

Данная публикация – из Цикла R/IC. Цикла работ по вентильным конвертерам с ёмкостным фильтром. Первый материал – научный отчёт. Оригинал. По нумерации в Цикле – № 1. Номер электронного варианта (дополненного, исправленного и при ином авторском дизайне) временно не известен. Условно для Ч.1, Ч.2 – №1а.эл, 1б.эл.

Методика расчета схемы m – фазного выпрямителя и выбора её элементов

Исходными (заданными) величинами являются:

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

$$\Delta \bar{U}_1 = \frac{U_{o\max} - U_{o\min}}{U_o}$$

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

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

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}_o ; U_o ; ΔU_1 ; f и предварительно выбирается тип вентилей. Методика выбора достаточно полно освещена в литературе.

2. Из совместного решения (6) и (19) ($\Delta \bar{U}_1$ задано) определяются L_e и β .

3. Определяется $\tan \beta$ и $C = \frac{\tan \beta}{R}$ (фарад) $\left(\text{где: } R = \frac{U_o}{\bar{I}_o}; [ом] \right)$ (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}_o и находится амплитуда ЭДС фазы вторичной обмотки трансформатора $\epsilon_m = \frac{U_o}{U_o}$ (вольт).

¹ Ч.1, стр.1-26 в <http://econf.rae.ru/article/7824>.

NB. Автор признателен Наталии Юрьевне (глав.уч.сек) за толику свободы. Опубликования в авторском исполнении.

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:

$$P_{в. доп} \geq P; U_{обр. доп} \geq U_{обр}; i_{в. max. доп} \geq i_{в. max}.$$

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 $\Delta U; \bar{I}_в; \bar{I}_о = \bar{U}_о; \bar{i}_{в. max}$ и $\lambda_в; \bar{i}_{с. max}$ (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: $\bar{I}_в; \bar{I}_о = \bar{U}_о; \bar{i}_{в. max}$ 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 незначительные отклонения вызваны влиянием внутреннего сопротивления трансформатора и вентиля.

Таблица 1 (Величины относительные)

	Опыт					Расчёт					Примечание	
	0	5	10	20	50	100						
$\bar{t}_{ср}$							9,628	2,572	62,8	18,56		
\bar{t}_B							32,74	80,97	80,97	85,27		
C [мкср]	0	5	10	20	50	100	0,564	1,19	1,4	1,49		
							5	20	50	100		
\bar{t}_0	0,636	0,64	0,66	0,7	0,8	0,85	0,668	0,698	0,75	0,86	0,908	среднее значение
\bar{t}_e	0,5	0,57	0,64	0,76	1,16	1,46	0,603	0,69	0,8	1,22	1,515	эквивалентное значение
ψ							0,0776	0,2556	0,452	0,732	0,952	
\bar{t}_n							0,25 мкср	0,75 мкср	1,44 мкср	2,16	3	
							0,6	1,8	3,46	5,9	7,2	
$\Delta \bar{t}_n$	1,57	1,2	1	0,68	0,32	0,2	1,31	1,09	0,7	0,365	0,2	
λ_e	3,141	2,4	1,85	1,45	0,94	0,68	2,5	1,92	1,5	0,97	0,7	
$\bar{t}_{сmax}$	1	1,3	1,65	2,3	4,8	7,6	5,192	67,74,6	48,175	31,75	22,53 мкср	
							1,42	1,78	2,5	5,1	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, эскизы)

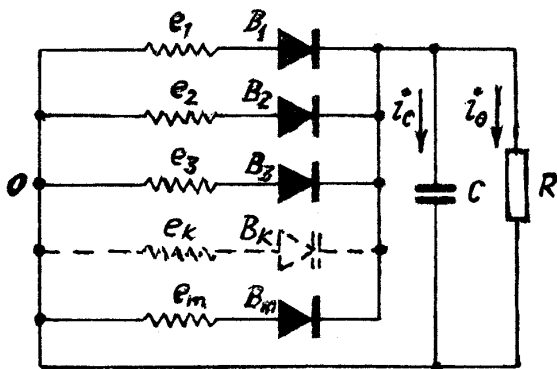


Рис.1. Схема замещения т-фазного выпрямителя с нулевой точкой.

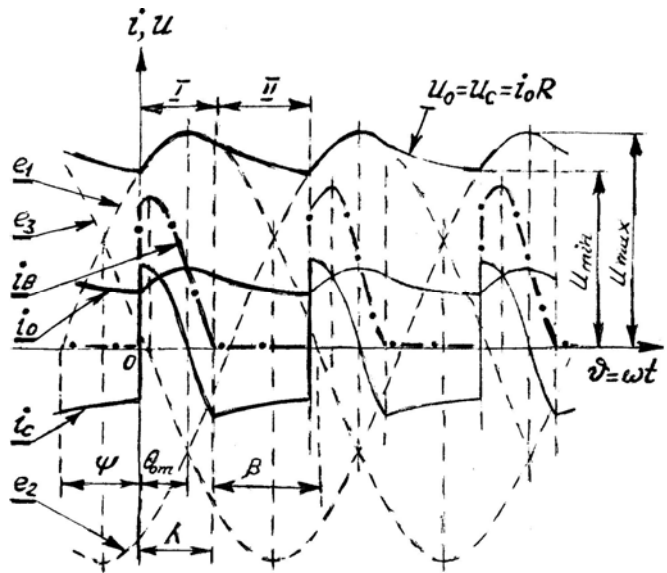


Рис.2. Диаграммы токов и напряжений

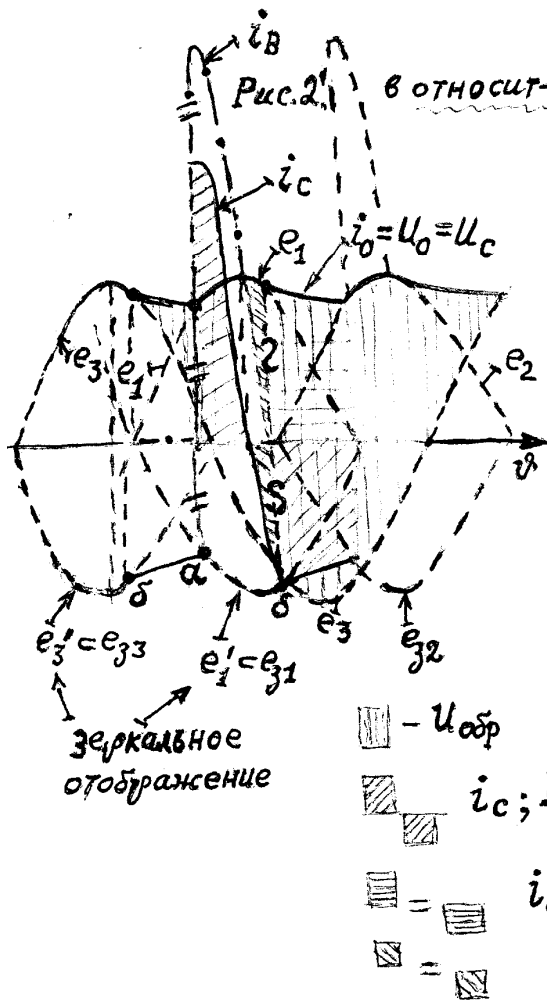


Рис.2'.

Рис.2' в относительных единицах

(ад)
Точки тока ёмкости при самост-м разряде находятся на зеркальных синусоидах.

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

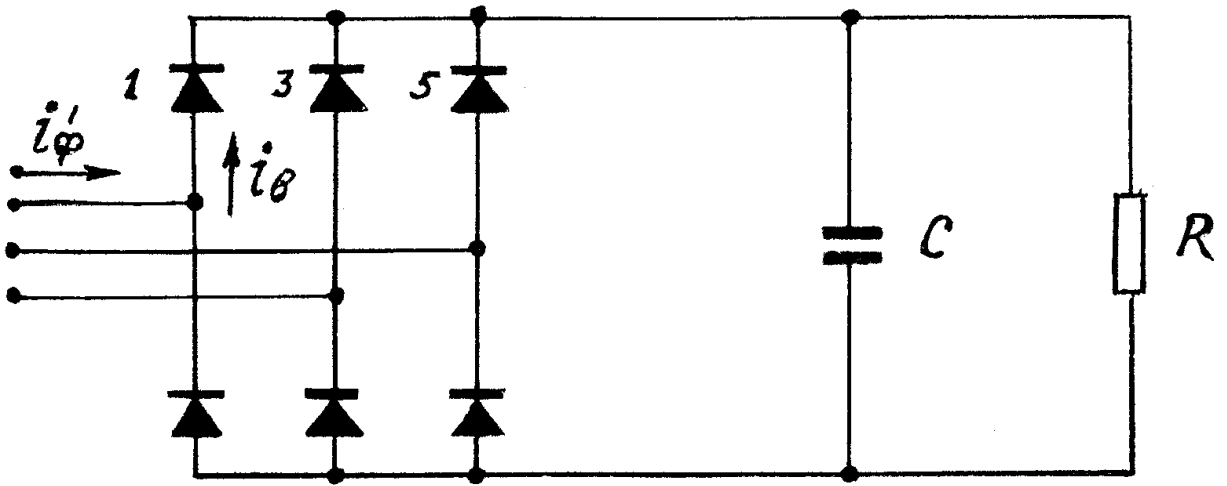


Рис.3. Мостовая 3-фазная схема Ларионова

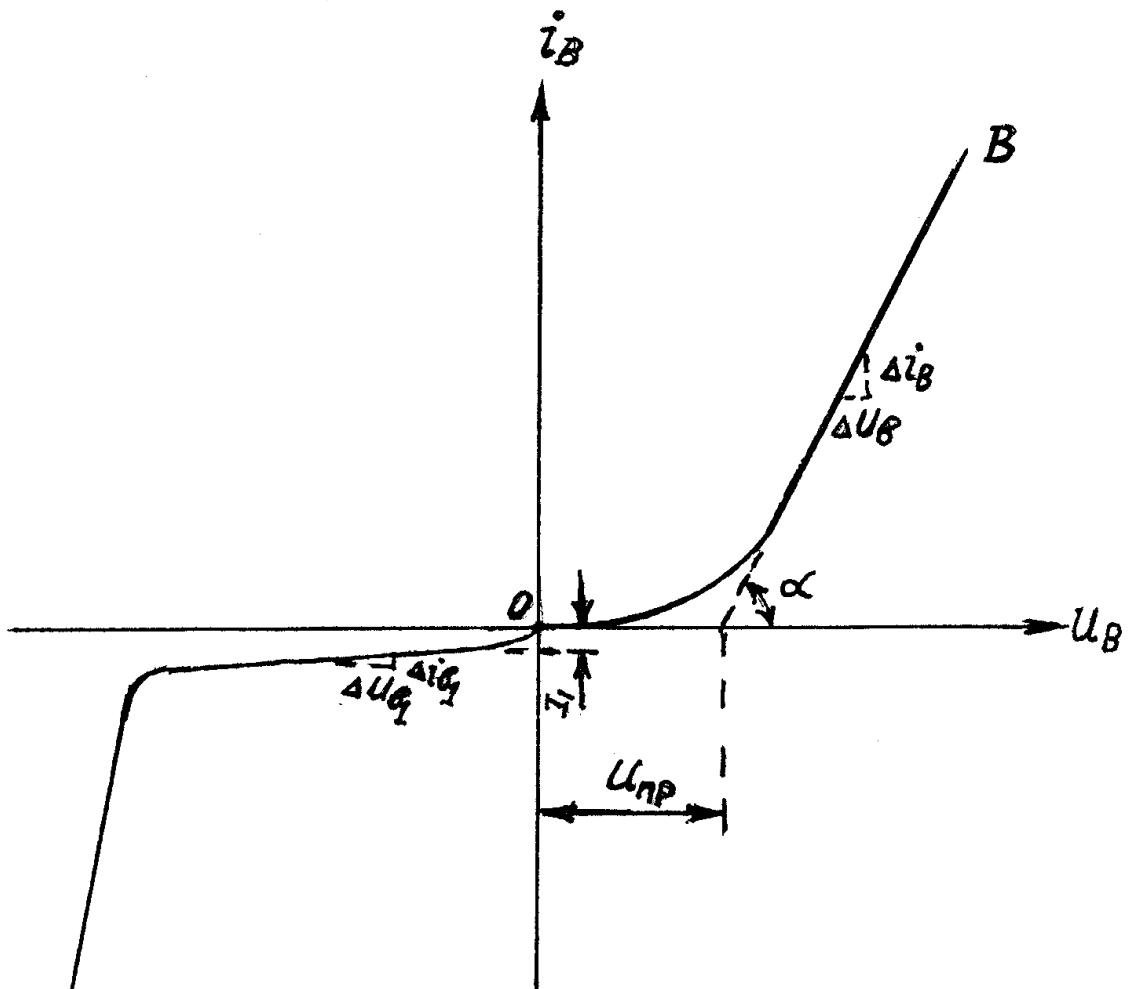


Рис.4. Вольтамперная характеристика полупроводникового вентиля

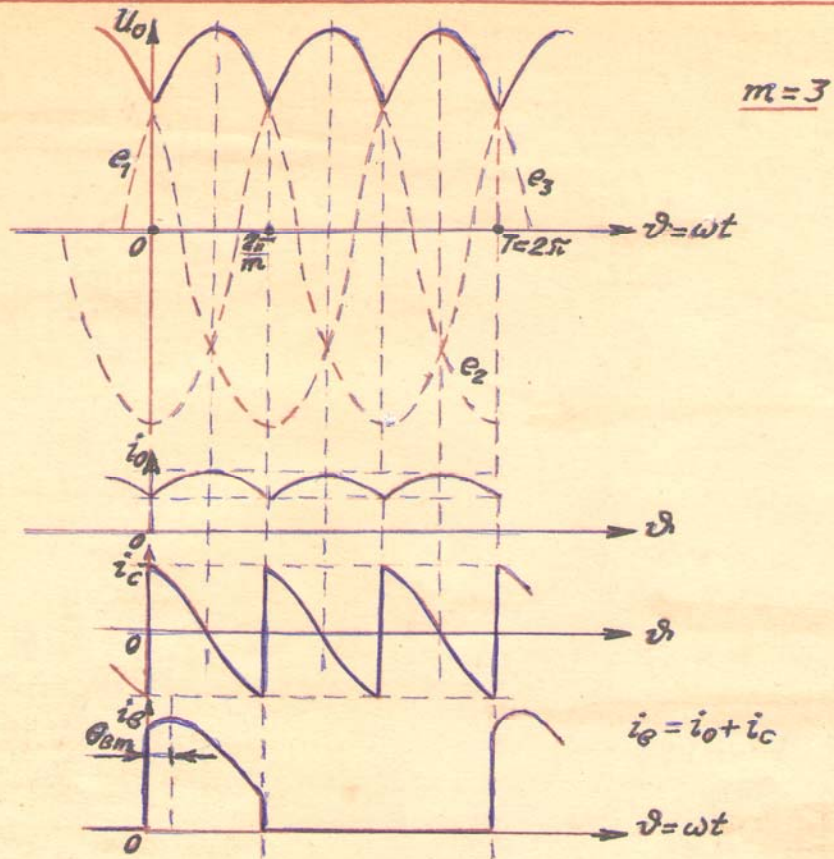


Рис. 5. Графики токов и напряжений закрытого режима $\lambda_B = \frac{2\pi}{m}$; $C < C_{кр}$

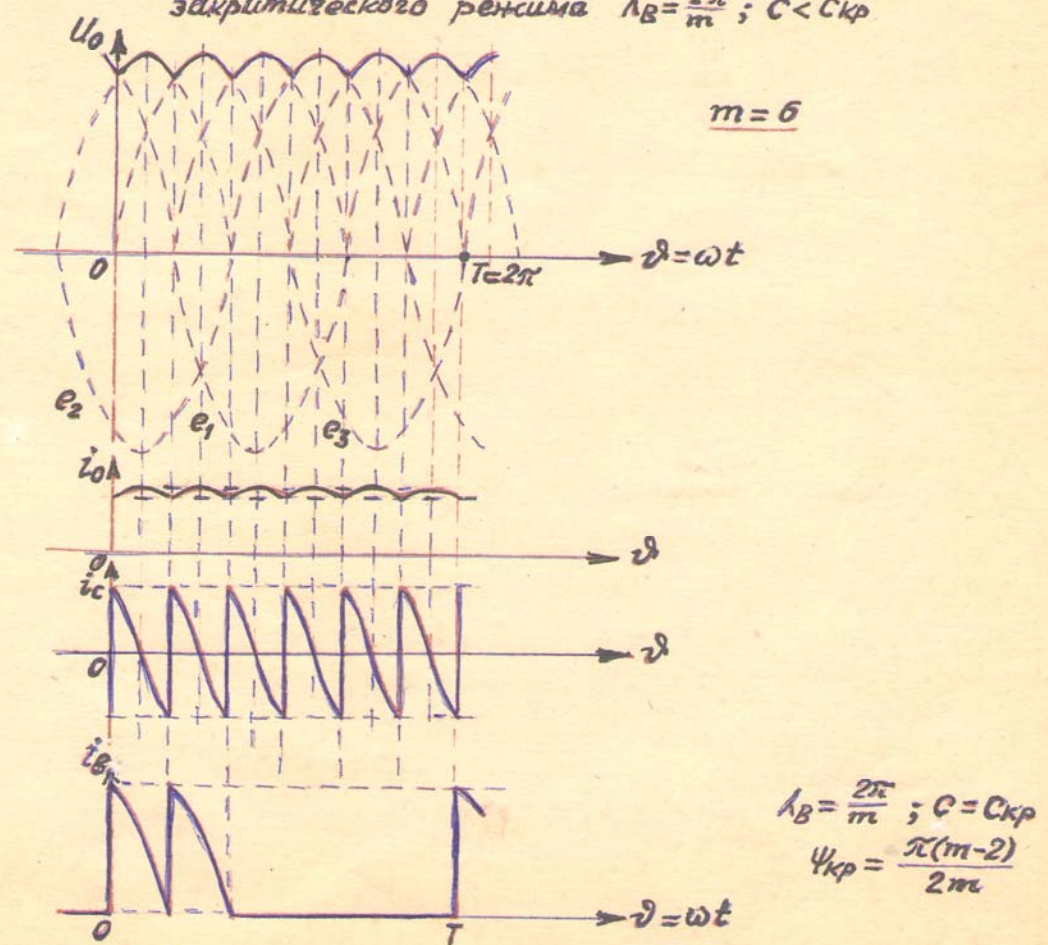


Рис. 6. Графики токов и напряжений критического режима

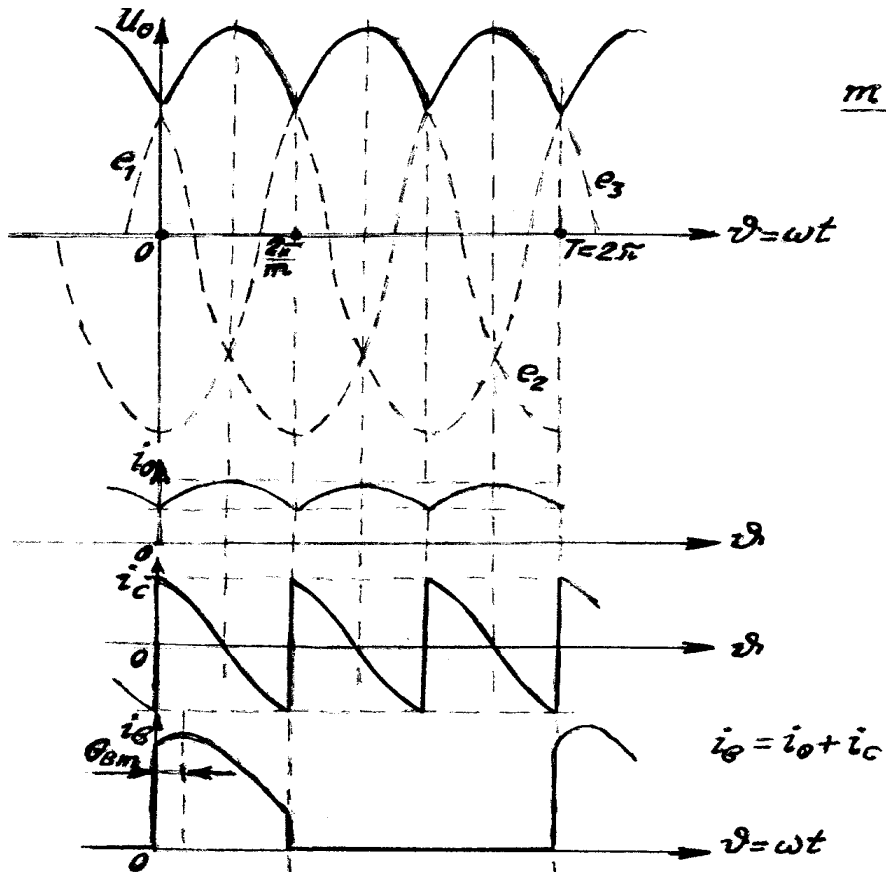


Рис. 5. Графики токов и напряжений закрытого режима $\lambda_B = \frac{2\pi}{m}$; $C < C_{кр}$

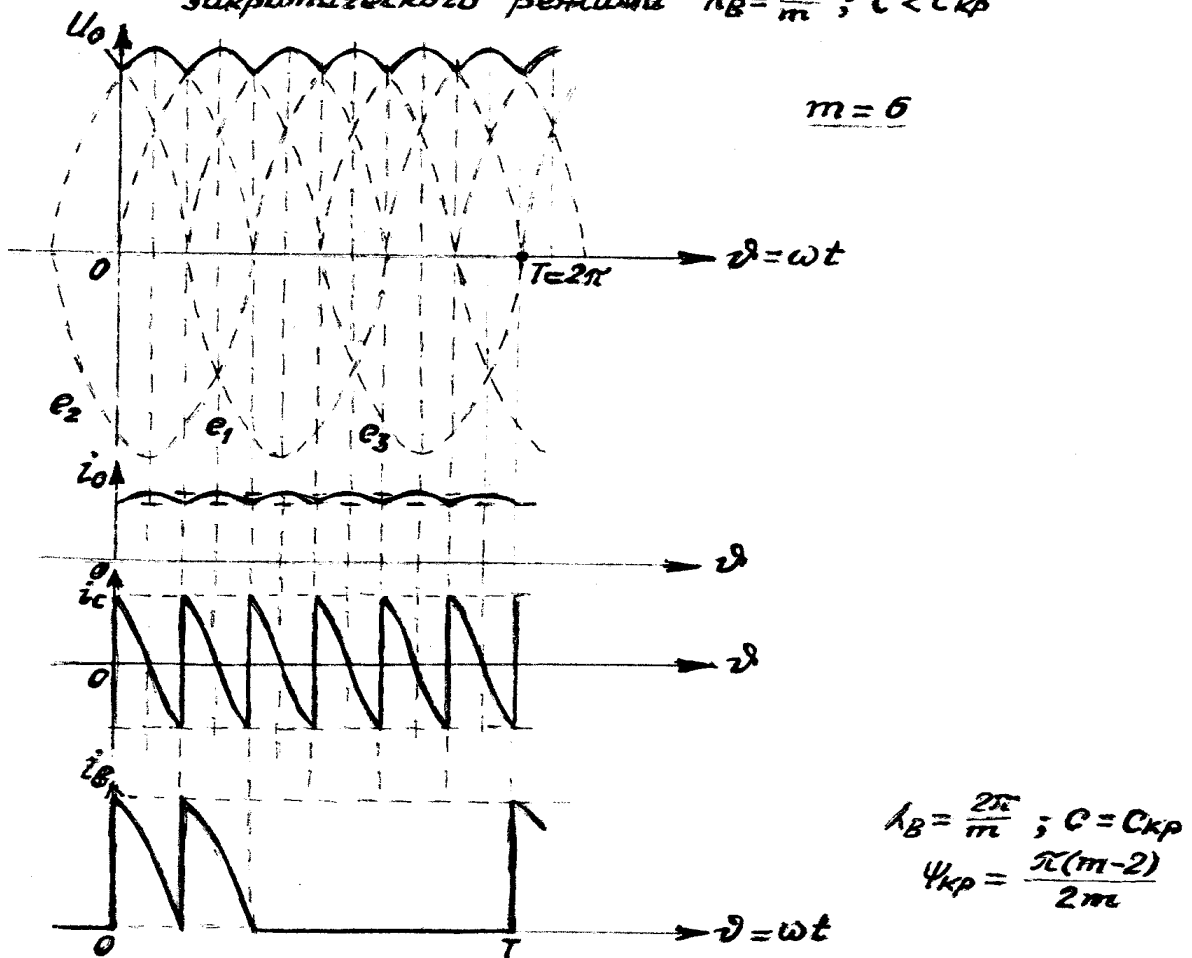


Рис. 6. Графики токов и напряжений критического режима

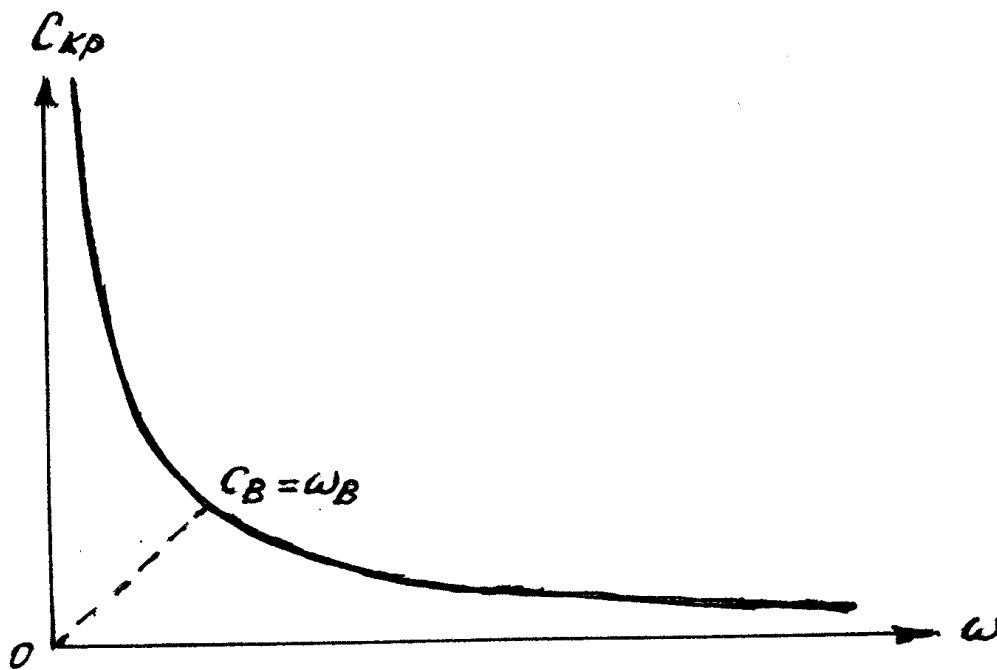
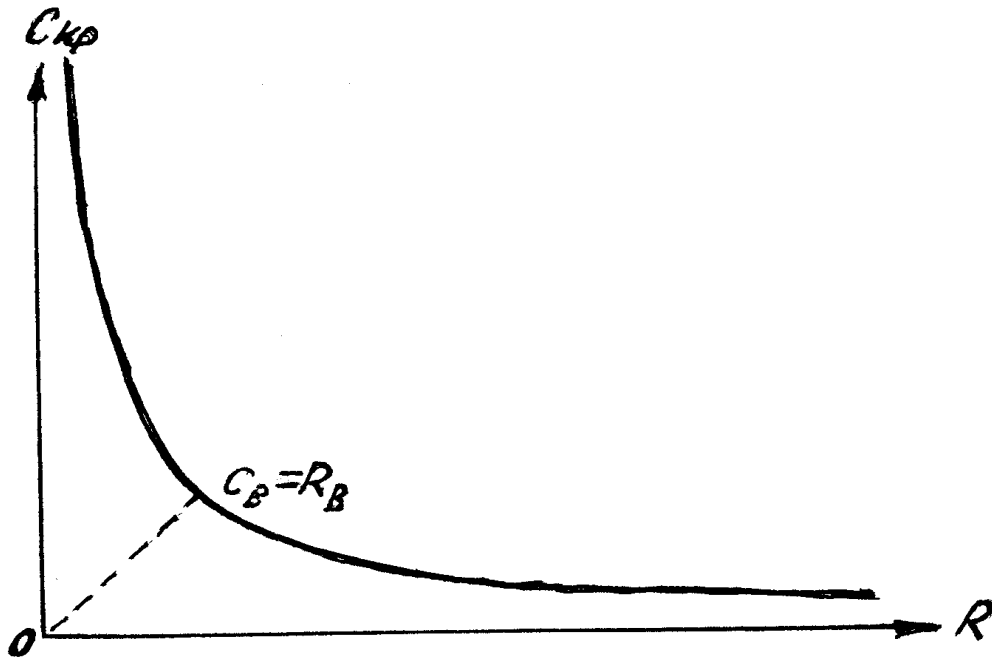
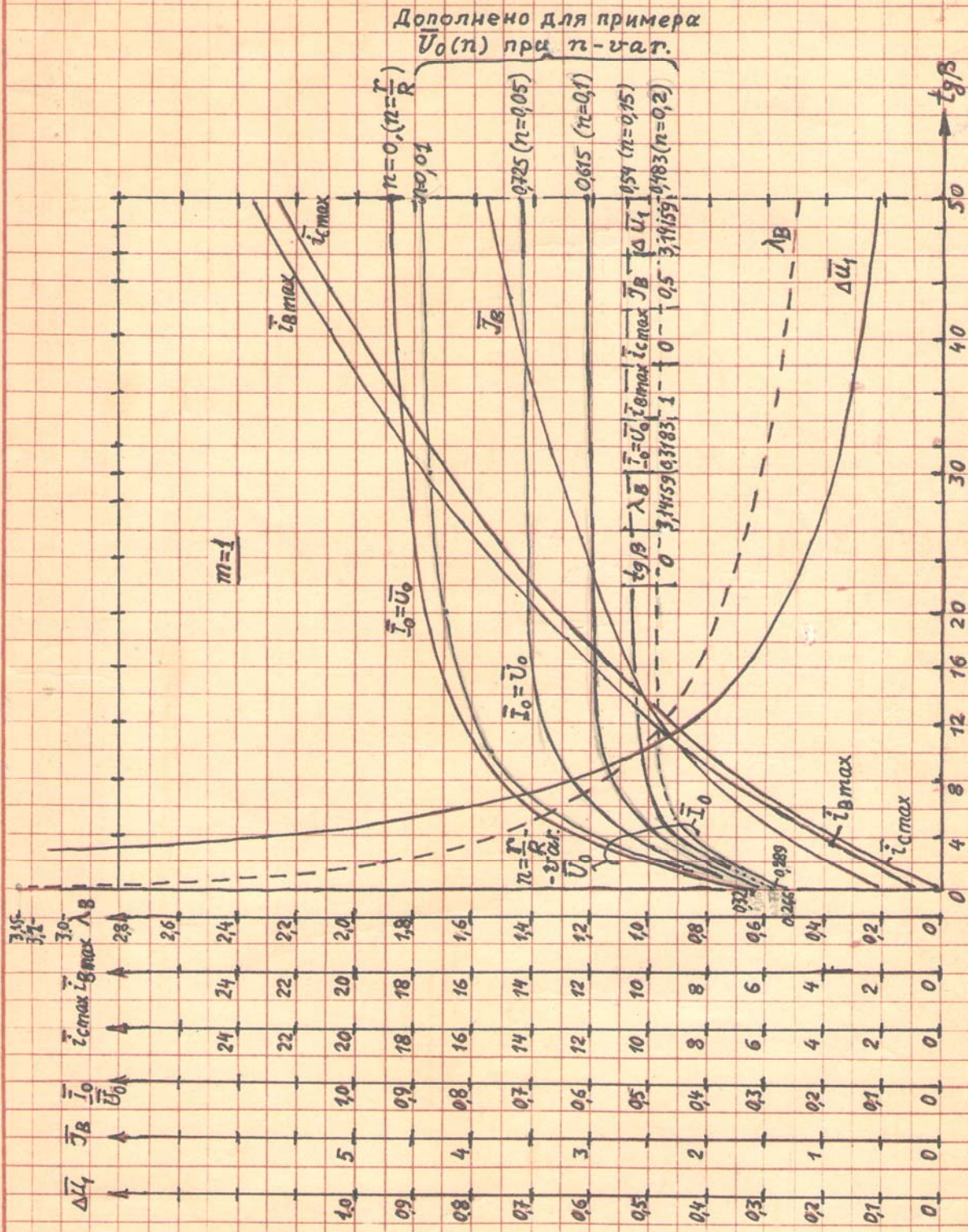


Рис. 7. Зависимости критической ёмкости от сопротивления нагрузки и частоты.



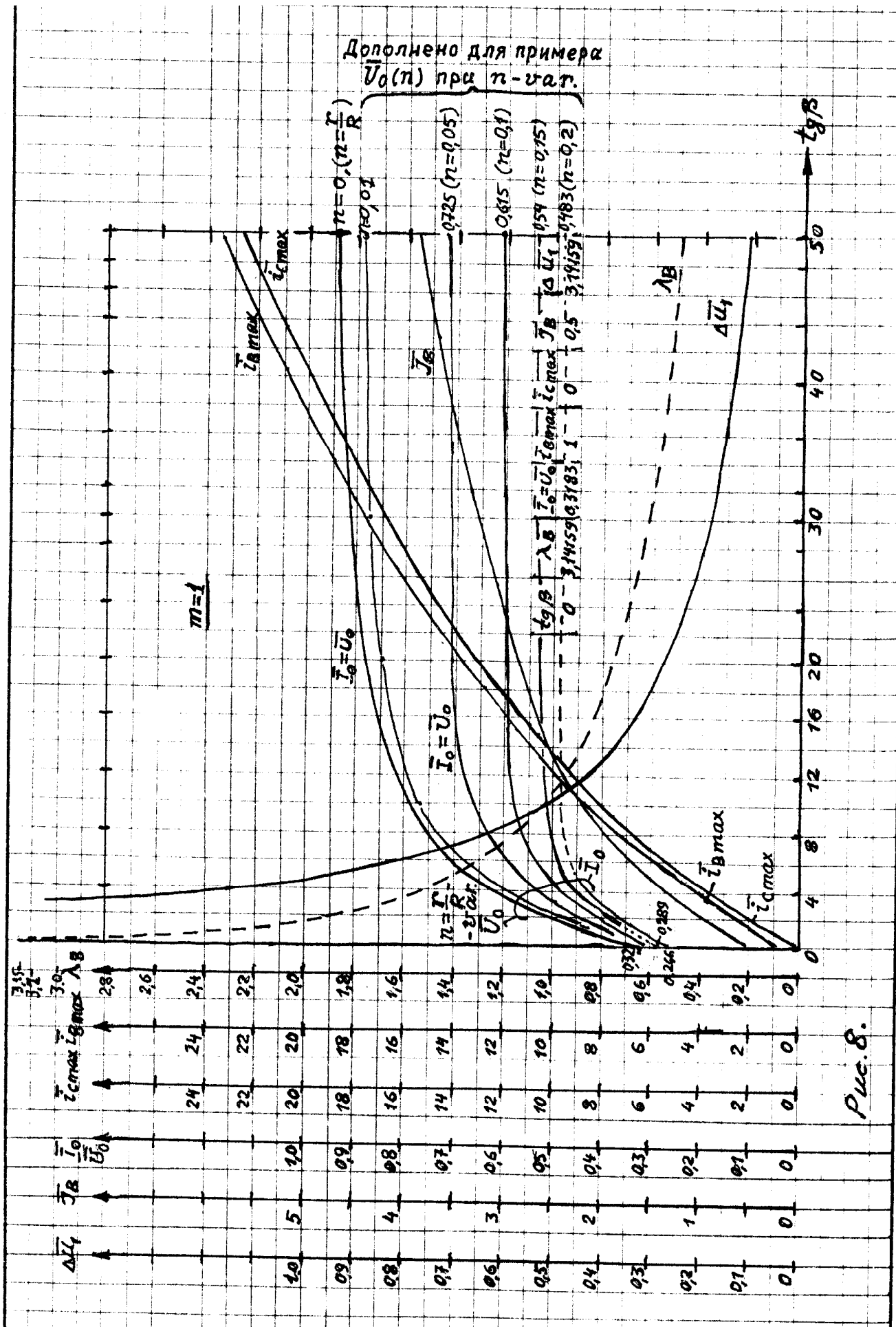
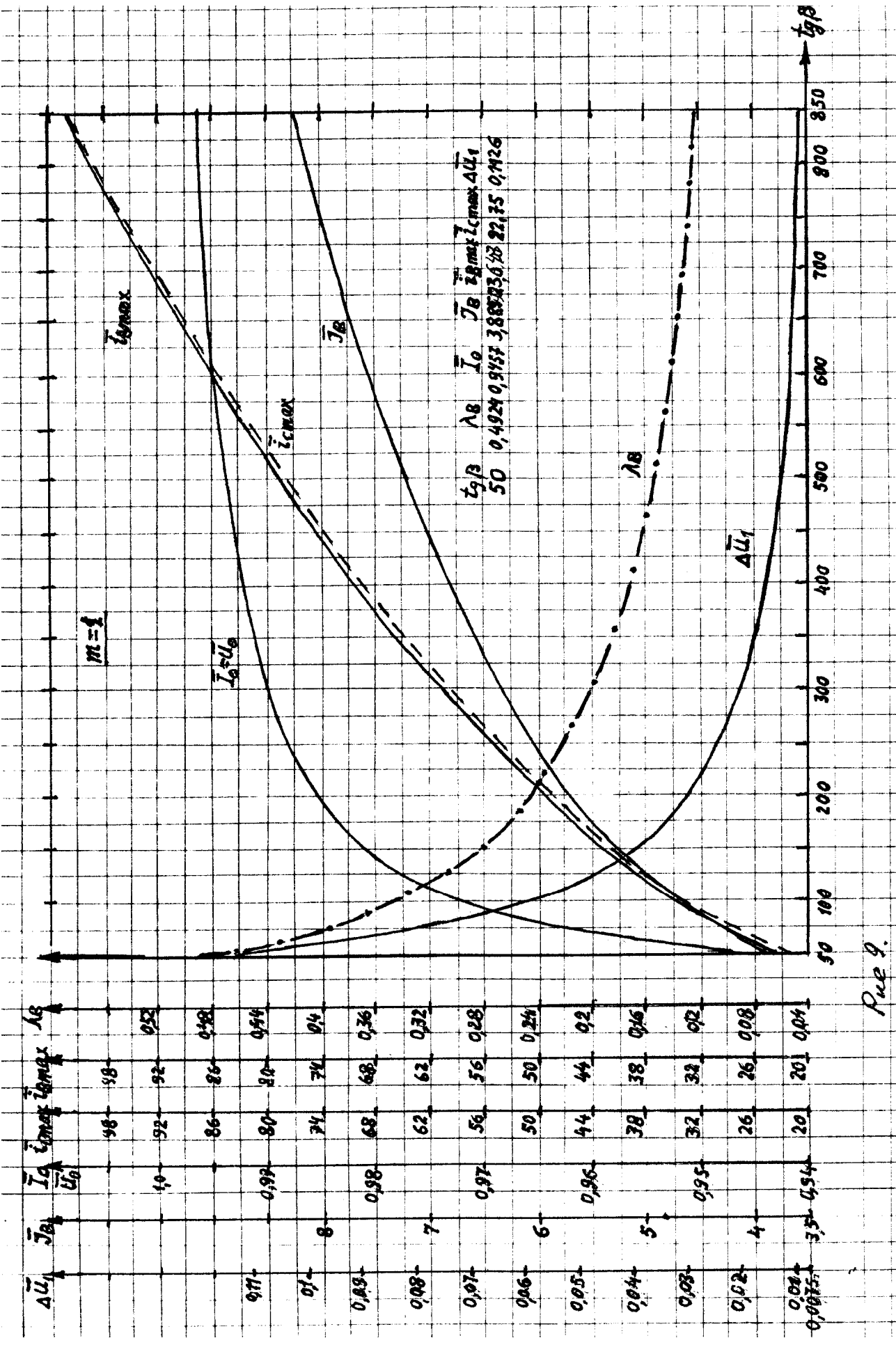
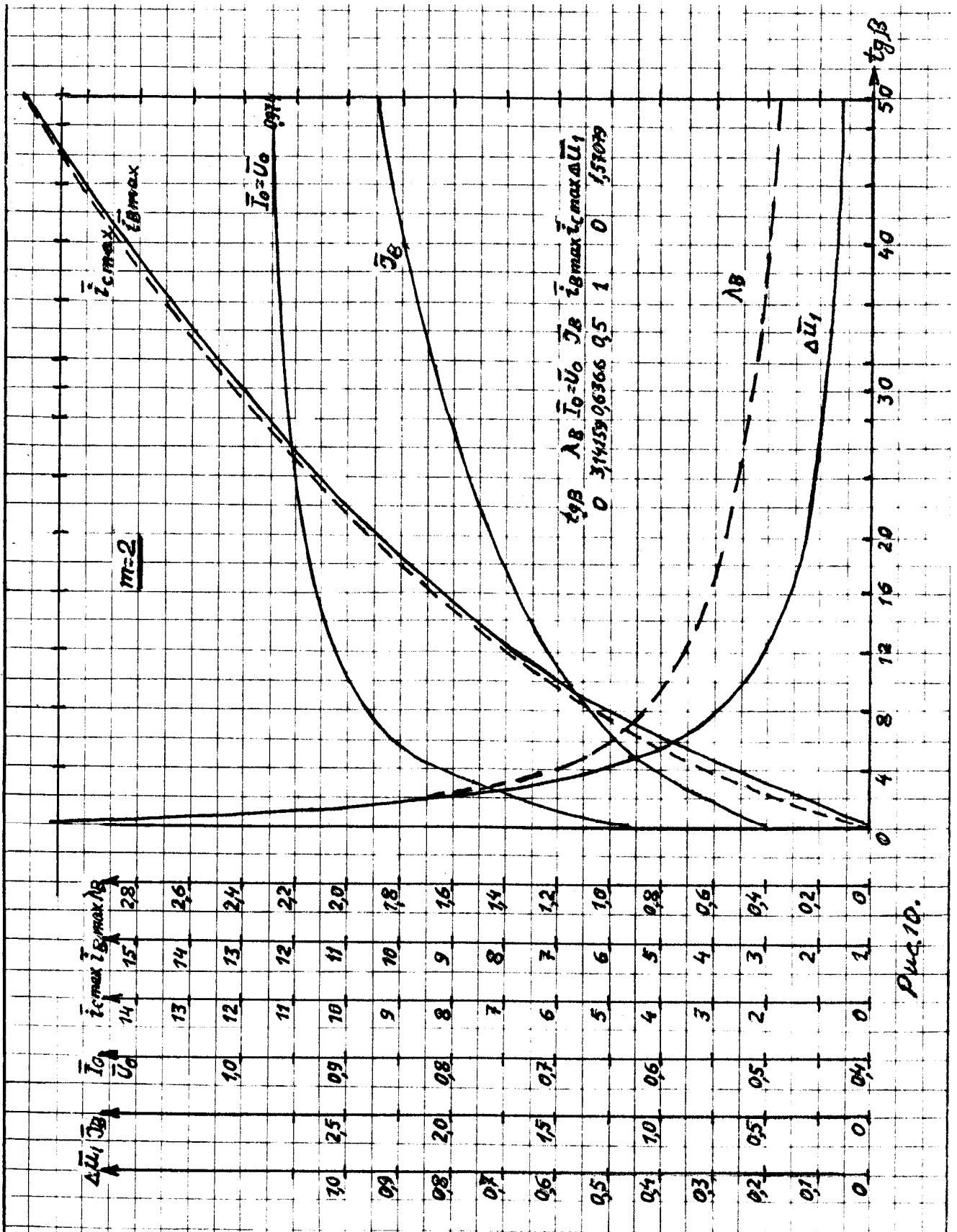


Рис. 8.



Pue 9.



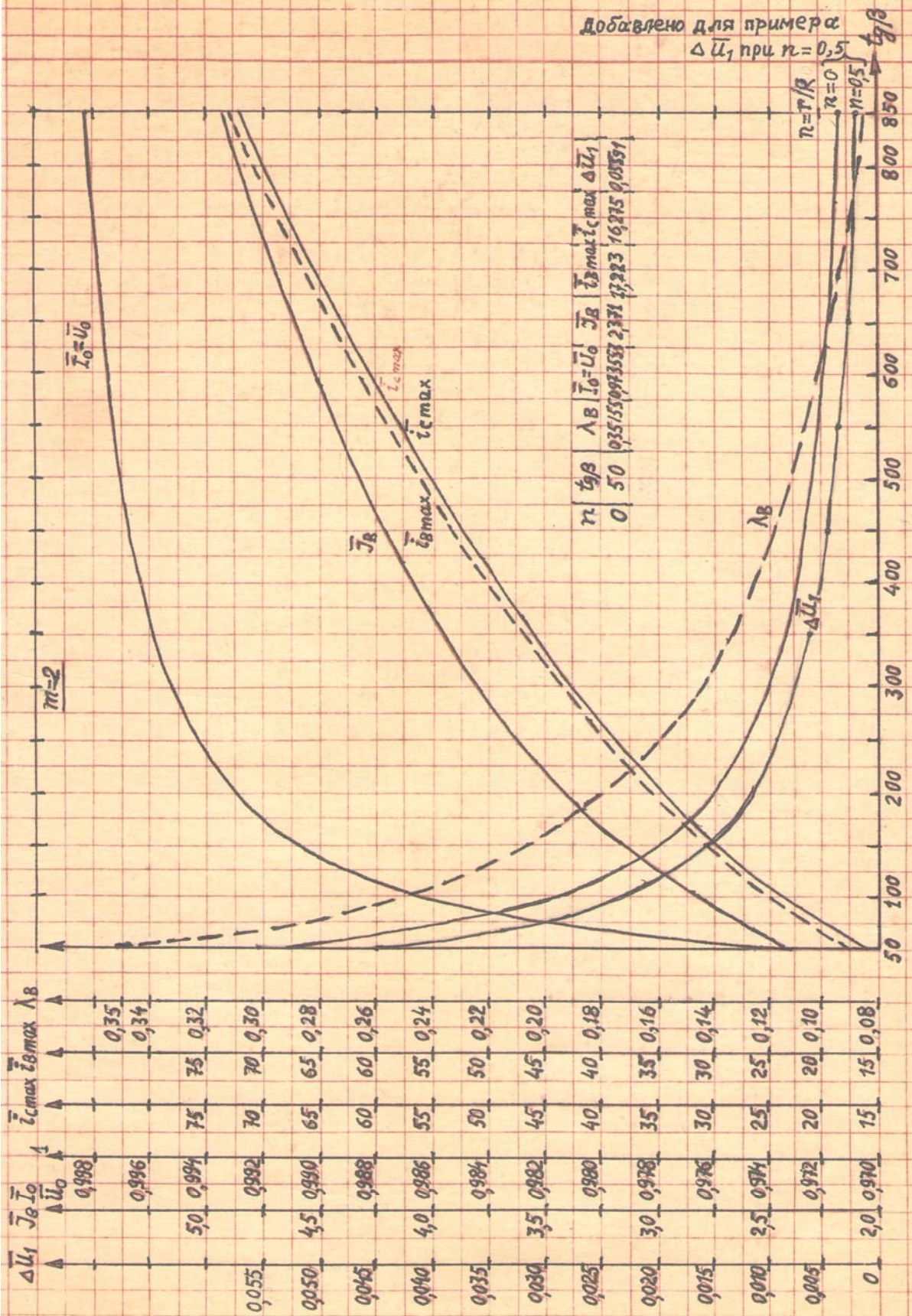


Рис. 11.

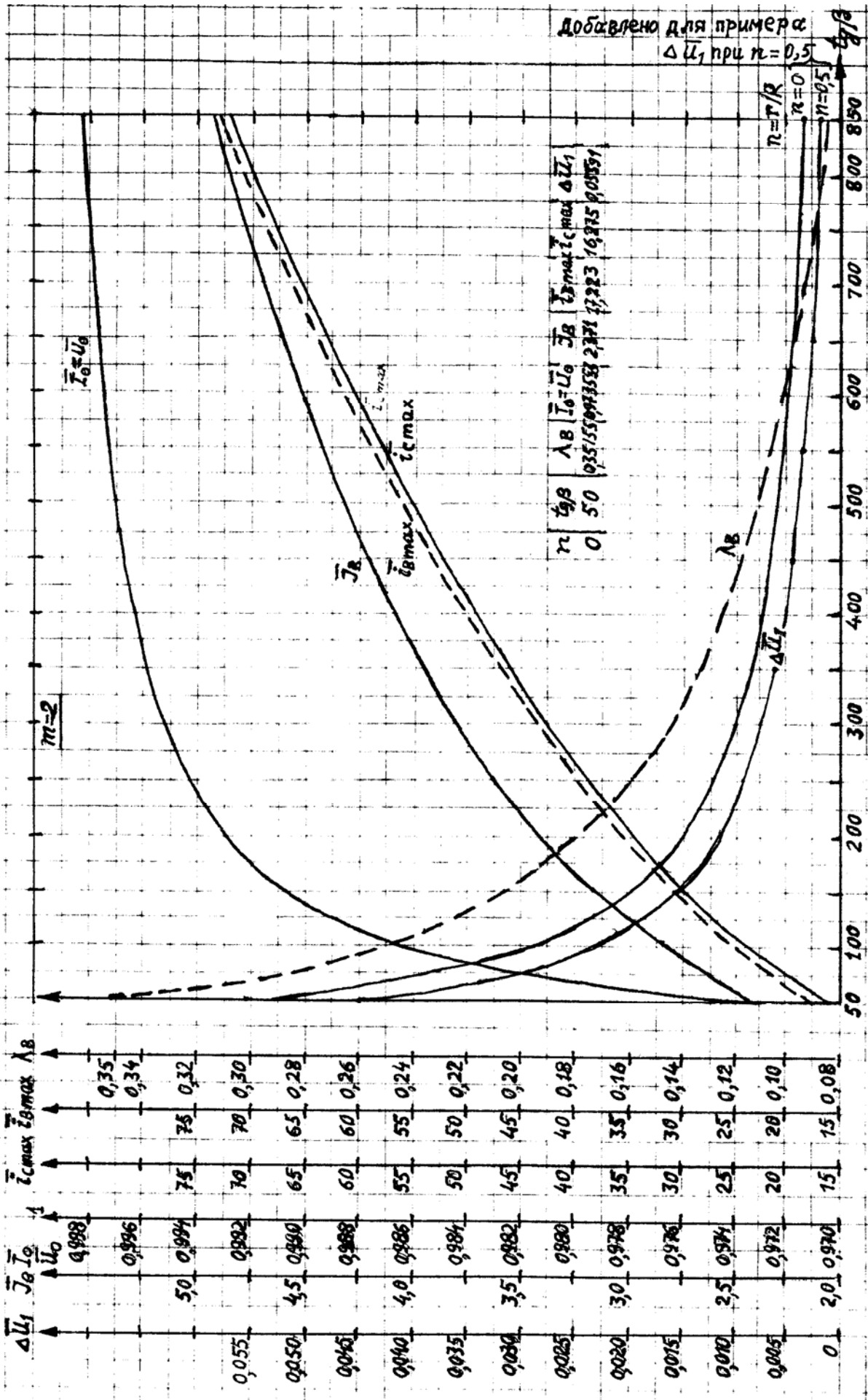


Рис. 11.

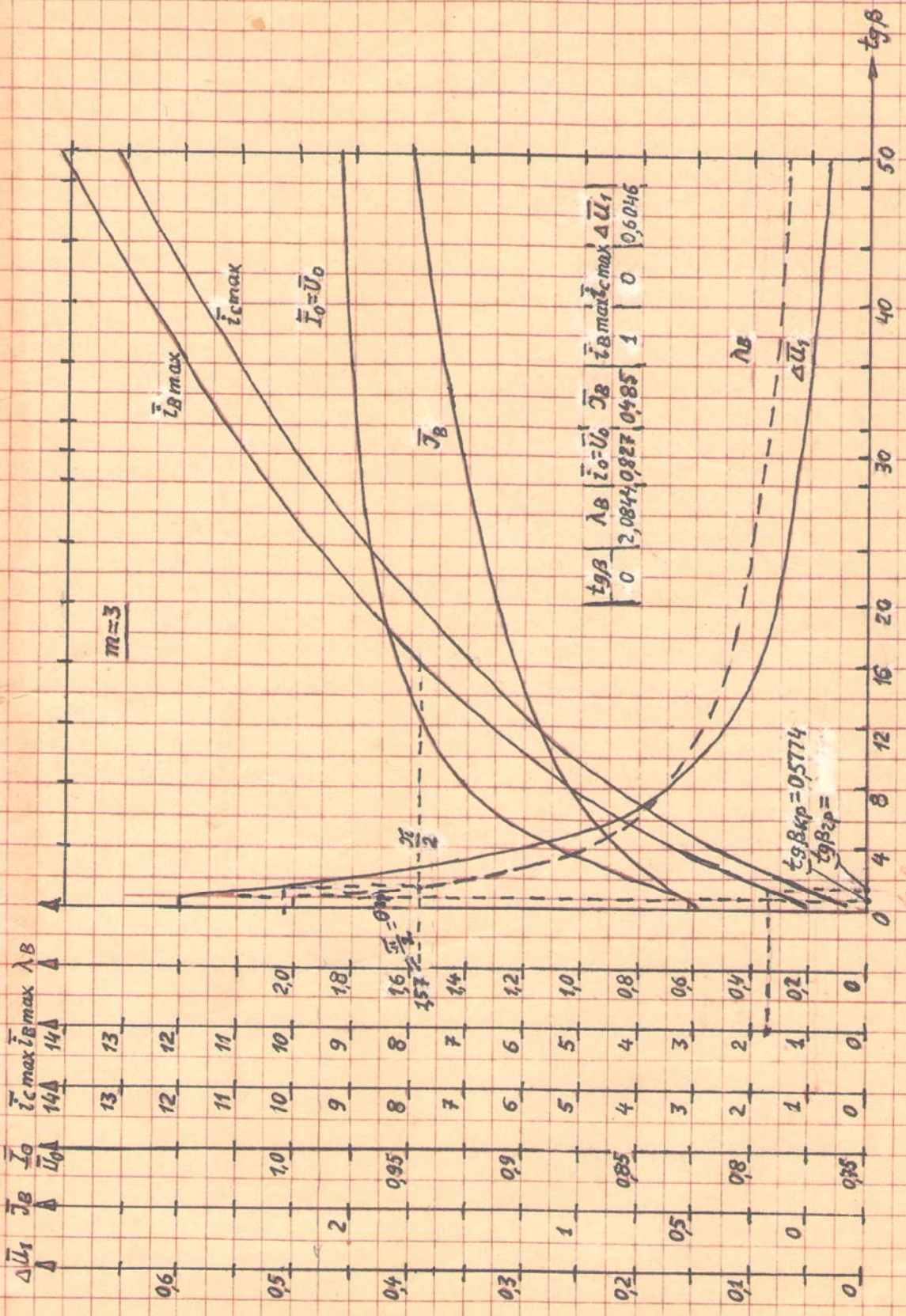
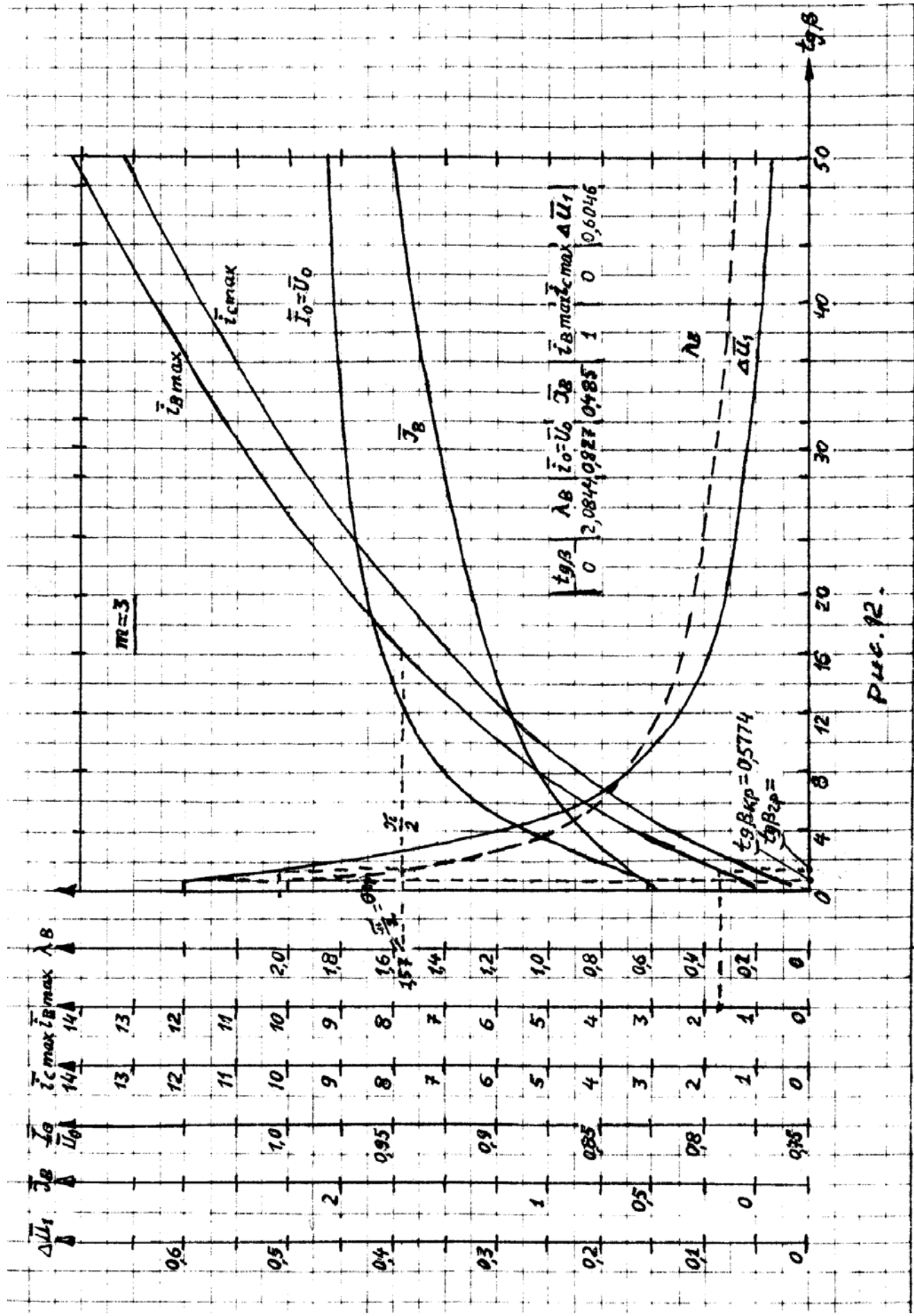
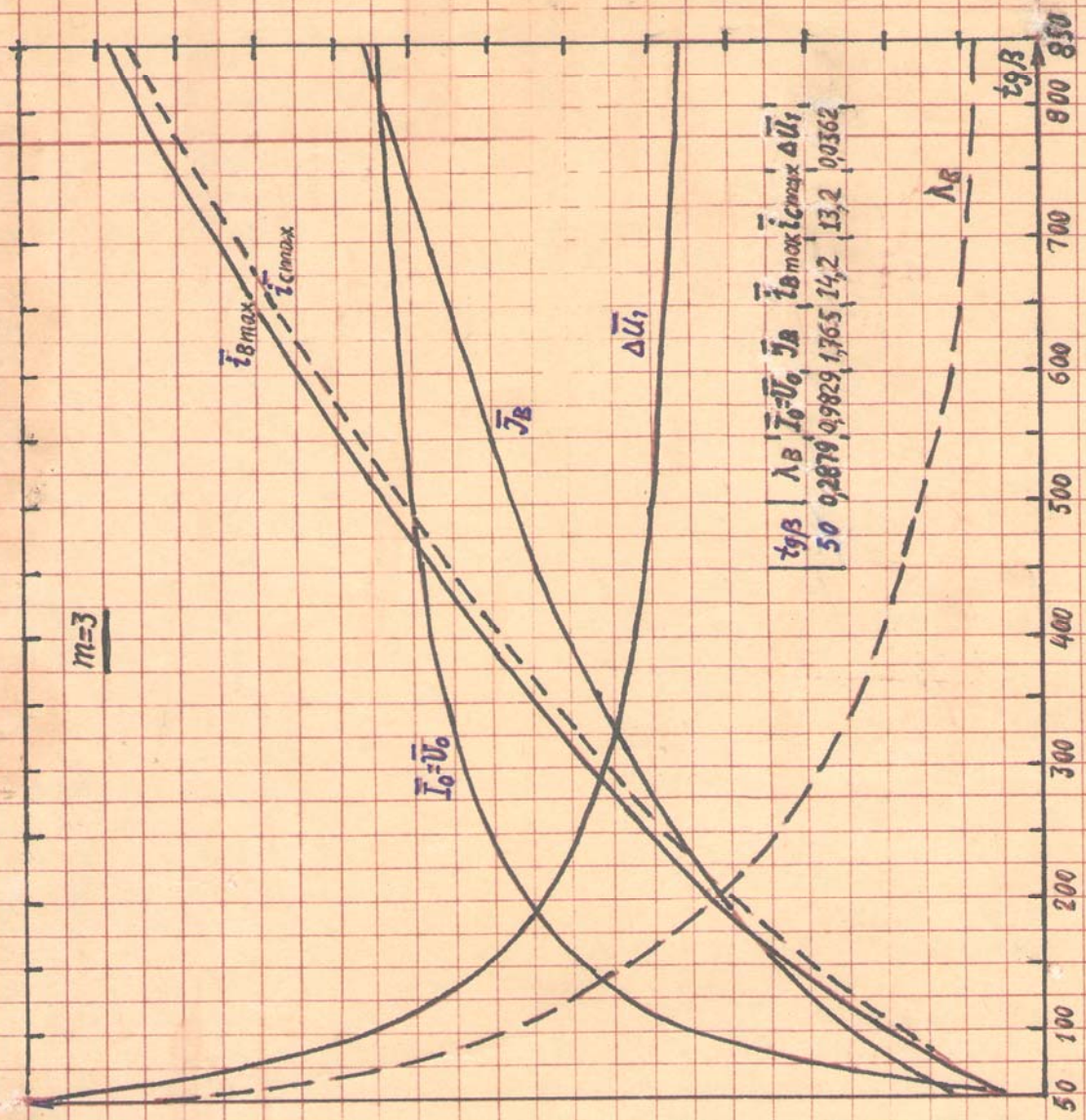


Рис. 12.



Р. 46. 12.

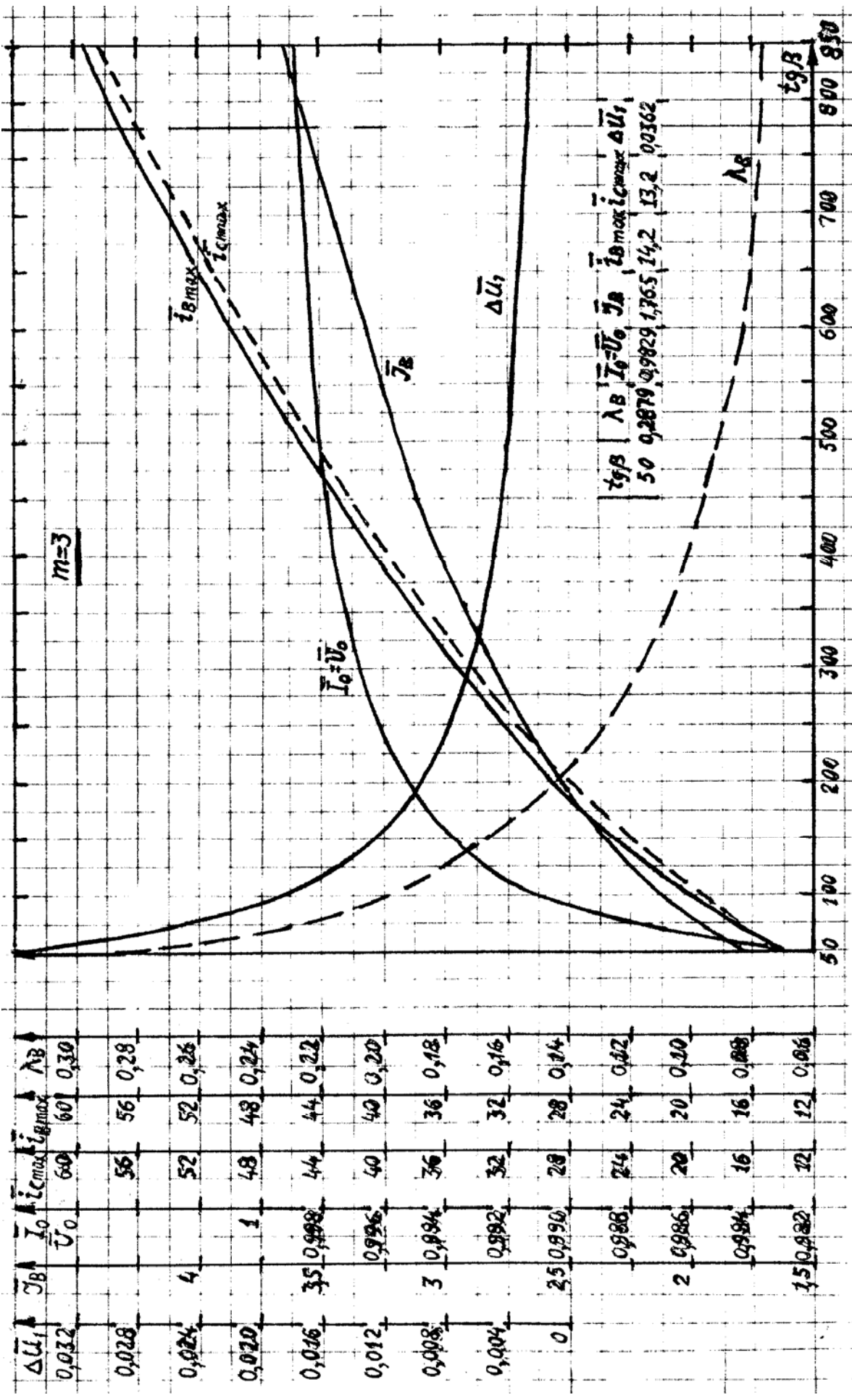


$m=3$

ΔU_1	J_B	$I_0 \bar{U}_0$	i_{Cmax}	i_{Bmax}	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	35,999	44	44	0,22	
0,012	0,996	40	40	0,20	
0,008	3,994	36	36	0,18	
0,004	0,992	32	32	0,16	
0	25,990	28	28	0,14	
	0,988	24	24	0,12	
	2,986	20	20	0,10	
	0,984	16	16	0,08	
	15,982	12	12	0,06	

$tg\beta$	λ_B	$I_0 \bar{U}_0$	J_B	i_{Bmax}	i_{Cmax}	ΔU_1
50	0,2879	0,9829	1,765	14,2	13,2	0,0362

PWC.13.



P.W.C.13

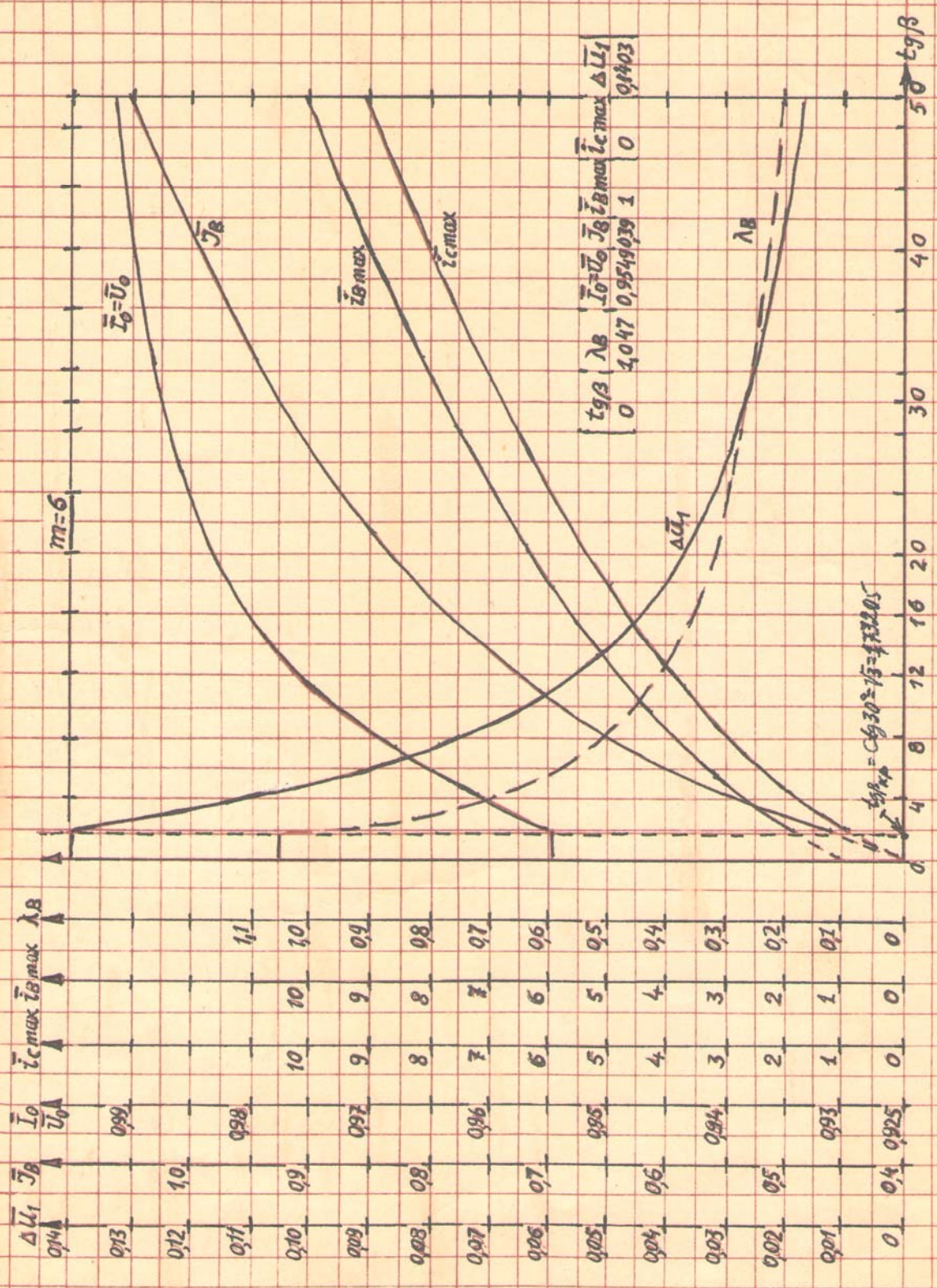
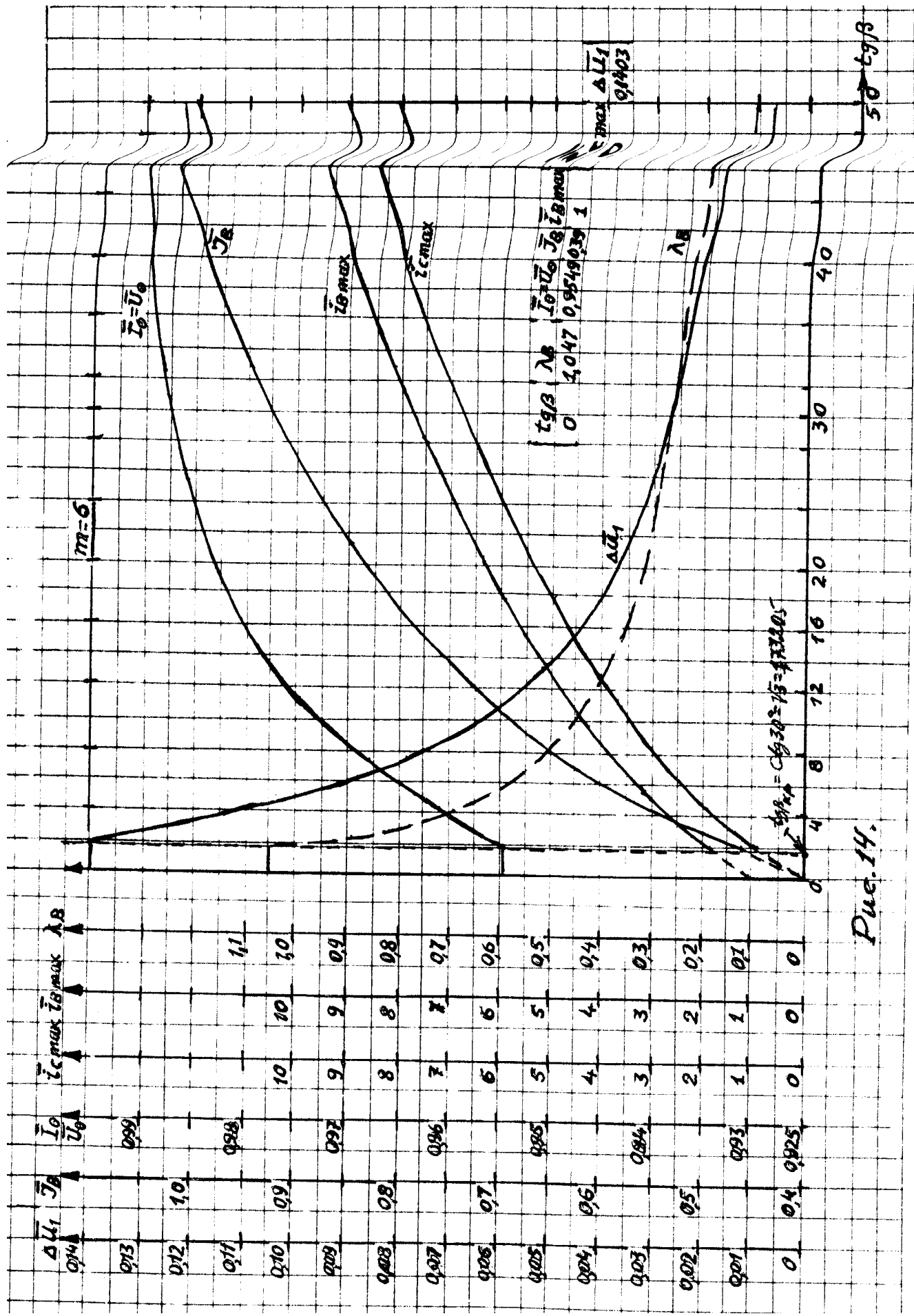
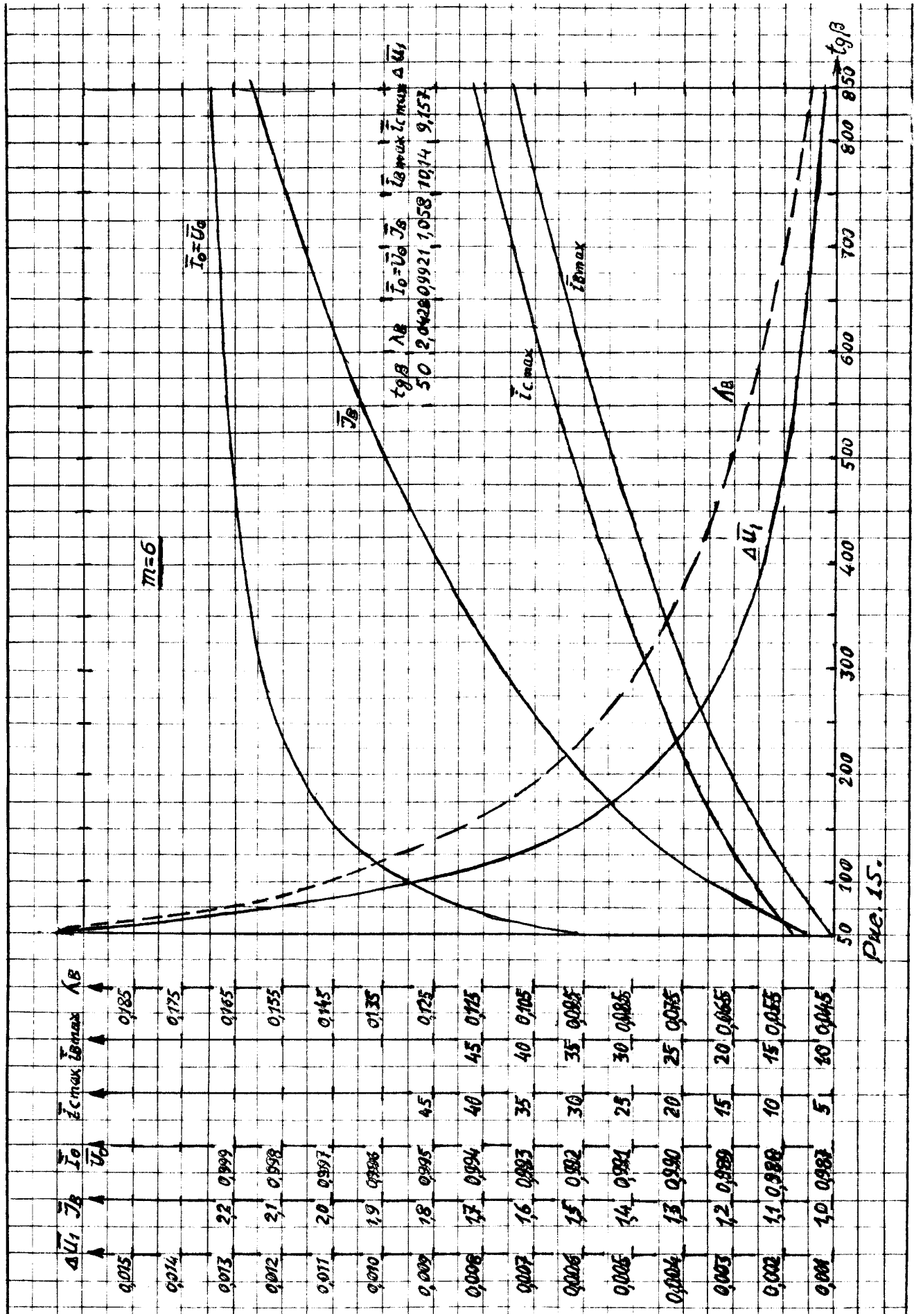


Рис. 14.



$\lambda_{\beta max} = 0.9549 \approx 1.0$

Pue. 14.



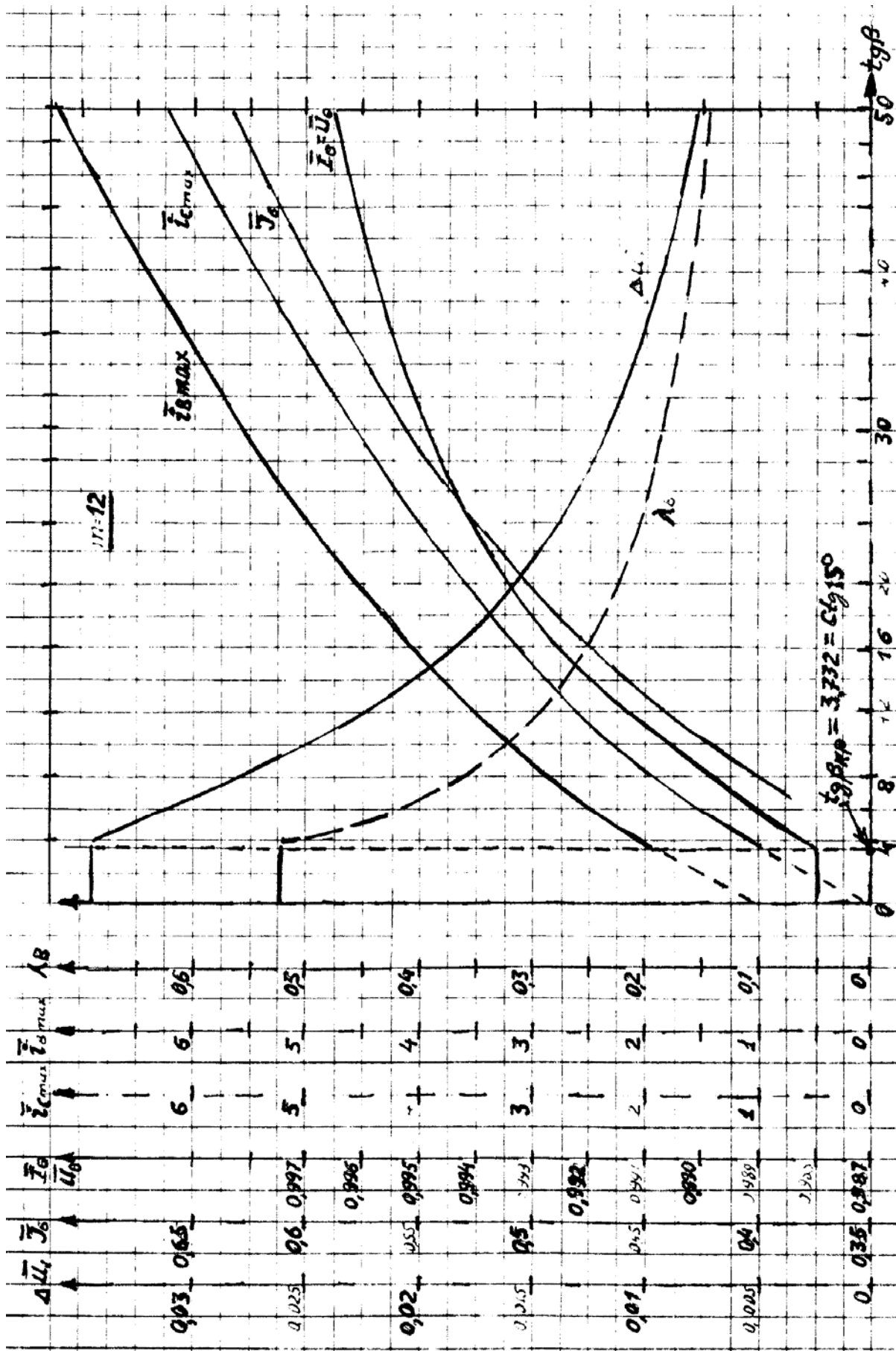
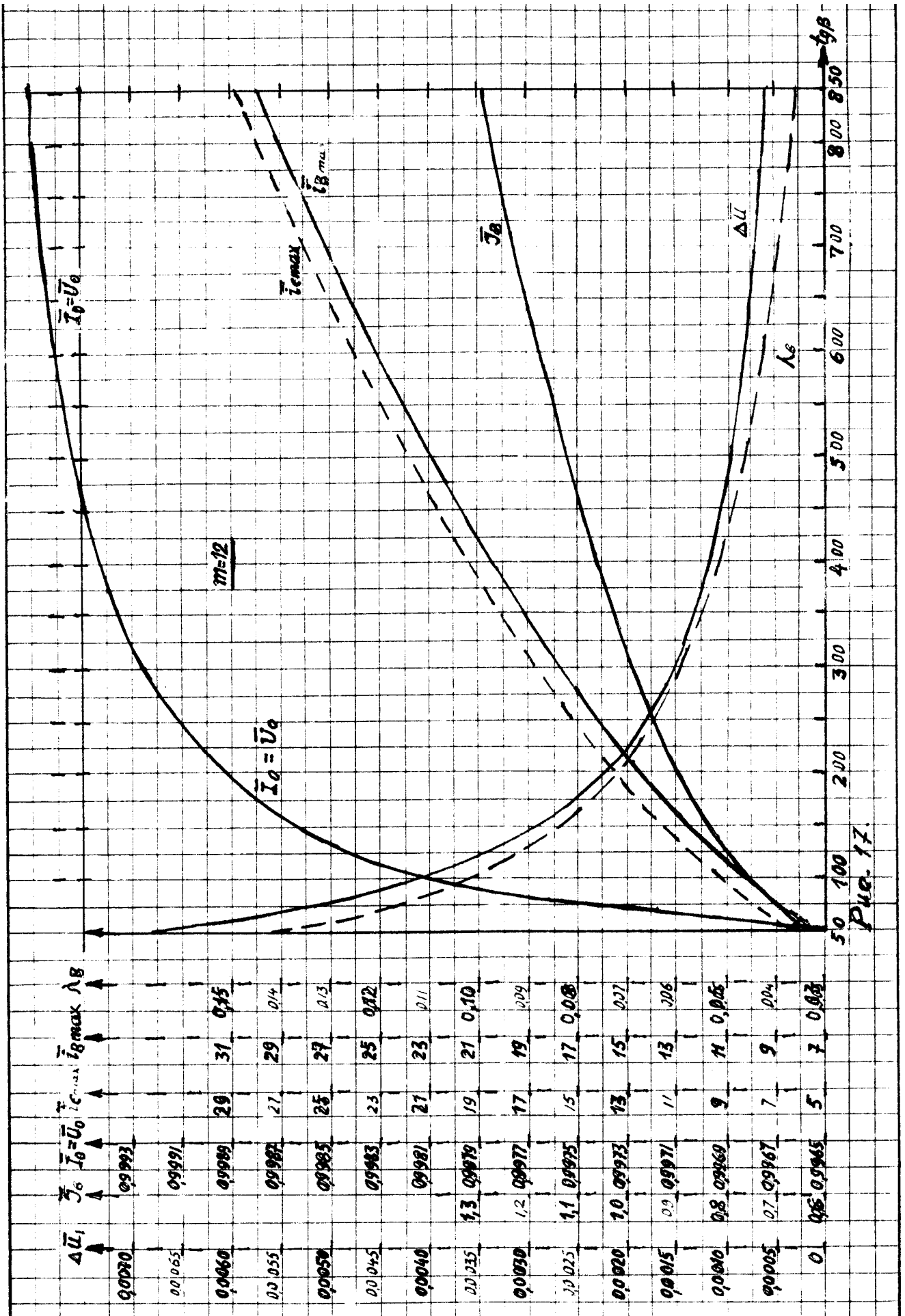


Fig. 16.



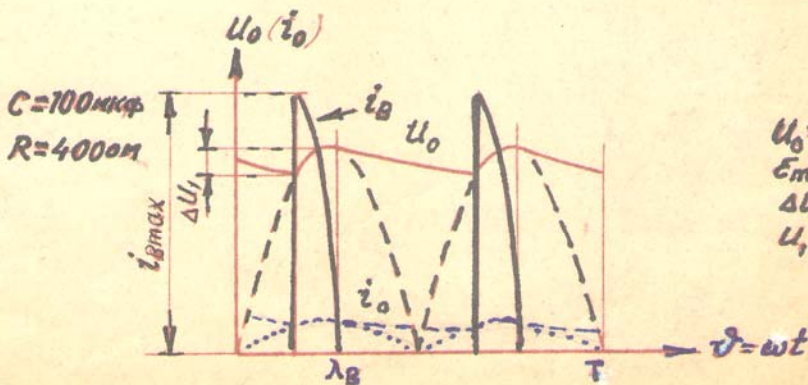
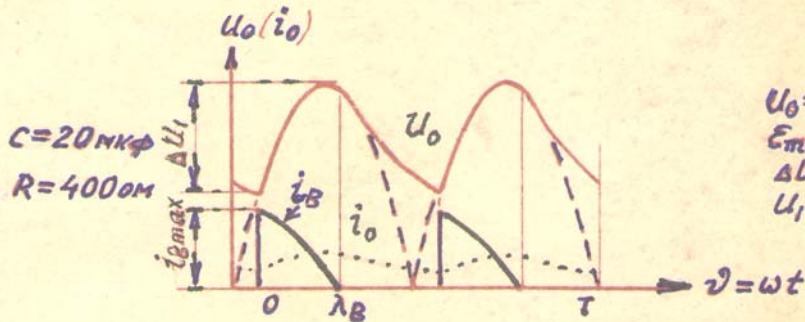
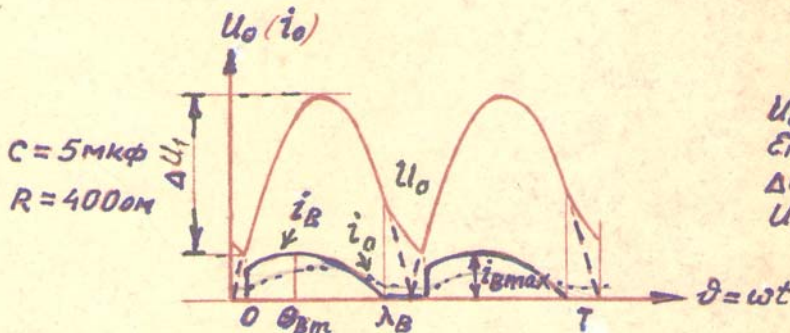
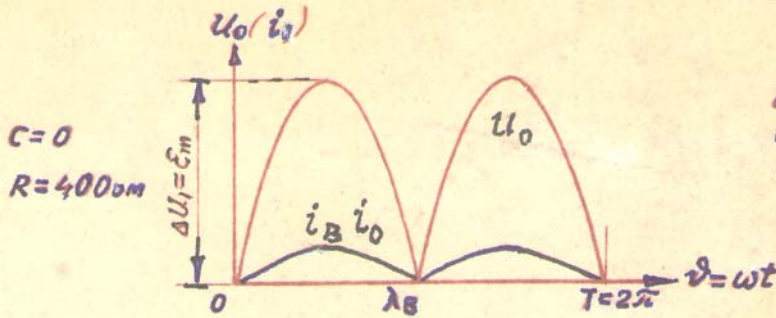
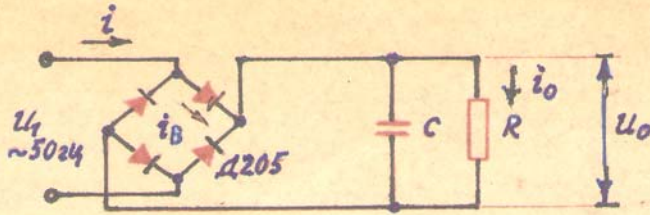


Рис.18 Осциллограммы и данные измерений.

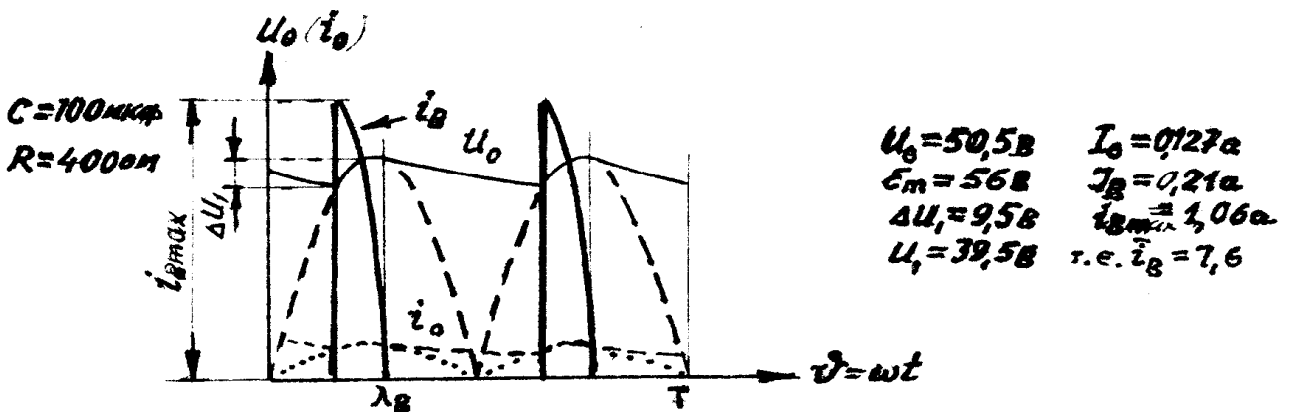
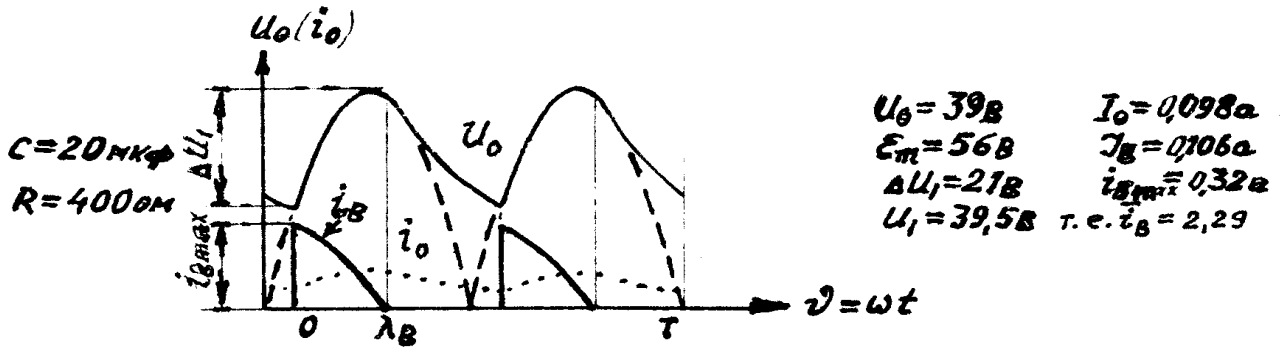
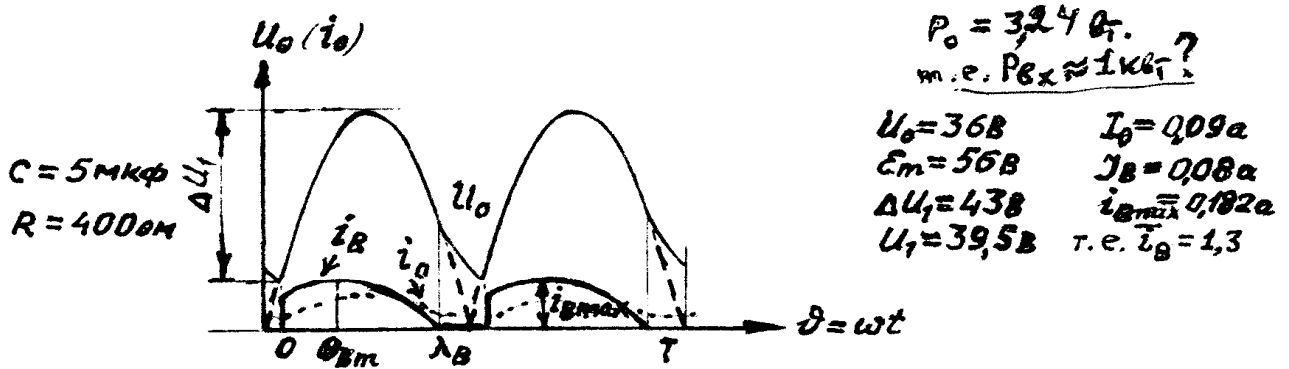
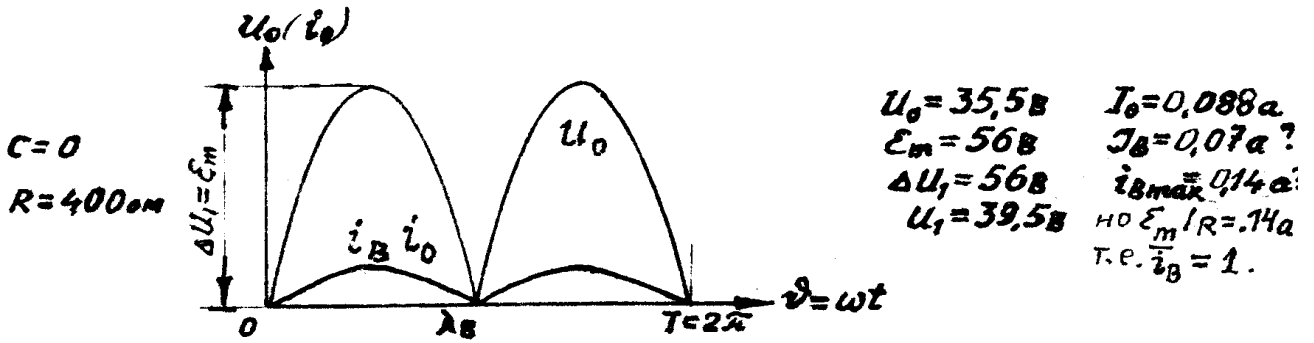
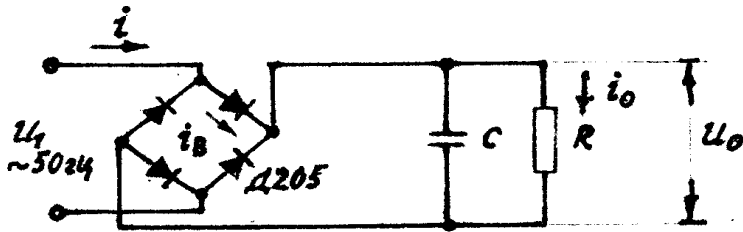


Рис.18 Осциллограммы и данные измерений.

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

P.S. Взамен исчезнувшему варианту от 2008 г. сканирование вновь выполнил 6.8.13 Д.О. Аветисян.

Продолжение следует.

© А.М. Репин. 1967. 8.8.-9.9.2013