=1, m=2$, при $\lambda_B < \frac{\pi}{2}$ следует использовать зависимость (10):

$$\bar{i}_{Bmax} = \frac{1}{\cos\beta} \cdot \sin\lambda_B \quad (10)$$

Определим далее все остальные величины, необходимые для расчёта схемы и выбора её параметров: \bar{I}_0 ; I_B ; ΔU ; $U_{обр.max}$.

МАКСИМАЛЬНОЕ ОБРАТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ $U_{обр.max}$.

Для $m=1, m=2, m=6, m=12$ /схемы с нулевым выводом/
 $U_{обр.max} = 2\epsilon_m$. Для $m=3$ $U_{обр.max} = \sqrt{3}\epsilon_m$. Для $m=6$

/мостовая схема Ларионова/ $U_{обр.max} = \epsilon_{m.l}$, где $\epsilon_{m.l}$ - амплитуда линейного напряжения на входе моста. Для однофазной мостовой схемы максимальное значение обратного напряжения равно амплитудному значению э.д.с. e , т.е. $U_{обр.max} = \epsilon_m$.

Среднее значение выпрямленного тока \bar{I}_0 и напряжения U_0

Определяется как

$$\bar{I}_0 = \frac{m}{2\pi} \left[\int_0^{\lambda_B} i_0^i d\nu + \int_{\lambda_B}^{\frac{2\pi}{m}} i_0^{\bar{i}} d\nu \right]$$

После подстановки i_0^i ; $i_0^{\bar{i}}$ из (3) и (4), интегрирования и преобразований получаем в относительных единицах:

1) Далее (при $C > C_{кр}$) будет показано точнее.

в стр. 11 перед заголовком "Эффект зажигания":
 при $\beta \leq \beta_{кр}$, ($C \leq C_{кр}$) значение $I_0 = U_0$ (не) зависит от ωRC
 и равно как при $C = 0$.

действ-но, из (23) стр. 17

$$\beta_{кр} = \frac{\pi}{2} - \theta; \quad \lambda_{кр} = \theta.$$

подставляя в (11^a), получаем:

$$I_{0(R)кр} = \frac{\sin^2 \theta}{\theta \cos(\frac{\pi}{2} - \theta)} = \frac{\sin^2 \theta}{\theta \sin \theta} = \frac{\sin \theta}{\theta}, \quad 0, \text{ кэи!}$$

$$\bar{I}_0 = \frac{m}{2\pi} \frac{1}{\cos \beta} [\cos(\psi + \beta) - \cos(\lambda_в + \psi + \beta)] = \bar{U}_0 \quad (11)$$

где: $\bar{I}_0 = \frac{I_0}{\frac{\epsilon_m}{R}}$; $\bar{U}_0 = \frac{U_0}{\epsilon_m}$.

Иначе (11) можно записать как:

$$\bar{I}_0 = \bar{U}_0 = \frac{\pi}{m} \frac{1}{\cos \beta} \cdot \sin \frac{\lambda_в}{2} \cdot \sin(\frac{\lambda_в}{2} + \beta + \psi) \quad (11^a)$$

Из (5) стр. 7 $\sin(\frac{\pi}{m} + \dots) = \sin \frac{\lambda}{2}$; $I_{0(R)} = U_0 = \frac{\sin 2\lambda}{\theta \cos \beta}$; в докрит. режиме
 если вместо $\omega RC = \omega RC$ и использовать $\omega RC = \omega RC$, то подставляя вместо $\beta = \frac{\pi}{2} - \theta$, получим:
 $I_{0(R)} = \frac{\sin 2\lambda}{\theta \sin \theta} \quad (11^b)$

При $\beta = 0$ (т.е. $C=0$ - случай чисто активной нагрузки)

- имеем: $\lambda_в = \frac{2\pi}{m}$; $\psi = \frac{\pi(m-2)}{2m} = \frac{\pi}{2} - \theta$,

и из (11^a) получаем известную формулу

$$\bar{I}_0 = \bar{U}_0 = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}; \quad (\text{для } m \geq 2).$$

Очевидно, что среднее значение тока вентиля равно среднему значению выпрямленного тока I_0/m , поскольку среднее значение тока конденсатора за период равно 0.

Эффективные значения тока вентиля $I_в$ и тока базы вторичной обмотки трансформатора $I_т$

Эффективное значение тока вентиля

$$I_в = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda_в} (i_в^i)^2 d\psi}$$

После подстановки $i_в^i$ из (3), интегрирования и преобразований получаем в относительных единицах:

$$\bar{I}_в = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \sqrt{2\lambda_в - \sin 2\lambda_в}, \quad (12)$$

где: $\bar{I}_в = \frac{I_в}{\frac{\epsilon_m}{R}}$; $\lambda_в$ определяется из (6).

Выражение (12) справедливо для m - фазных схем выпрямления с нулевой точкой и однофазной мостовой схемы Греча. Для трёхфазной мостовой схемы Ларионова эффективное значение тока вентиля будет:

$$\bar{I}'_в = \sqrt{2} \bar{I}_в \dots (13) \quad (\text{где: } \bar{I}_в \text{ опр-ся по (12) для } m = 6),$$

поскольку время открытого состояния каждого вентиля схемы Ларионова вдвое больше, чем в 6-фазной схеме с нулевым выводом.

Ток фазы трансформатора m - фазной схемы с нулевым выводом

$$\bar{I}_\varphi = \bar{I}_e \quad (14)$$

Ток фазы трансформатора однофазной мостовой схемы Грца

$$\bar{I}'_\varphi = \sqrt{2} \bar{I}_e \quad (15)$$

где: \bar{I}_e определяется по (12) для $m = 2$.

Ток фазы трансформатора (точнее - ток в линейном проводе) мостовой трёхфазной схемы Ларионова (рис. 3)

$$\bar{I}'_\varphi = \sqrt{2} \bar{I}'_e \quad (16) \quad \text{или} \quad \bar{I}'_\varphi = 2 \bar{I}_e,$$

где: \bar{I}'_e определяется по (13).

Пульсация выпрямленного напряжения ΔU

$$\Delta U = U_{\max} - U_{\min} \quad (\text{см. рис. 2}).$$

$$U_{\max} = i_{\max}^i \cdot R; \quad U_{\min} = i_{\min}^i \cdot R = i_0^i \left(\frac{2\pi}{m} \right) \cdot R.$$

$$i_{\max}^i = i_0^i (\theta_{om}) = i_0^i \left(\frac{\pi}{2} - \psi \right) = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \psi - \psi \right) = \frac{\varepsilon_m}{R}.$$

$$U_{\max} = i_{\max}^i \cdot R = \varepsilon_m.$$

В относительных единицах.

$$\bar{U}_{\max} = \frac{U_{\max}}{\varepsilon_m} = 1.$$

Подставив ψ из (5), получаем в относительных единицах:

$$\bar{U}_{omin} = \sin \beta \cdot e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda_e\right) \operatorname{ctg} \beta},$$

где: $\bar{U}_{omin} = \frac{U_{omin}}{\varepsilon_m}.$

Подставив $e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda_e\right) \operatorname{ctg} \beta}$ из (6), после преобразований получаем:

$$\bar{U}_{omin} = \sin(\lambda_e + \beta). \quad (17) = \sin \psi.$$

И, наконец, :

$$\Delta \bar{U} = 1 - \sin(\lambda_e + \beta). \quad (18)$$

На практике обычно задают пульсацию выпрямленного напряжения в отношении к среднему значению выпрямленного напряжения, т.е.

$$\Delta U' = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}_0}.$$

Подставив $\Delta \bar{U}$ и \bar{U}_0 из (18) и (11), получаем

$$\Delta \bar{U}_1 = \frac{1 - \sin(\lambda_e + \beta)}{\frac{m}{\pi} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \sin^2 \frac{\lambda_e}{2}}. \quad (19)$$

При $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$, т.е. при больших $\omega R C$, $(k_{\pi}) \approx 2\theta \operatorname{ctg} \beta = \frac{2\theta}{\omega R C} = \frac{2\pi}{m \cdot 2\pi f R C} = \frac{T}{m R C}$.

В дальнейшем будем использовать выражение (19)

Мощность, потерь в вентиле ^{x)}

Вольтамперная характеристика (вах) полупроводникового вентиля представлена на рис. 4.

С достаточной для практики точностью, аппроксимируя

x) В настоящее время в схемах выпрямления в подавляющем большинстве случаев применяются полупроводниковые вентили, поэтому определение мощности, выделяющейся в вентиле, дается применительно к полупроводниковым вентилям.

прямую ветвь характеристики отрезками прямых \overline{OA} и \overline{OB} получаем

$$U_{\varepsilon} = U_{np} + R_{\varepsilon} \cdot i_{\varepsilon},$$

где сопротивление $R_{\varepsilon} = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\Delta U_{\varepsilon}}{\Delta i_{\varepsilon}}$.

Тогда мощность потерь от прямого тока вентиля будет

$$P_{np} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{\varepsilon} \cdot i_{\varepsilon} dV = \frac{1}{2\pi} \int_0^{I_{\varepsilon}} (U_{np} + R_{\varepsilon} \cdot i_{\varepsilon}) \cdot i_{\varepsilon} dV.$$

Но

$$U_{np} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{I_{\varepsilon}} i_{\varepsilon} dV = U_{np} \cdot \bar{I}_{\varepsilon},$$

где среднее значение тока вентиля $\bar{I}_{\varepsilon} = \frac{I_0}{m}$.

$$R_{\varepsilon} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{I_{\varepsilon}} i_{\varepsilon}^2 dV = R_{\varepsilon} \cdot J_{\varepsilon}^2$$

Эффективное значение тока вентиля J_{ε} было определено - выражения (12), (13). (полагаем что вах вентиля на форму тока по сравнению с R и C влияет незначительно, и этим влиянием можно пренебречь).

Таким образом,

$$P_{np} = U_{np} \frac{\bar{I}_0}{m} + R_{\varepsilon} J_{\varepsilon}^2. \quad (20)$$

В непроводящую часть периода вентиль находится под воздействием обратного напряжения.

Потери мощности в этом случае будут:

$$P_{обр} = \frac{1}{2\pi} \int_{I_{\varepsilon}}^{2\pi} U_{обр} \cdot i_{\varepsilon,обр} dV.$$

Обозначив "пороговый" ток I_1 (см. рис. 4), имеем:

$$i_{\epsilon} = I_1 + \frac{1}{R_1} U_{\text{обр}},$$

где: $R_1 = \frac{\Delta U_{\epsilon 1}}{\Delta i_{\epsilon 1}}$; $U_{\text{обр}}$ - мгновенное значение обратного напряжения.

В итоге получаем

$$P_{\text{обр}} = \bar{I}_1 \cdot U_{\text{обр. ср}} + \frac{1}{R_1} \cdot U_{\text{обр. эф}}^2, \quad (21)$$

где: $U_{\text{обр. ср}}$ - среднее значение обратного напряжения

$$U_{\text{обр. ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\lambda_{\epsilon}}^{2\pi} U_{\text{обр}} d\psi,$$

$U_{\text{обр. эф}}$ - эффективное значение обратного напряжения

$$U_{\text{обр. эф}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\lambda_{\epsilon}}^{2\pi} U_{\text{обр}}^2 d\psi.$$

Общие потери в вентиле

$$P_{\epsilon} = P_{\text{пр}} + P_{\text{обр}}. \quad (22)$$

Полученные выше зависимости позволяют полностью рассчитывать схему m - фазного выпрямления и выбрать её элементы.

Перейдем к рассмотрению особенностей работы схемы m - фазного выпрямления (рис. 1).

Все полученные выше зависимости справедливы для m - фазных схем выпрямления при выполнении определённых условий. Для $m=1$ и $m=2$ никаких ограничений по применению полученных зависимостей нет. Иначе обстоит дело при $m \geq 3$

(т.е. для многофазных схем выпрямления). Все полученные ранее зависимости справедливы (для $m \geq 3$) лишь при условии, что длительность горения вентилей λ_g не превышает величины $\frac{2\pi}{m}$. Величина λ_g , определяемая согласно (6), зависит от величины β , т.е. от ωRC . ($\operatorname{tg} \beta = \omega RC - (14)$).

При ^{зад}анных ω и R значение β (а, следовательно, и λ_g) определяется величиной ёмкости C .

Совершенно очевидно, что чем больше величина ёмкости, тем меньше колебания напряжения на ней (и, естественно, на нагрузке R) и тем меньше длительность горения вентиля λ_g . По мере уменьшения ёмкости величина λ_g растёт и при некотором критическом значении ёмкости $C = C_{кр}$ длительность горения вентиля λ_g достигает критической величины $\lambda_{g,кр} = \frac{2\pi}{m}$

(равной длительности горения вентиля при чисто активной нагрузке, т.е. при $C=0$). При дальнейшем уменьшении ёмкости λ_g увеличиться физически не может, поскольку момент открытия вентиля будет определяться только точкой пересечения ЭДС фаз трансформатора - т. А рис. 2 (аналогично известному случаю работы выпрямителя на чисто активную нагрузку). В этом случае ёмкость C и нагрузка R работают независимо.

Назовём режим при $C > C_{кр}$ докритическим, режим при $C = C_{кр}$ - критическим и режим при $C < C_{кр}$ - закритическим. Очевидно, что закритический режим недопустим, ибо ёмкость, устанавливаемая для сглаживания кривой выпрямленного напряжения, никакого полезного действия не оказывает. Наоборот, сказывается её вредное воздействие, выражающееся в бесцельном искажении тока вентиля (и трансформатора) зарядным током ёмкости, что ведёт к дополнительным потерям мощности. Для закритического режима справедливы уравнения (1)÷(4), куда следует лишь подставить

$$\psi = \psi_{кр} = \frac{\pi(m-2)}{2m}$$

Качественные

✓ графики напряжений и токов закритического режима приведены на рис. 5.

Качественные графики напряжений и токов для критического режима приведены на рис. 6 (для примера взята мостовая 3-х фазная схема Ларионова).

Критическое значение емкости найдем из следующих соображений:

В критическом режиме $\lambda_{в.кр} = \frac{2\pi}{m}$; $\psi_{кр} = \frac{\pi(m-2)}{2m}$.

Подставив $\lambda_{в.кр}$ и $\psi_{кр}$ в (5), получаем

$$\beta_{кр} = \psi_{кр} ; \quad \operatorname{tg} \beta_{кр} = \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m} = \operatorname{ctg} \theta. \quad (\beta_{кр} = \psi_{кр} = \psi_0 = \frac{\pi}{2} - \theta).$$

Но $\operatorname{tg} \beta_{кр} = \omega R C_{кр}$, откуда при ω и R const:

$$C_{кр} = \frac{1}{\omega R} \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m} \quad (23) = \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\omega R} = 1/\omega R \operatorname{tg} \theta. \quad (23')$$

Из (23) следует:

1. Для заданных m и ω зависимость $C_{кр} = f(R)$ представляет собой гиперболу с центром в начале координат и координатами вершины

$$C_в = R_в = +\sqrt{\frac{1}{\omega} \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m}}.$$

2. Зависимость $C_{кр} = f(\omega)$ при заданных R и m также представляет собой гиперболу с координатами вершины

$$C_в = \omega_в = +\sqrt{\frac{1}{R} \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m}}.$$

Зависимости $C_{кр} = f(R)$ и $C_{кр} = f(\omega)$ изображены на рис. 7.

3. Функция $C_{кр} = f(m)$ при заданных R и ω изменяется по закону тангенса и близка к линейной зависимости. С увеличением m значение $C_{кр}$ возрастает.

4. Для частот $f = 50$ гц и $f = 400$ гц выражение (23) может быть записано в удобной для практических расчетов форме :

$$C_{кр} = 3185 \frac{1}{R} \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m} ; [\text{мкф}] , (24)$$

($f = 50 \text{ Гц}$)

$$C_{кр} = 400 \frac{1}{R} \operatorname{tg} \frac{\pi(m-2)}{2m} ; [\text{мкф}] , (25)$$

($f = 400 \text{ Гц}$)

Итак: В схеме m -фазного выпрямления при работе на параллельную цепь RC при отсутствии внутреннего сопротивления питающего трансформатора возможны три режима:

1. Докритический режим - основной рабочий режим, имеющий место при $C > C_{кр}$ (для $m=1$ и $m=2$ $C_{кр} = 0$), для которого справедливы все выведенные выше зависимости.

2. Критический режим, имеющий место при $C = C_{кр}$. Все выражения справедливы и для этого режима.

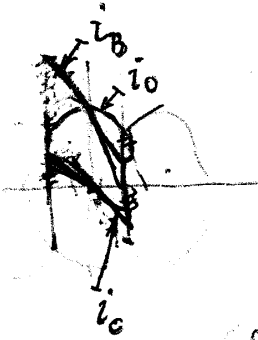
3. Закритический режим, имеющий место при $C < C_{кр}$. Выведенные выше зависимости для данного режима утрачивают силу. Режим практического интереса, с точки зрения выпрямительной техники, не представляет, ибо ёмкость становится просто излишней и ведёт к бесцельной перегрузке трансформатора и вентиляей.

P.S. Замечание. При $C = \text{const}$ и $R = \text{var}$ возможен режим, когда $\lambda = 2\pi/m$. В этом случае может быть введено аналогичное понятие - «критической нагрузки» $R_{кр}$. При $R > R_{кр}$ и $R < R_{кр}$ имеем докритический и закритический режимы, соответственно. Для $m=1$ и $m=2$ сопротивление $R_{кр} = 0$. Тем самым, режим короткого замыкания (КЗ) нагрузки соответствует критическому режиму в указанном смысле. $\lambda_{вкр} = 2\pi/m$.

Следует исследовать этот вариант изменения нагрузки и на основе полученных результатов построить нагрузочную или внешнюю характеристику.

21.8.67

Закритический режим (PCH) P.S. КСТР. 18 Отчёта 67
 (только при $m \geq 3$)!



$$g \leq g_{кр} = c \operatorname{tg} \theta. \quad \beta_{кр} = \frac{\pi}{2} - \theta. \quad \beta_{старая}$$

$$\Lambda = \Lambda_{кр} = 2\theta \quad \Psi_{кр} = \beta_{кр}$$

$$\Psi = \pi - \beta_{кр} - \Lambda_{кр} = \frac{\pi}{2} - \theta = \Psi_0.$$

$\beta_{старая}$ $i_c(\vartheta) = \cos(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \theta) \cdot g = g \sin(\theta - \vartheta).$

$$i_B(\vartheta) = \frac{1}{\cos \beta} \sin(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \theta + \beta) = \frac{1}{\cos \beta} \cos(\vartheta - \theta + \beta).$$

$$i_o(\vartheta) = \sin(\vartheta + \Psi_0) = \sin(\vartheta + \frac{\pi}{2} - \theta) = \cos(\vartheta - \theta).$$

при $m \geq 3$

$$I_o = \frac{\sin \theta}{\theta};$$

$$K_m = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta / \theta} = \theta \frac{2 \sin \theta / 2}{2 \sin \theta / 2 \cos \theta / 2} = \theta \operatorname{tg} \frac{\theta}{2};$$

Амплитуды: токов i_o, i_B, i_c : (с основанием $O_z = R$)

$$i_{aB(R)} = \sec \beta = 1 / \cos \beta.$$

$$i_{ac(R)} = g \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) = g \sin \theta.$$

$$i_{ao(R)} = 1.$$

Т.к. граничный режим наступает позднее (при больших g), тем критичнее, то в закритическом режиме экстр. токов нет. К тому же это относ-ся только к $m=3$.

Новая

$$\Psi = \Psi_0 = \frac{\pi}{2} - \theta; \quad \Lambda = 2\theta;$$

$$i_o = \cos(\vartheta - \theta).$$

$$i_B = i_o + i_c = \frac{1}{\sin \beta} \sin(\beta - \vartheta + \theta) = \csc \beta \sin(\vartheta - \theta - \beta)$$

$$i_c = g i'_o = +g \sin(\theta - \vartheta),$$

$= c \operatorname{tg} \beta$

$$0 \leq \vartheta \leq 2\theta$$

$$\sin^2 \beta \cdot 2\pi J_B^2 = \int_0^{2\theta} \sin^2(\vartheta - \theta - \beta) = \frac{1}{2} \left(\vartheta - \frac{1}{2} \sin 2(\vartheta - \theta - \beta) \right) \Big|_0^{2\theta} =$$

$$= \frac{1}{2} \left[2\theta - \frac{1}{2} \sin 2(\theta - \beta) - \frac{1}{2} \sin 2(\theta + \beta) \right] = \frac{1}{2} [2\theta - \sin 2\theta \cos 2\beta].$$

$$J_B = \frac{1}{2 \sin \beta} \sqrt{(2\theta - \sin 2\theta \cos 2\beta) / \pi}$$

Методика расчета схемы m - фазного выпрямителя и выбора её элементов

Исходными (заданными) величинами являются:

1. \bar{I}_0 - среднее значение выпрямленного тока (ампер).
2. U_0 - среднее значение выпрямленного напряжения (вольт)
3. ΔU_1 - пульсация или переменная составляющая выпрямленного напряжения (вольт) или то же в относительных единицах

$$\Delta \bar{U}_1 = \frac{U_{0\max} - U_{0\min}}{U_0}$$

4. Частота питающей сети f (герц) (т.е. угловая частота $\omega = 2\pi f$).

Определению подлежат: $I_{e\max}$; T_e ; P_e ; $U_{обр}$; $\epsilon_{эф}$; $T_{ф}$.

Расчёт может быть выполнен аналитически либо графо-аналитически.

Аналитический расчёт схемы

1. Выбирается схема выпрямления (следовательно, и величина m) для случая чисто активной нагрузки по заданным величинам \bar{I}_0 ; U_0 ; ΔU ; f и предварительно выбирается тип вентилей. Методика выбора достаточно полно освещена в литературе.

2. Из совместного решения (6) и (19) (ΔU задано) определяются L_e и β .

3. Определяется $\text{tg} \beta$ и $C = \frac{\text{tg} \beta}{R}$ (фарад) (где: $R = \frac{U_0}{I_0}$; [о.м]) (Для $m \geq 3$ значение C проверяется по условию $C > C_{кр}$, где $C_{кр}$ определяется по (24) или (25).

4. Из (11) определяется \bar{U}_0 и находится амплитуда ЭДС фазы вторичной обмотки трансформатора $\epsilon_m = \frac{\bar{U}_0}{U_0}$ (вольт).

и эффективное её значение $e_{эф} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}$. (Для 3-х-фазной мостовой схемы Ларионова получаем линейное напряжение на входе выпрямительного моста).

5. Из (12) определяем \bar{I}_B и находим эффективное значение тока вентиля

$$I_B = \bar{I}_B \cdot \frac{\varepsilon_m}{R} \quad (\text{ампер}).$$

6. Определяем ток фазы вторичной обмотки трансформатора (эффективное значение):

Для схем выпрямления с нулевым выводом

$$I_{\varphi} = I_B \quad (\text{ампер}).$$

Для однофазной мостовой схемы Греча

$$I_{\varphi} = \sqrt{2} I_B \quad (\text{ампер}).$$

Для трехфазной мостовой схемы Ларионова получаем ток в линейном проводе на входе выпрямительного моста:

$$I_L = \sqrt{2} I'_B, \quad \text{где: } I'_B = \sqrt{2} I_B,$$

и, таким образом, $I_L = 2 I_B$ (ампер).

Ток фазы трансформатора в этом случае будет определяться в зависимости от схемы соединения вторичных обмоток трансформатора. При соединении в звезду $I_{\varphi.з} = I_L$. При соединении в треугольник $I_{\varphi.тр} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L$.

7. Из (9) определяется θ_{Bm} и по (10^a) определяется \bar{i}_{Bmax} и $i_{Bmax} = \bar{i}_{Bmax} \cdot \frac{\varepsilon_m}{R}$ (для $m=1$ и $m=2$). Для схем выпрямления с $m \geq 3$ θ_{Bm} не определяется, а величина \bar{i}_{Bmax} находится по (10).

8. Определяется мощность, рассеиваемая в вентиле P_B по (20) ÷ (22)

В большинстве случаев достаточно определить P_B по (20).

9. Определяется максимальное обратное напряжение вентиля

$U_{обр\max} = 2E_m$ (вольт) - для $m=1$ и $m=2$ [√] (схемы с нулевым выводом)

$U_{обр\max} = E_m$ - для однофазной мостовой схемы Греча ($m=2$). $U_{обр\max} = \sqrt{3}E_m$ - для $m=3$. $U_{обр\max} = E_{m.л}$ - для мостовой схемы Ларионова, где $E_{m.л}$ - амплитуда линейного напряжения на входе моста.

10. По данным п.п. 7 ÷ 9 проверяется выбранный в п. 1 тип вентиля:

$$P_{в.гор} \geq P_{в}; U_{обр.гор} \geq U_{обр}; i_{в.мах.гор} \geq i_{в.мах}.$$

11. По полученным значениям ЭДС вторичной обмотки трансформатора $e_{зр}$ и тока фазы $I_{зр}$ известными методами рассчитывается трансформатор.

При этом следует учитывать, что трансформатор работает в импульсном режиме, т.е. при расчёте следует использовать методы расчета импульсных трансформаторов^{х)}.

Способ аналитического расчёта для практики неудобен, ибо необходимо решение системы уравнений (6) и (19), что довольно громоздко. Поэтому для практического использования предлагается графо-аналитический способ, заключающийся в том, что расчёт ведётся по кривым, построенным для наиболее распространённых схем выпрямления по зависимостям, выведенным в настоящей работе. На рис. 8 ÷ 17 представлены зависимости ΔU ; $\bar{I}_в$; $\bar{I}_о = \bar{U}_о$; $\bar{i}_{в.мах}$ и $\lambda_в$; $\bar{i}_{с.мах}$ (для иллюстрации) как функции $tg\beta = \omega RC$ для $m=1, 2, 3, 6, 12$ (расчёты выполнены на электронной вычислительной машине)

Расчёт схемы m - фазного выпрямления с помощью графических зависимостей весьма несложен:

1. По заданной ΔU , находим необходимый $tg\beta$ и определяем $C = \frac{tg\beta}{\omega R}$ (фарад).

2. По найденному $tg\beta$ находим все требуемые величины: в относительных единицах: $\bar{I}_в$; $\bar{I}_о = \bar{U}_о$; $\bar{i}_{в.мах}$ и т.д. и затем находим:

х) В практике в настоящее время трансформаторы для выпрямителей, работающих на ёмкость, рассчитывают аналогично трансформаторам обычного синусоидального напряжения (тока). Необходима проработка затронутого вопроса (в работе не рассматривается).

$$\varepsilon_m = \frac{U_0}{U_0} \text{ (вольт)}; \mathcal{I}_\theta = \bar{\mathcal{I}}_\theta \frac{\varepsilon_m}{R} \text{ (ампер)}; \dot{i}_{\theta, \max} = \bar{i}_{\theta, \max} \frac{\varepsilon_m}{R} \text{ (ампер)}.$$

Далее, как и при аналитическом расчёте, находим:

$$e_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}; U_{\text{обр}}; \mathcal{I}_\varphi; P_\theta.$$

Экспериментальная проверка полученных соотношений.

Эксперименты проводились по схеме однофазного моста Греча (рис. 18). Осциллографировались и замерялись токи: фазы трансформатора, вентиля, выпрямленный. Величина сопротивления нагрузки составляла $R = 400$ ом. Ёмкость варьировалась в пределах от нуля до 100 мкф. С целью исключения влияния внутреннего сопротивления трансформатора питание схемы осуществлялось от трансформатора, мощность которого превышала выходную мощность схемы $P_0 = \bar{I}_0 U_0$ примерно в 300 раз. Результаты экспериментов и расчётов приведены в таблице 1 (в относительных единицах: $\bar{i} = \frac{i R}{\varepsilon_m}$; $\bar{u} = \frac{u}{\varepsilon_m}$; $\Delta \bar{u}_1 = \frac{\Delta u_1}{U_0}$) Осциллограммы, снятые на осциллографе Ю-4 и переведённые на кальку приведены на рис. 18.

Эксперименты полностью подтвердили правильность теоретических выводов. Имеющиеся несущественные отклонения вызваны влиянием внутреннего сопротивления трансформатора и вентиля.

Таблица 1 (Величины относительные)

	Опыт						Расчёт		Примечание
	0	5	10	20	50	100			
$\bar{t}_{ср}$							2,572	62,8	
\bar{t}_B							12,56	18,56	
\bar{C} [мкср]	0	0,64	0,66	0,7	0,8	0,85	0,986	80,97	85,27
\bar{I}_o	0,636	0,64	0,66	0,7	0,8	0,85	1,19	1,4	1,49
\bar{I}_e	0,5	0,57	0,64	0,76	1,16	1,46	20	50	100
$\bar{\psi}$							10		
\bar{L}_T							0,668	0,698	0,908
$\bar{\Delta U}_1$	1,57	1,2	1	0,68	0,32	0,2	0,603	0,69	1,22
\bar{L}_e	3,141	2,4	1,85	1,45	0,94	0,68	0,776	0,852	1,515
$\bar{L}_{сmax}$	1	1,3	1,65	2,3	4,8	7,6	0,25	0,75	0,732
							0,6	1,44	2,16
							1,8	3,24	5,4
							1,09	0,7	0,365
							1,92	1,5	0,97
							0,74,6	0,8,195	3,1,75
							1,78	2,5	5,1
									0,7
									2,2,53 км
									8,2

ВЫВОДЫ

В работе проведено полное исследование схемы m - фазного выпрямителя, работающего на параллельную цепь RC без учёта внутреннего сопротивления трансформатора и вентилей. Получены все необходимые зависимости для расчёта схем. Получены расчётные графики, дана методика расчёта. Выявлено наличие двух принципиально различных режимов: докритического и закритического, определяемых величиной ёмкости $C \gtrless C_{кр}$. Получено выражение для $C_{кр}$.

Таким образом, вскрыты и освещены неизвестные из литературных данных физические закономерности и на их основе дана полная и достаточно простая методика практического расчёта схем. Результаты работы найдут применение как в практике, так и в теории преобразовательной техники.

Приложение

(Схемы, графики, этюды)

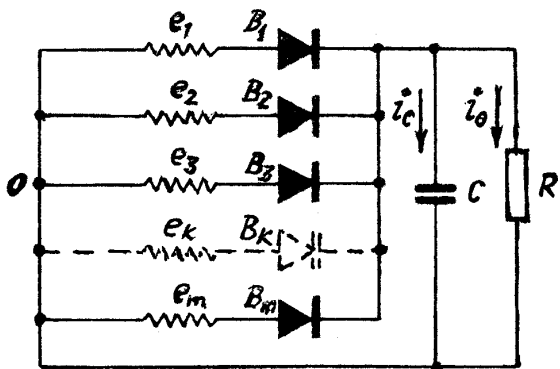


Рис.1. Схема замещения т-фазного выпрямителя с нулевой точкой.

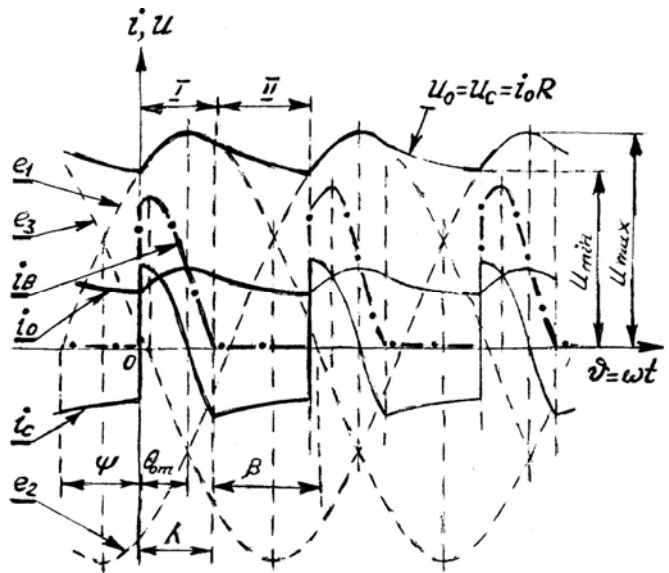


Рис.2. Диаграммы токов и напряжений

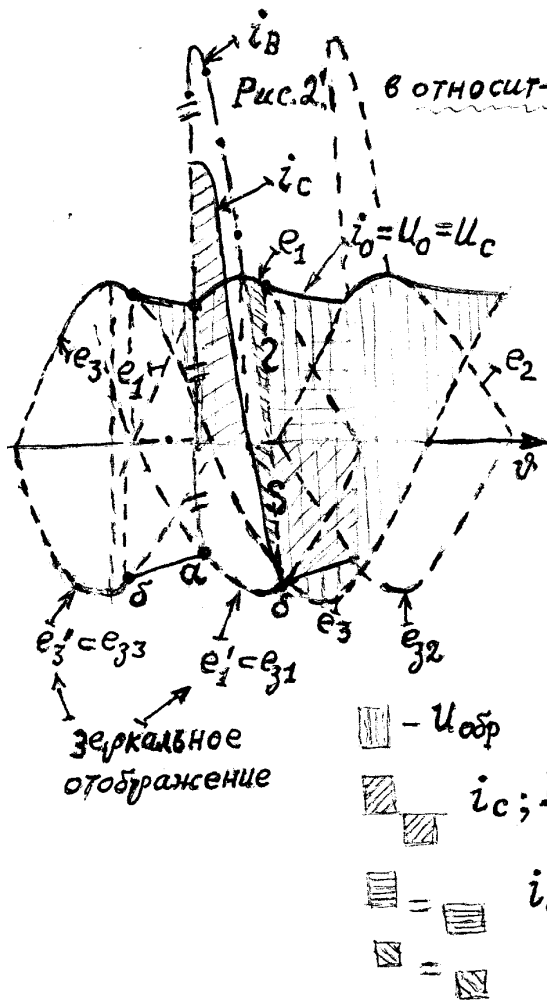


Рис.2'.

Рис.2' в относительных единицах

(ад) Точки тока ёмкости при самостоятельном разряде находятся на зеркальных синусоидах.

Рис.2'. Изображение (набросок) автора. На обороте с.25 (отчёт справа-подправленный Рис.2 отчёта на с.26.

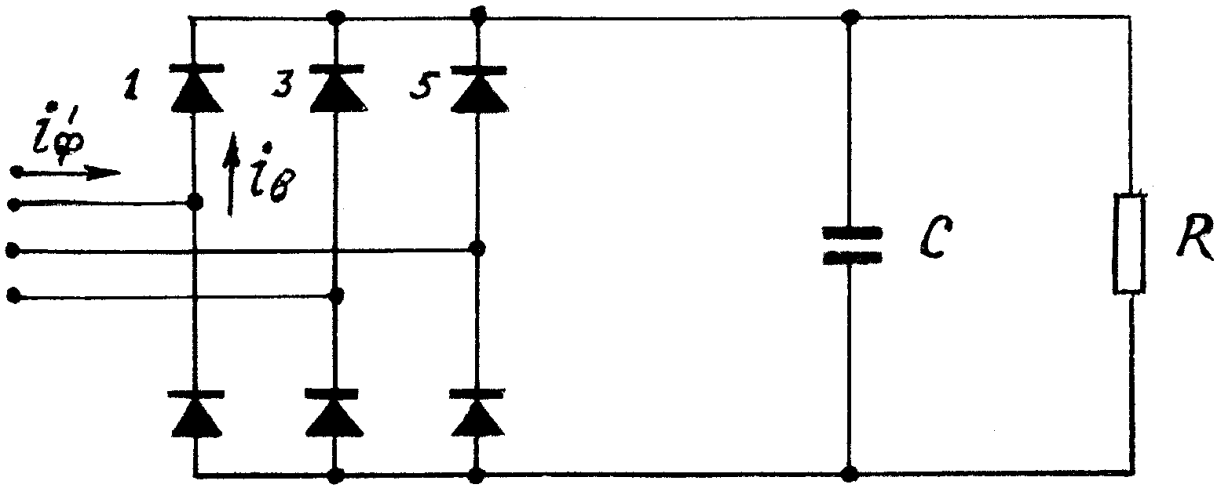


Рис.3. Мостовая 3-фазная схема Ларионова

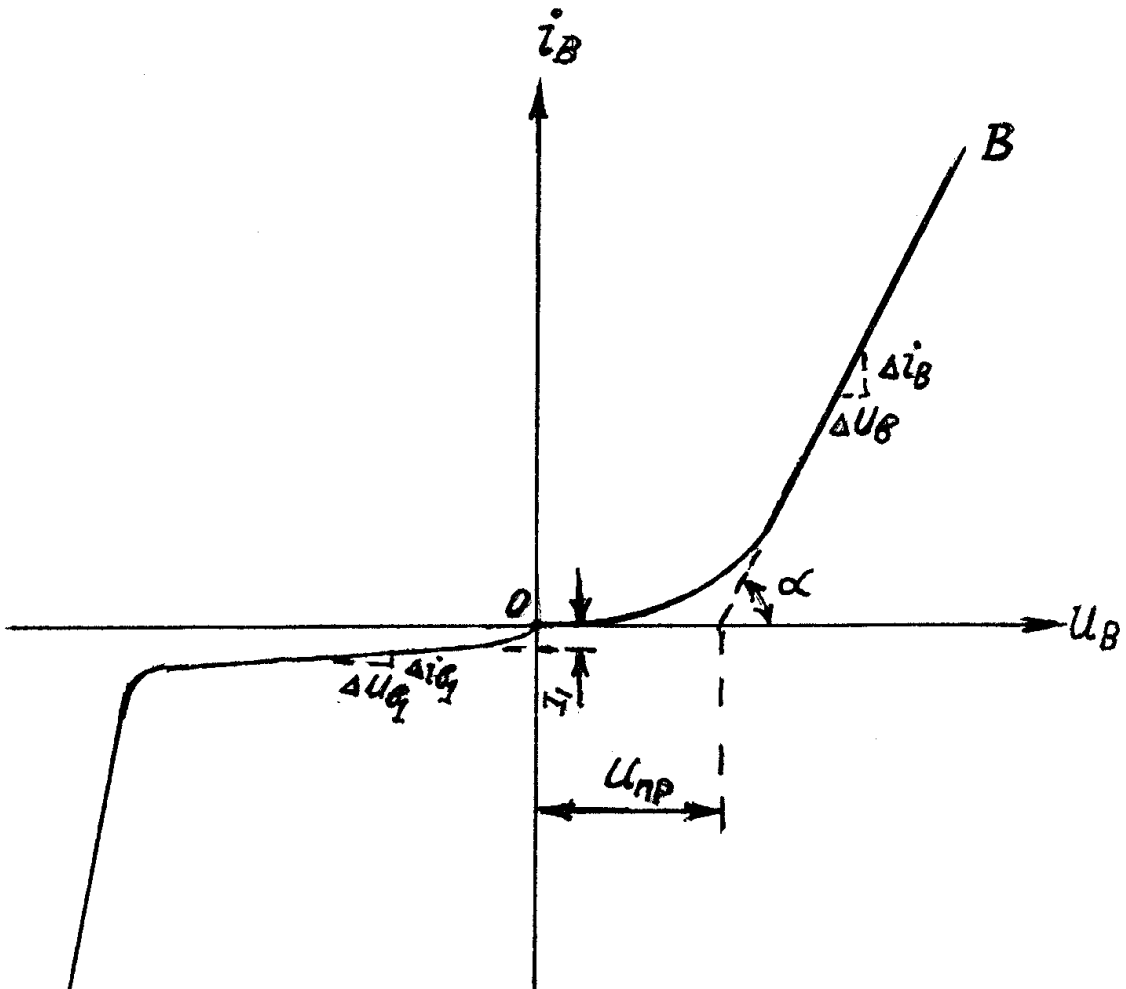


Рис.4. Вольтамперная характеристика полупроводникового вентиля

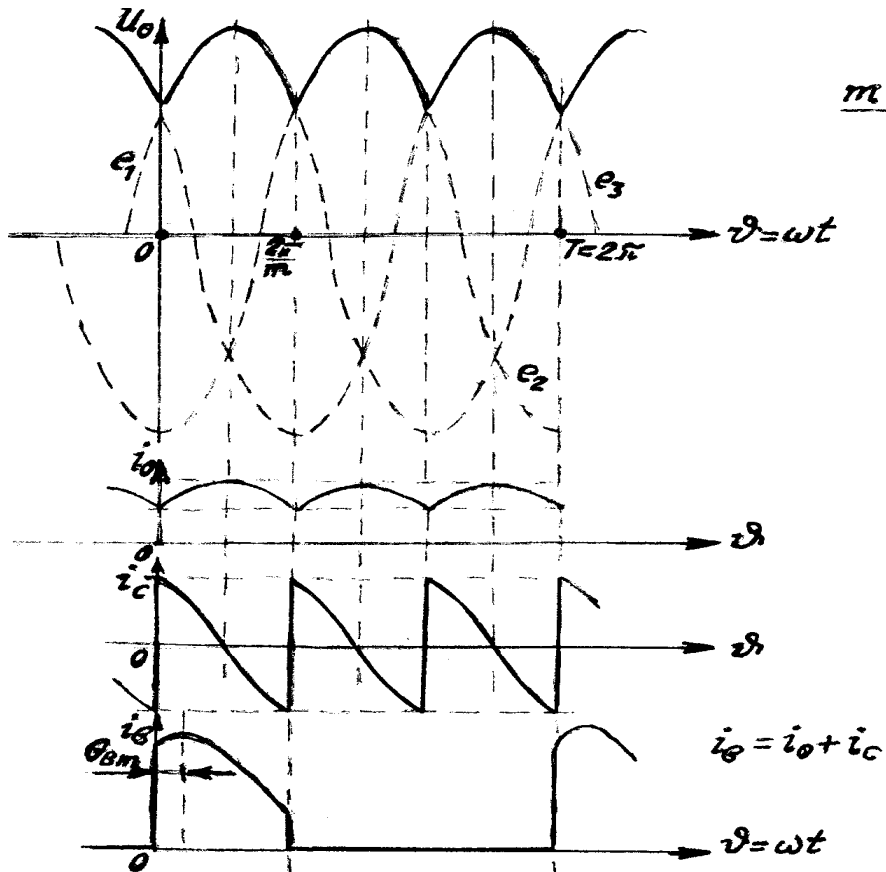


Рис. 5. Графики токов и напряжений закрытительского режима $\lambda_B = \frac{2\pi}{m}$; $C < C_{кр}$

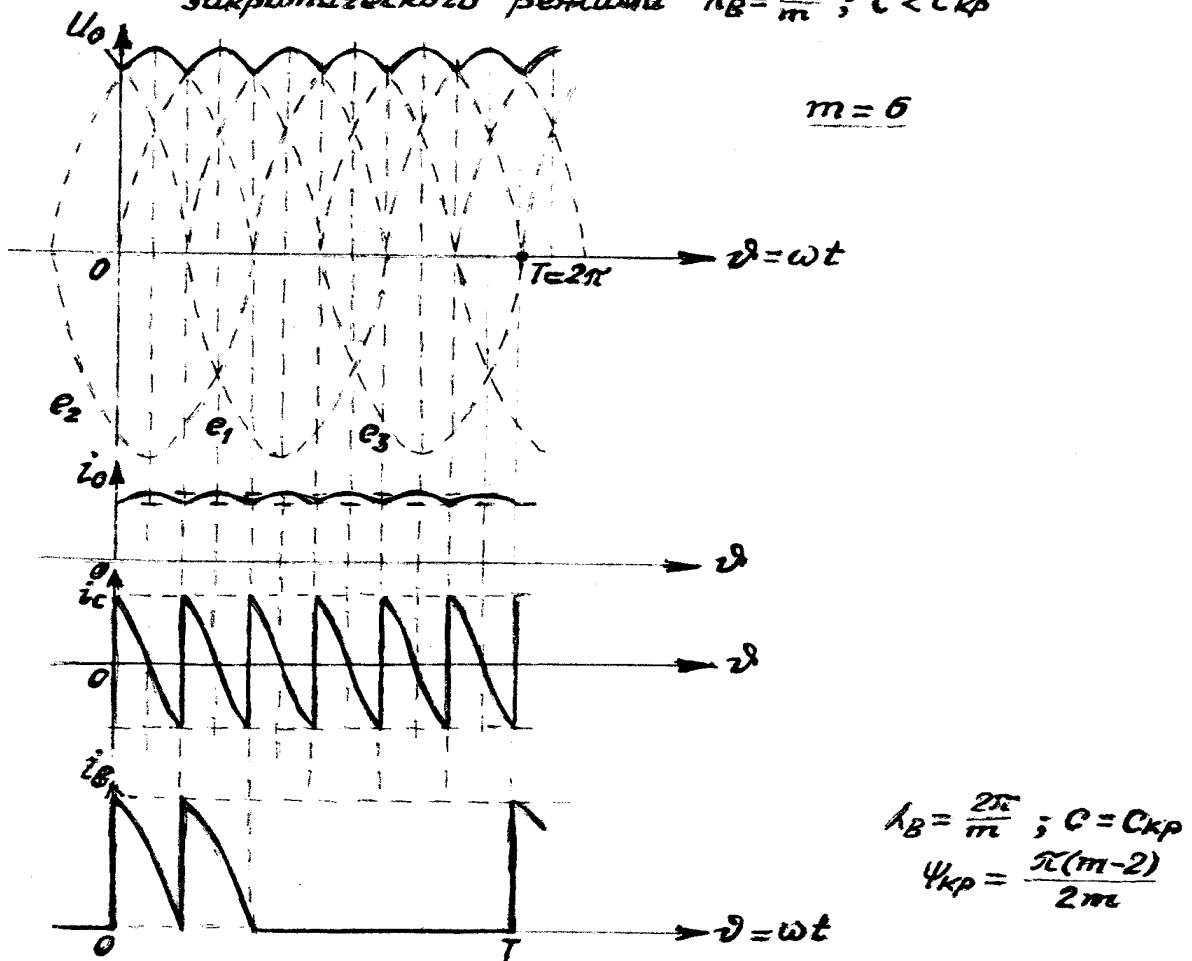


Рис. 6. Графики токов и напряжений критического режима

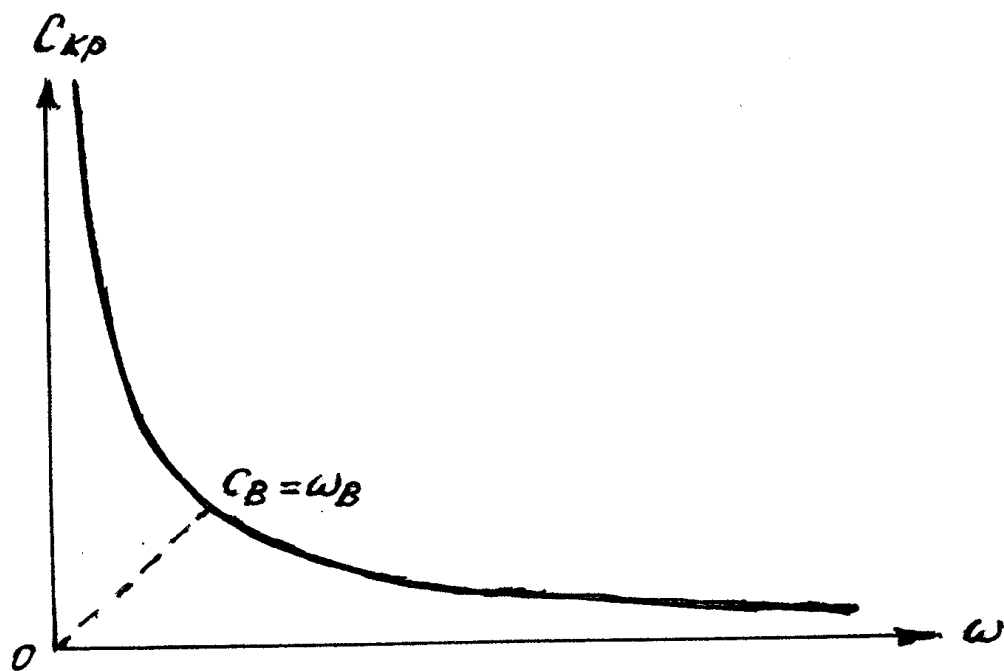
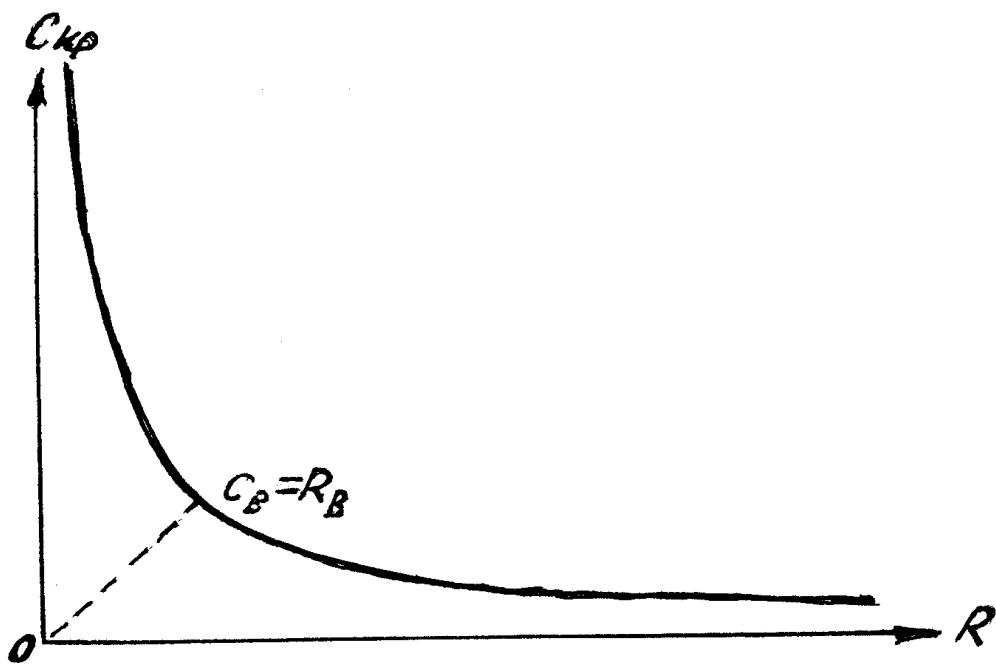


Рис. 7. Зависимости критической ёмкости от сопротивления нагрузки и частоты.

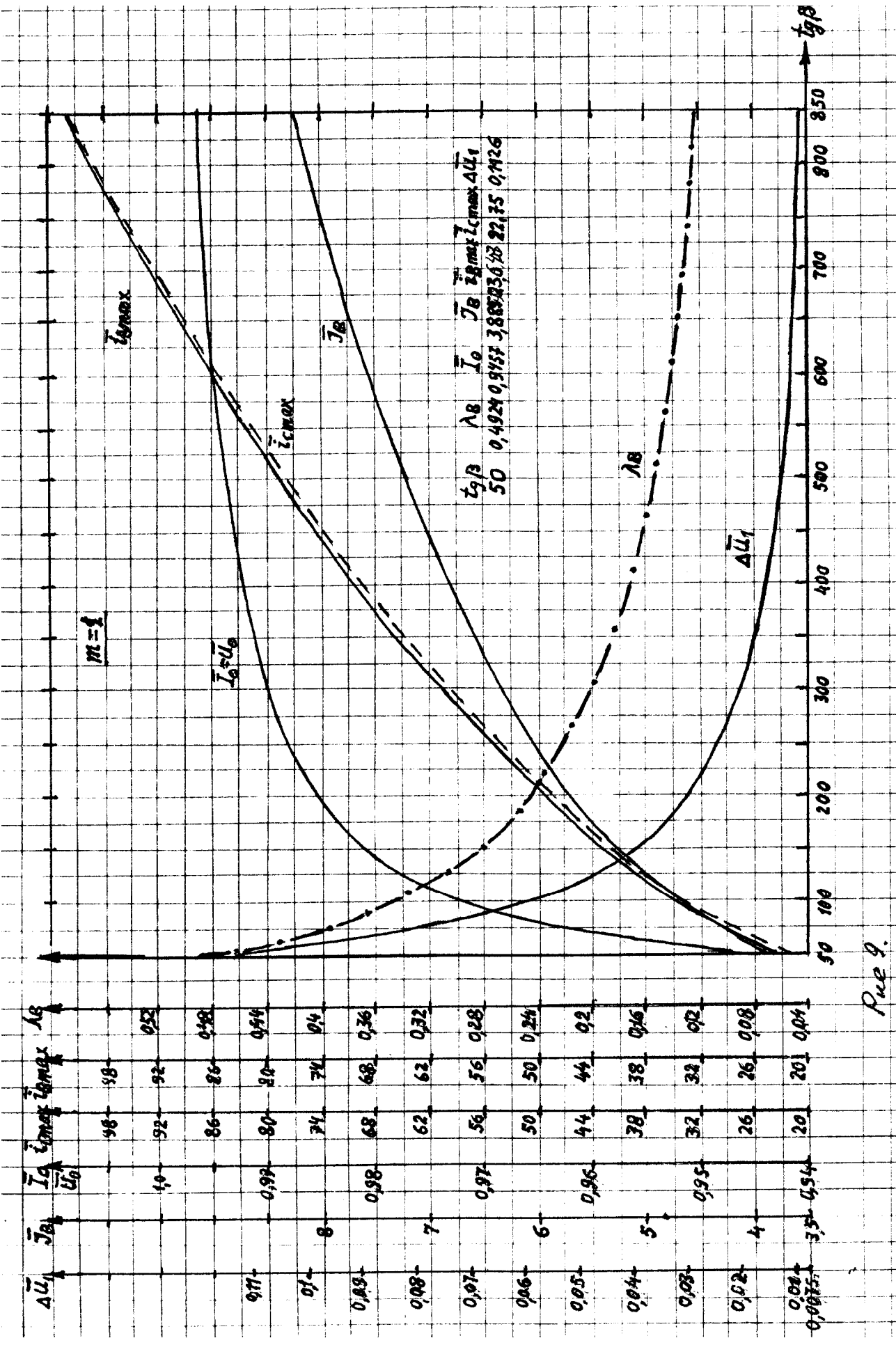
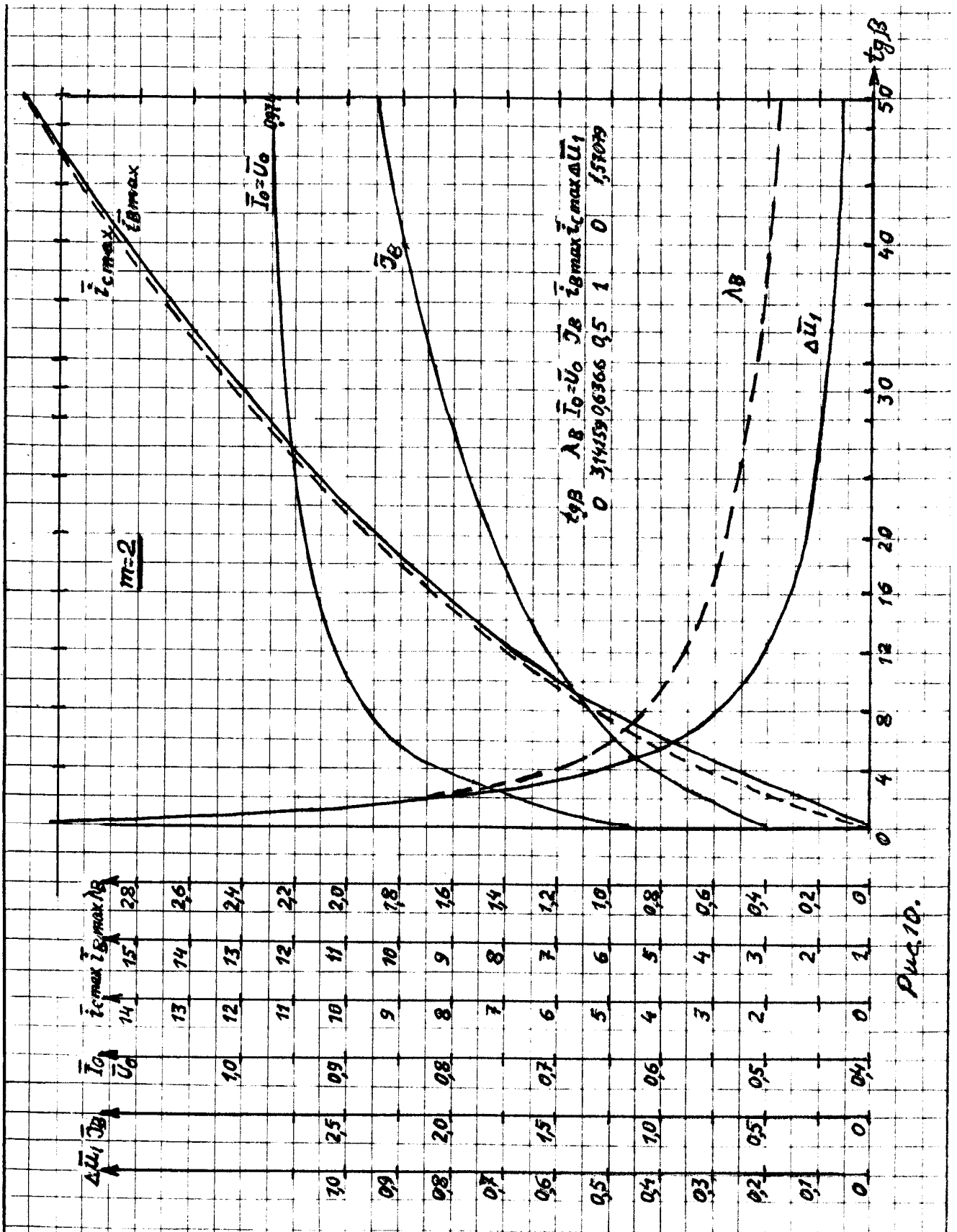


Рис. 9.



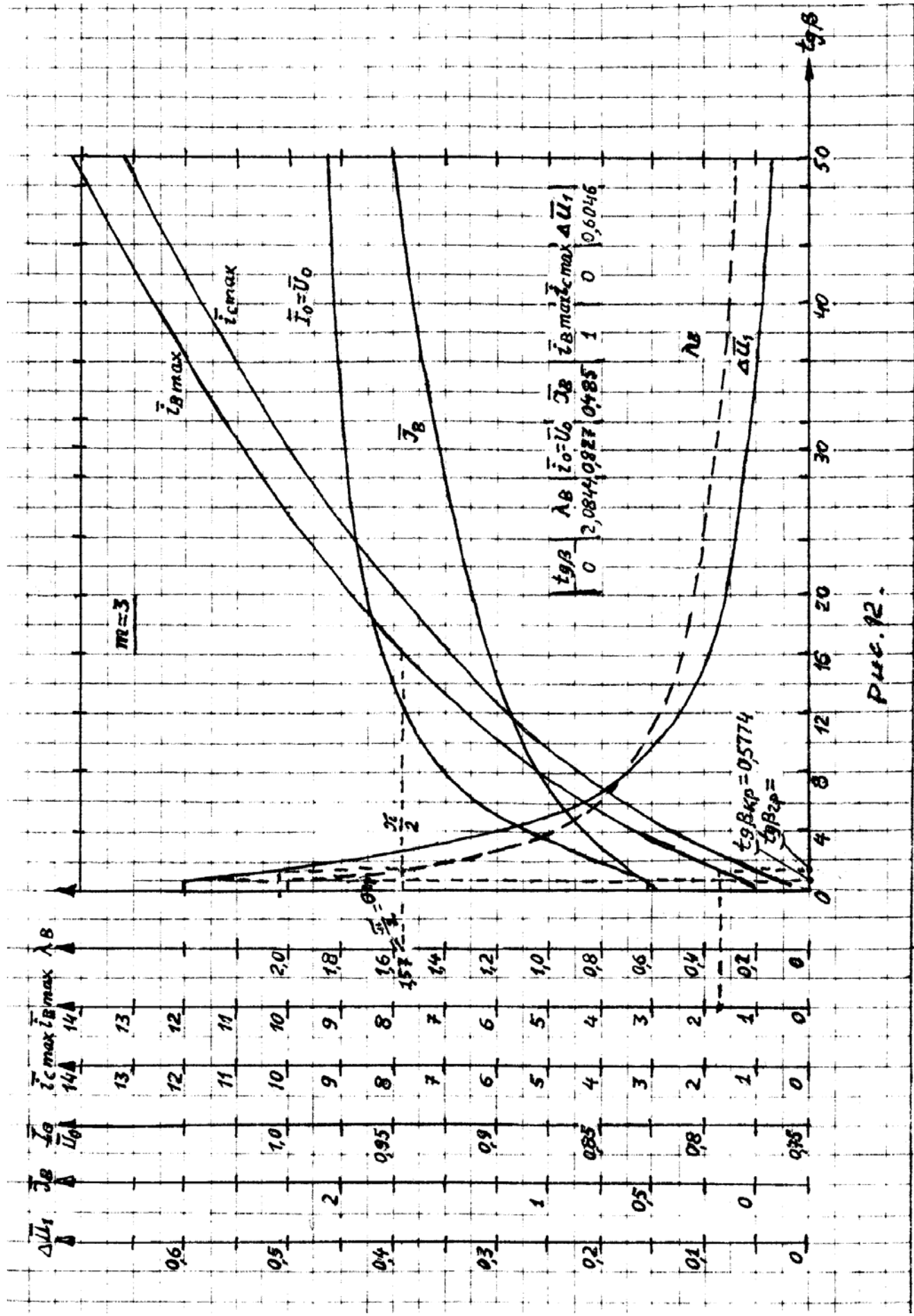
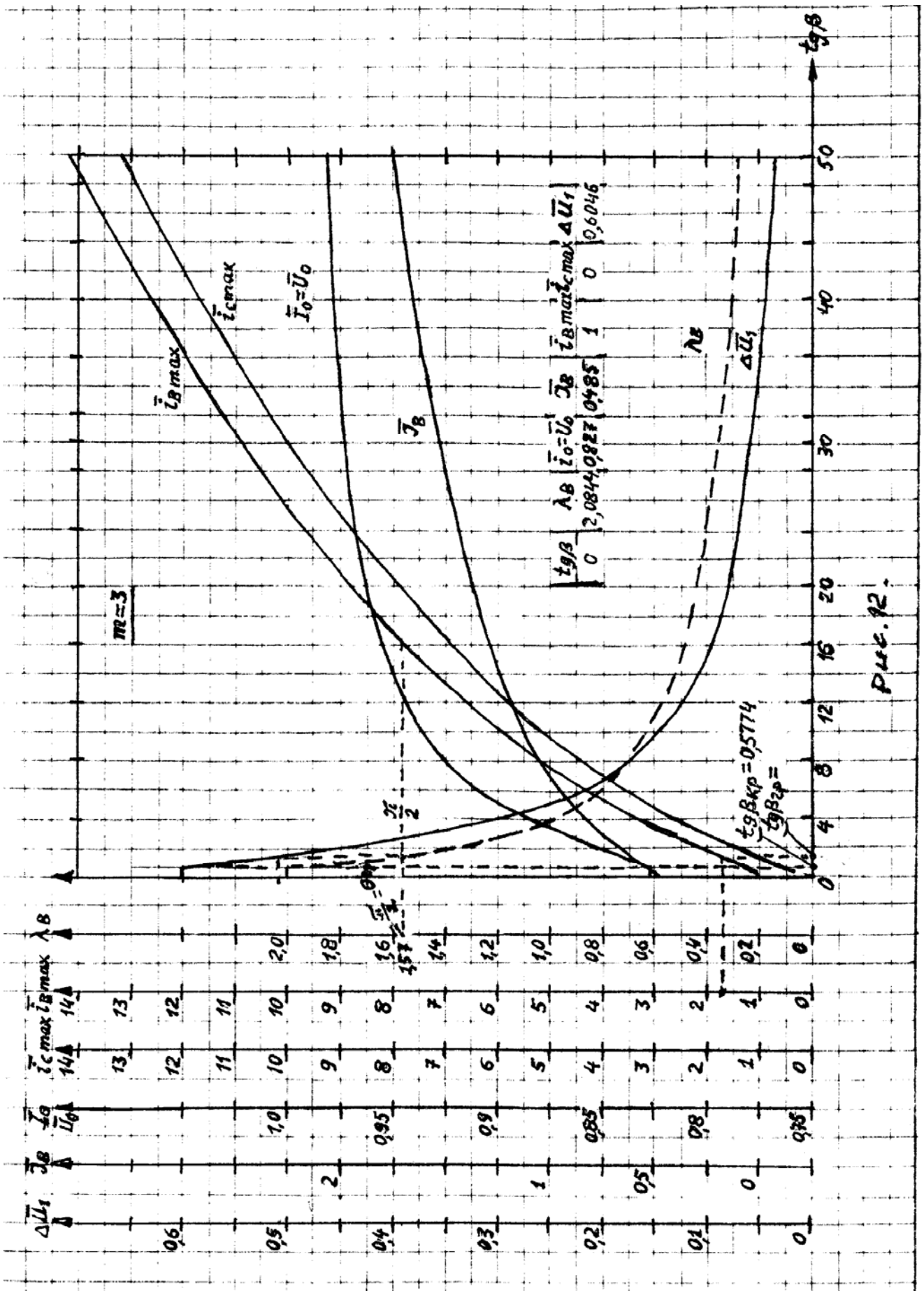
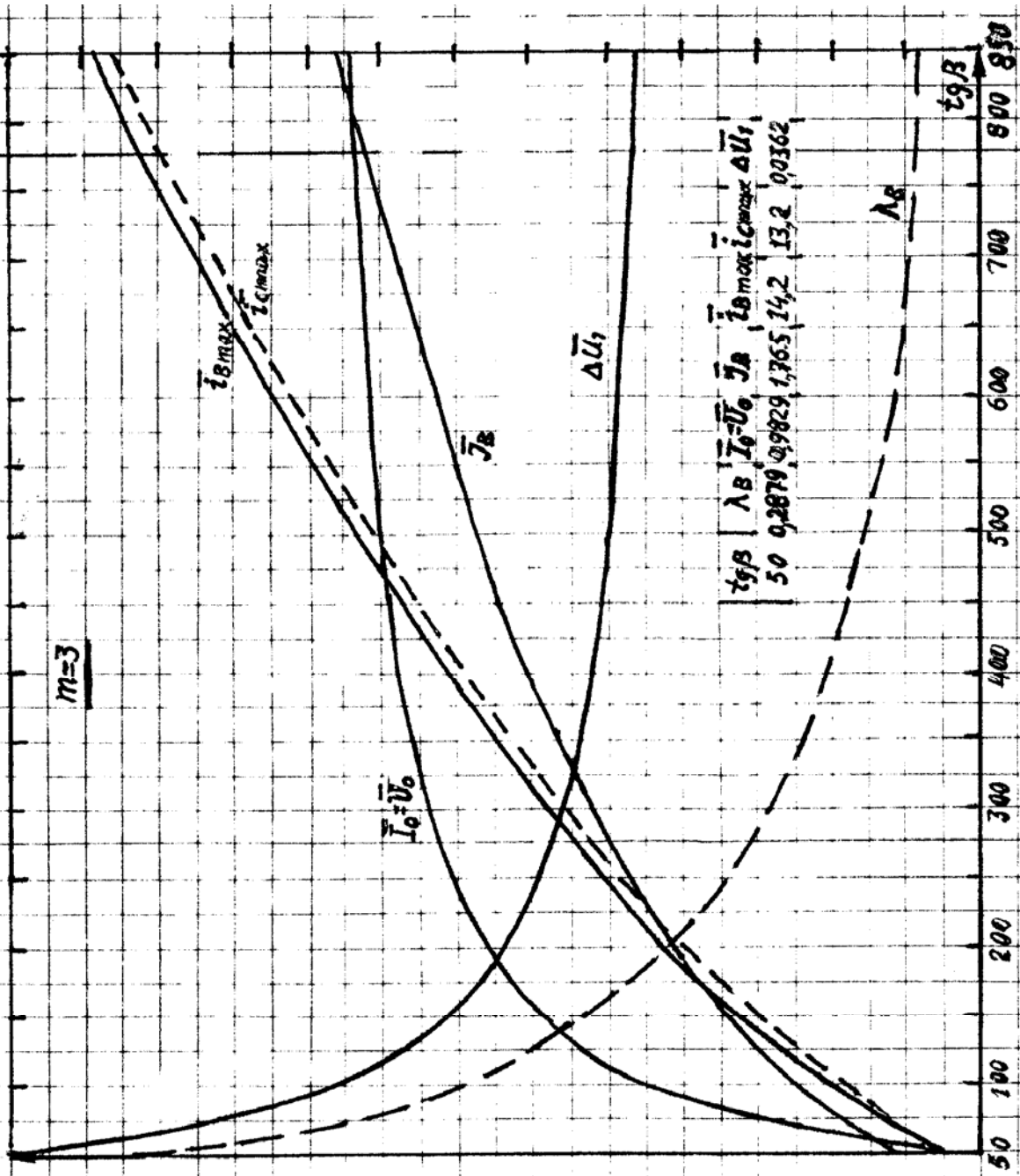


Рис. 12.

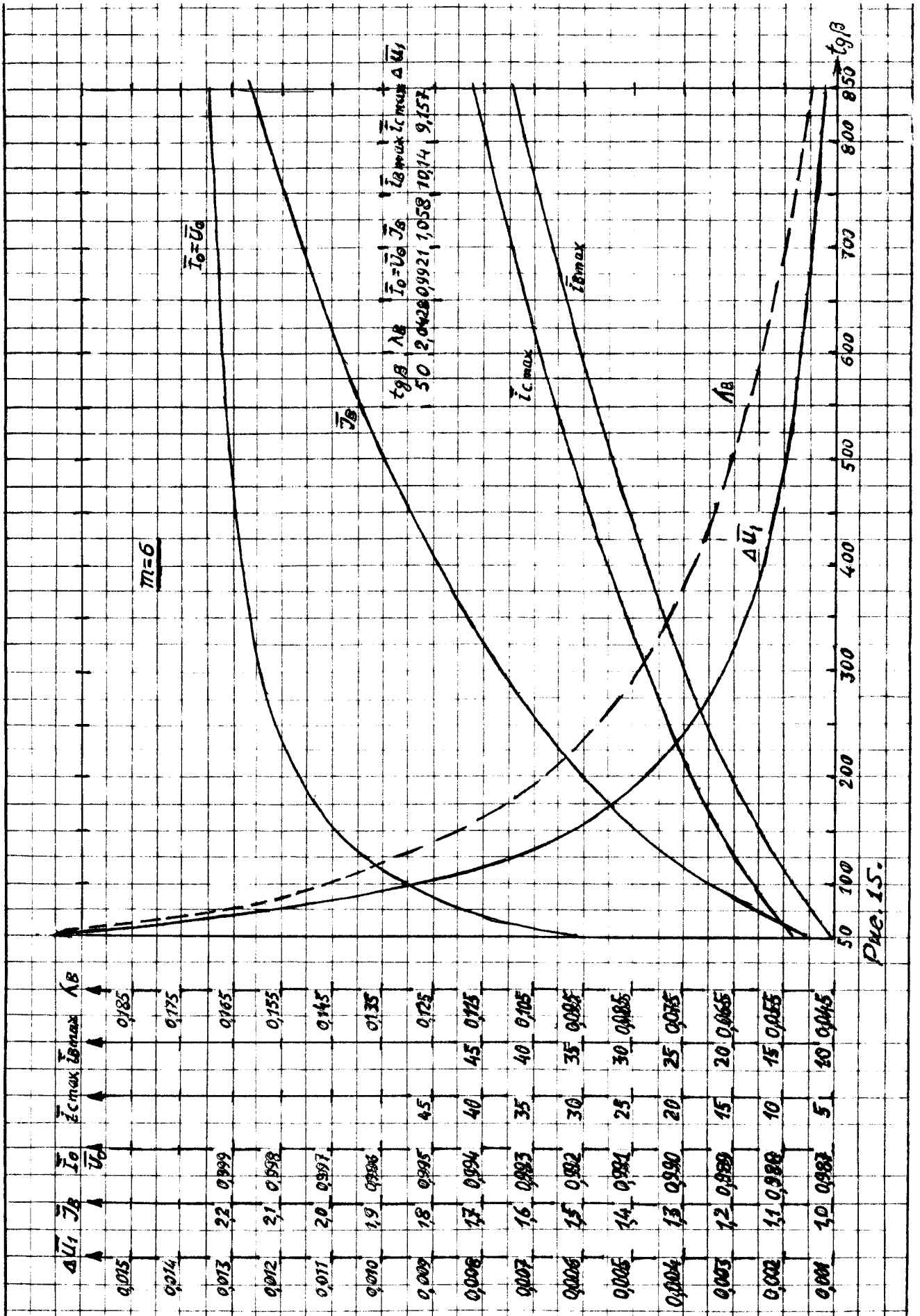


ΔU_1	J_B	\bar{U}_0	\bar{I}_0	i_{Cmax}	i_{gmax}	λ_B
0,032				60	60	0,30
0,028				56	56	0,28
0,024	4			52	52	0,26
0,020		1		48	48	0,24
0,016	35	0,998		44	44	0,22
0,012		0,996		40	40	0,20
0,008	3	0,994		36	36	0,18
0,004		0,992		32	32	0,16
0	25	0,990		28	28	0,14
		0,988		24	24	0,12
	2	0,986		20	20	0,10
		0,984		16	16	0,08
	15	0,982		12	12	0,06



$m=3$

PWF.13



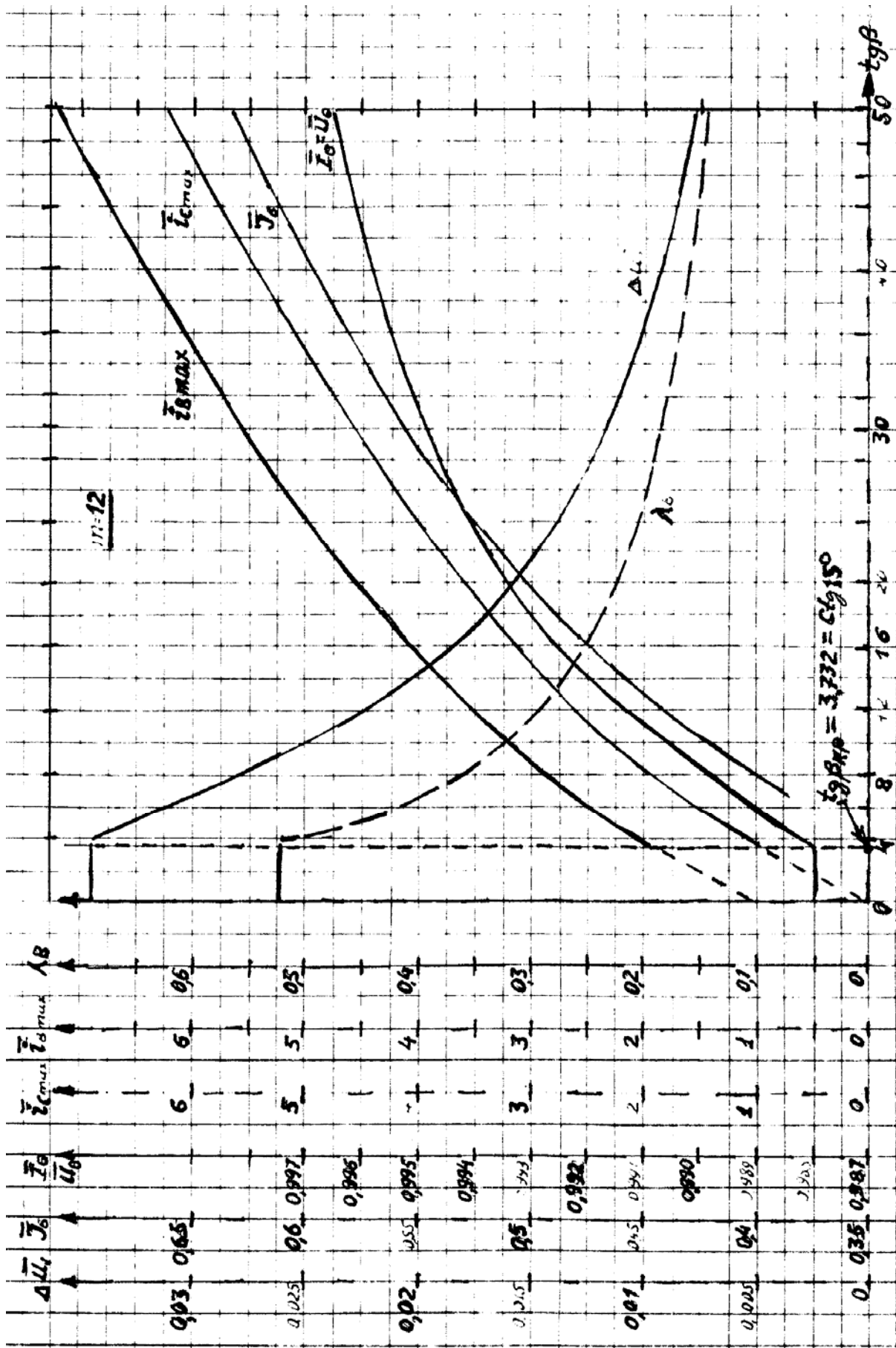
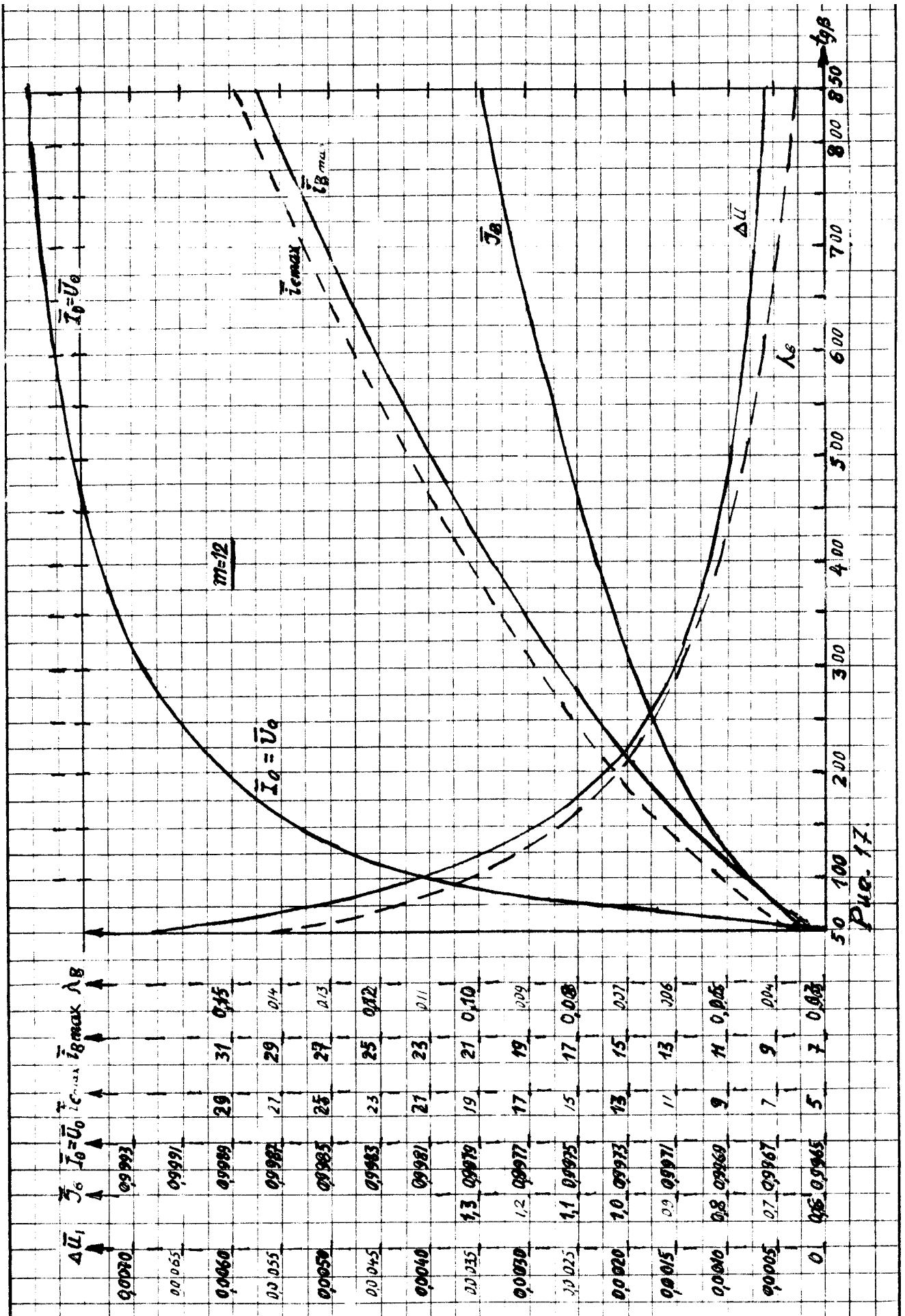
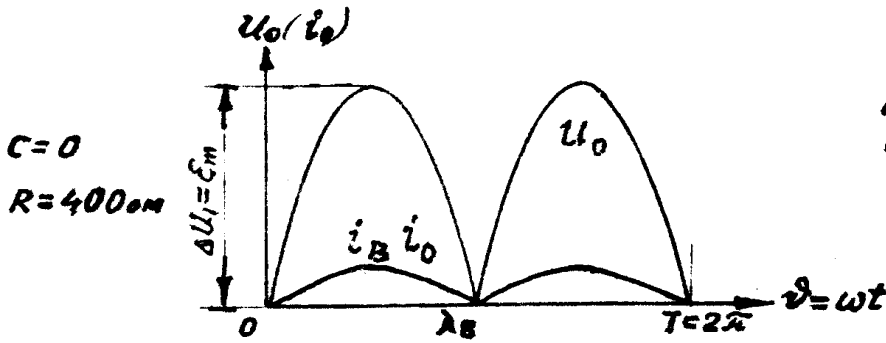
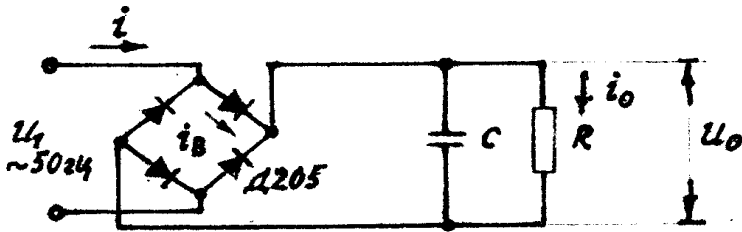
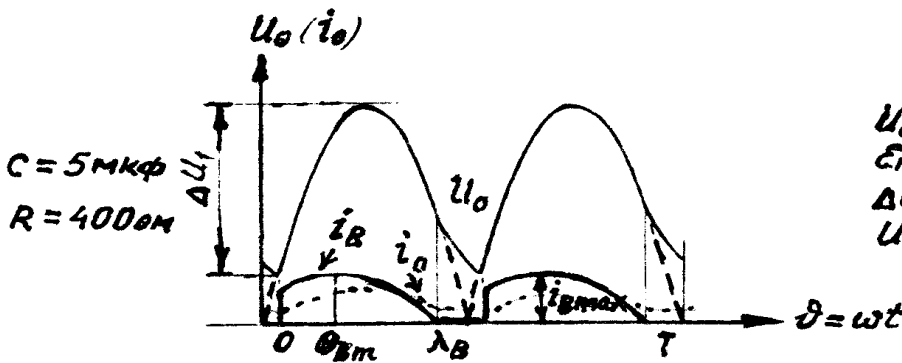


Рис. 16.

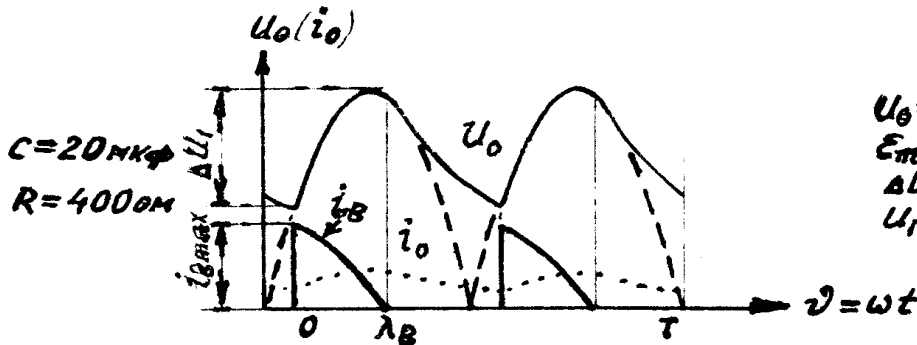




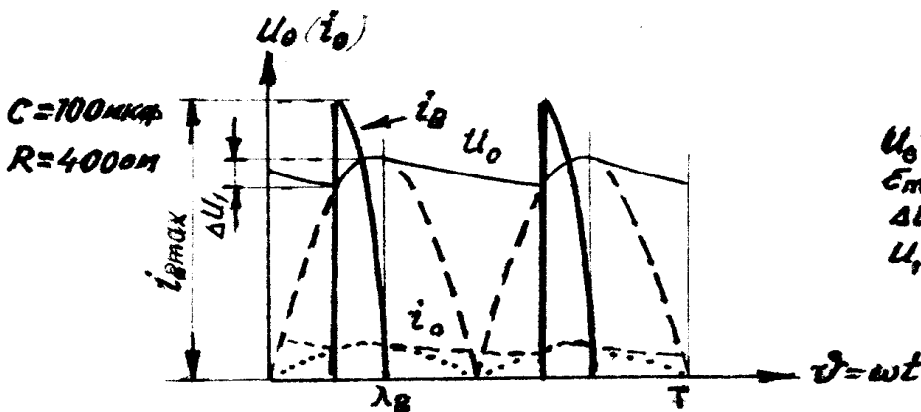
$U_0 = 35,5\text{В}$ $I_0 = 0,088\text{а}$
 $\mathcal{E}_m = 56\text{В}$ $J_B = 0,07\text{а?}$
 $\Delta U_1 = 56\text{В}$ $i_{B\text{max}} = 0,14\text{а}$
 $U_1 = 39,5\text{В}$ $\text{н.д. } \mathcal{E}_m / R = 14\text{а}$
 т.е. $\bar{i}_B = 1$.



$P_0 = 3,4\text{Вт}$
 м.е. $P_{ex} \approx 1\text{кВт?}$
 $U_0 = 36\text{В}$ $I_0 = 0,09\text{а}$
 $\mathcal{E}_m = 56\text{В}$ $J_B = 0,08\text{а}$
 $\Delta U_1 = 43\text{В}$ $i_{B\text{max}} = 0,182\text{а}$
 $U_1 = 39,5\text{В}$ т.е. $\bar{i}_B = 1,3$



$U_0 = 39\text{В}$ $I_0 = 0,098\text{а}$
 $\mathcal{E}_m = 56\text{В}$ $J_B = 0,106\text{а}$
 $\Delta U_1 = 21\text{В}$ $i_{B\text{max}} = 0,32\text{а}$
 $U_1 = 39,5\text{В}$ т.е. $\bar{i}_B = 2,29$



$U_0 = 50,5\text{В}$ $I_0 = 0,127\text{а}$
 $\mathcal{E}_m = 56\text{В}$ $J_B = 0,21\text{а}$
 $\Delta U_1 = 9,5\text{В}$ $i_{B\text{max}} = 1,06\text{а}$
 $U_1 = 39,5\text{В}$ т.е. $\bar{i}_B = 7,6$

Рис.18 Осциллограммы и данные измерений.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
1. Аннотация	2
2. Схема замещения и её анализ	3
3. Вывод основных соотношений	4
4. Максимальное обратное напряжение	10
5. Средние значения выпрямленного напряжения и тока	10
6. Эффективные значения токов	11
7. Пульсация выпрямленного напряжения	12
8. Мощность потерь в вентиле	13
9. Особенности работы схемы m -фазного выпрямления	15
10. Критическое значение ёмкости	17
11. Методика расчёта схемы m -фазного выпрямителя	19
12. Экспериментальная проверка полученных зависимостей	22
13. Выводы	24
14. Приложение (схемы, графики, эпюры).	25
15. Оглавление	41