

Улучшение $\cos \varphi$ металлообрабатывающих заводов.

I. Особенности металлообрабатывающих заводов, влияющие на коэффициент мощности.

Независимо от характера предприятия, среднезаводский коэффициент мощности зависит от следующих основных факторов:

1) Средней установленной мощности моторов и другого вида приемников электрической энергии $\left(\frac{\sum P_{\text{уст. п}}}{n} \right)$,

2) величины их коэффициента загрузки ($\eta_{\text{вп}}$),

3) величины коэффициента одновременности работы приемников (η_g),

4) режима работы приемников (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный, ударный),

5) режима работы предприятия в течение суток посменно,

6) вида приемника (асинхронный мотор, нормальный крановый, электрические печи, сварочные трансформаторы и т. д.),

7) необходимости регулировки скорости в известных пределах,

8) правильности выбора установленной мощности приемника электрической энергии.

Установим влияние каждого из факторов на средний коэффициент мощности применительно к металлообрабатывающим заводам.

1) Влияние средней установленной мощности моторов.

Предположим, что установленная мощность моторов используется полностью, т. е. что коэффициент загрузки и одновременности работы равны единице.

В этом случае приемники работают с своей номинальной мощностью, и, следовательно, общий $\cos \varphi$ завода будет определяться номинальными коэффициентами мощности приемников, при чем величину его можно выразить в виде (при условии, что все приемники трехфазного тока):

$$\cos \varphi_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\sum J_n V_n \sin \varphi_n}{\sum J_n V_n \cos \varphi_n} \right]^2}} \dots \dots \dots (1)$$

Если пренебречь незначительной разницей в приложенном напряжении, т. е. положить:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

то:

$$\cos \varphi_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\sum J_n \sin \varphi_n}{\sum J_n \cos \varphi_n} \right]^2}} \dots \dots \dots (2)$$

Очевидно, чем больше отношение

$$\frac{\sum J_n \sin \varphi_n}{\sum J_n \cos \varphi_n} \dots \dots \dots (3)$$

тем меньше будет общезаводский коэффициент мощности.

Определим, отчего зависит это отношение (3) и при каких условиях оно увеличивается. Раскрыв знак суммы, получим:

$$\frac{\sum J_n \sin \varphi_n}{\sum J_n \cos \varphi_n} = \frac{J_1 \sin \varphi_1 + J_2 \sin \varphi_2 + \dots + J_n \sin \varphi_n}{J_1 \cos \varphi_1 + J_2 \cos \varphi_2 + \dots + J_n \cos \varphi_n}$$

при чем

$J_1 \sin \varphi_1 \dots J_n \sin \varphi_n$ —есть реактивные составляющие тока

$J_1 \cos \varphi_1 \dots J_n \cos \varphi_n$ —активные составляющие тока приемников.

Очевидно, что при преобладании мелких моторов, имеющих относительно меньший номинальный коэффициент мощности, мы получим увеличение указанного отношения и, следовательно, уменьшение общезаводского коэффициента мощности.

Введя понятие о средней установленной мощности мотора, как величине до известной степени характеризующей средний коэффициент мощности, т. е.

$$P_{0 \text{ ср}} = \frac{\sum P_a}{n}$$

$$P_{p \text{ ср}} = \frac{\sum P_{p n}}{n}$$

получим:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ср}}}}$$

На рис. 1 представлены кривые зависимости $\cos \varphi$ от номинальной мощности мотора для типа T , при чем I—для $n = 1500$, II— $n = 1000$ и III— $n = 750$ об/м.

В таблице 1 дана сводка средней установленной мощности по проектным данным для некоторых металлообрабатывающих заводов.

Таблица 1

№№	Характер завода	P уст.	№№	Характер завода	P уст.
1	Крупное машиностр. . . .	9,7	7	Завод кранового оборуд. .	5,9
2	" " . . .	8,5	8	" " " " . . .	3,7
3	" " " " . . .	7,9	9	Паровозо-ремонт.	4,87
4	Среднее машиностр. . . .	7,4	10	" " " "	4,85
5	" " " "	6,2	11	Мелкое машиностр.	1,32
6	" " " "	5,2			

Из таблицы следует, что на металлообрабатывающих заводах преобладают мелкие моторы, т. к. средняя установленная мощность не превышает 10 квт. Это преобладание мелких моторов в свою очередь является причиной того, что средний номинальный коэффициент мощности не превышает 0,8 в отличие от других промышленных предприятий с преобладанием крупных моторов (напр., металлургическая промышленность).

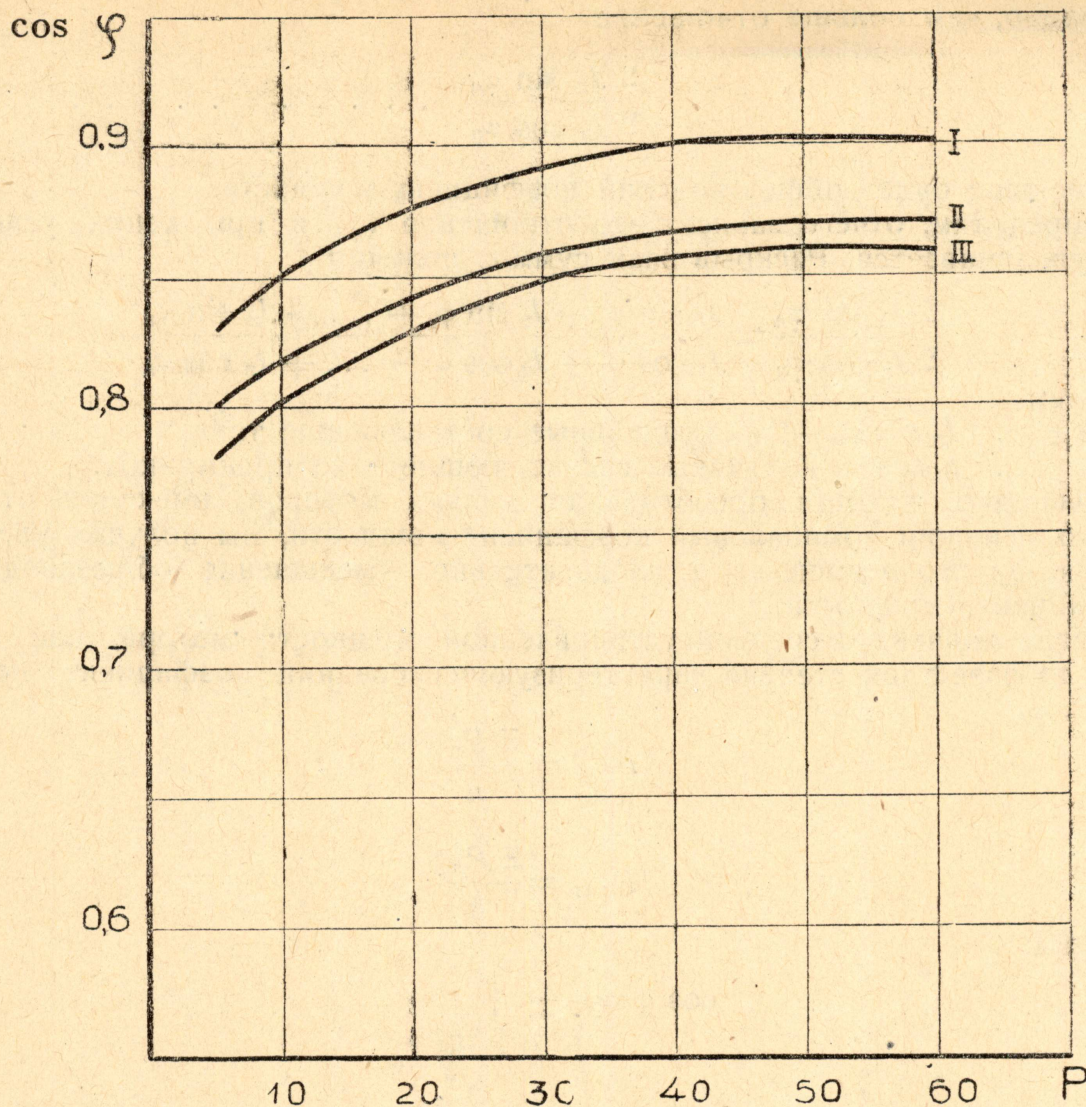


Рис. 1.

2) Влияние коэффициента загрузки (η_B) на коэффициент мощности завода.

Изменение коэффициента мощности отдельного мотора может быть выведено, исходя из следующего: коэффициентом загрузки мотора называется отношение развиваемой мотором мощности на валу в данный момент к его номинальной мощности, т. е.

$$\eta_B = \frac{P_{mx}}{P_{mn}} = \frac{J_x \cos \varphi_x \eta_x}{J_n \cos \varphi_n \eta_n}$$

откуда

$$\cos \varphi_x = \frac{J_n}{J_x} \frac{\eta_n}{\eta_x} \cos \varphi_n \eta_B. \quad \dots \dots \dots (5)$$

Применяя формулу Гольдшмита для вычисления коэффициента полезного действия при частичной нагрузке

$$\cos \varphi_x = \frac{J_n \cos \varphi_n}{J_x (1 + \alpha)} [(1 + \alpha) \eta_n \eta_B + (1 - \eta_n) (\eta_B^2 + \alpha)] \dots \dots \dots (5-a)$$

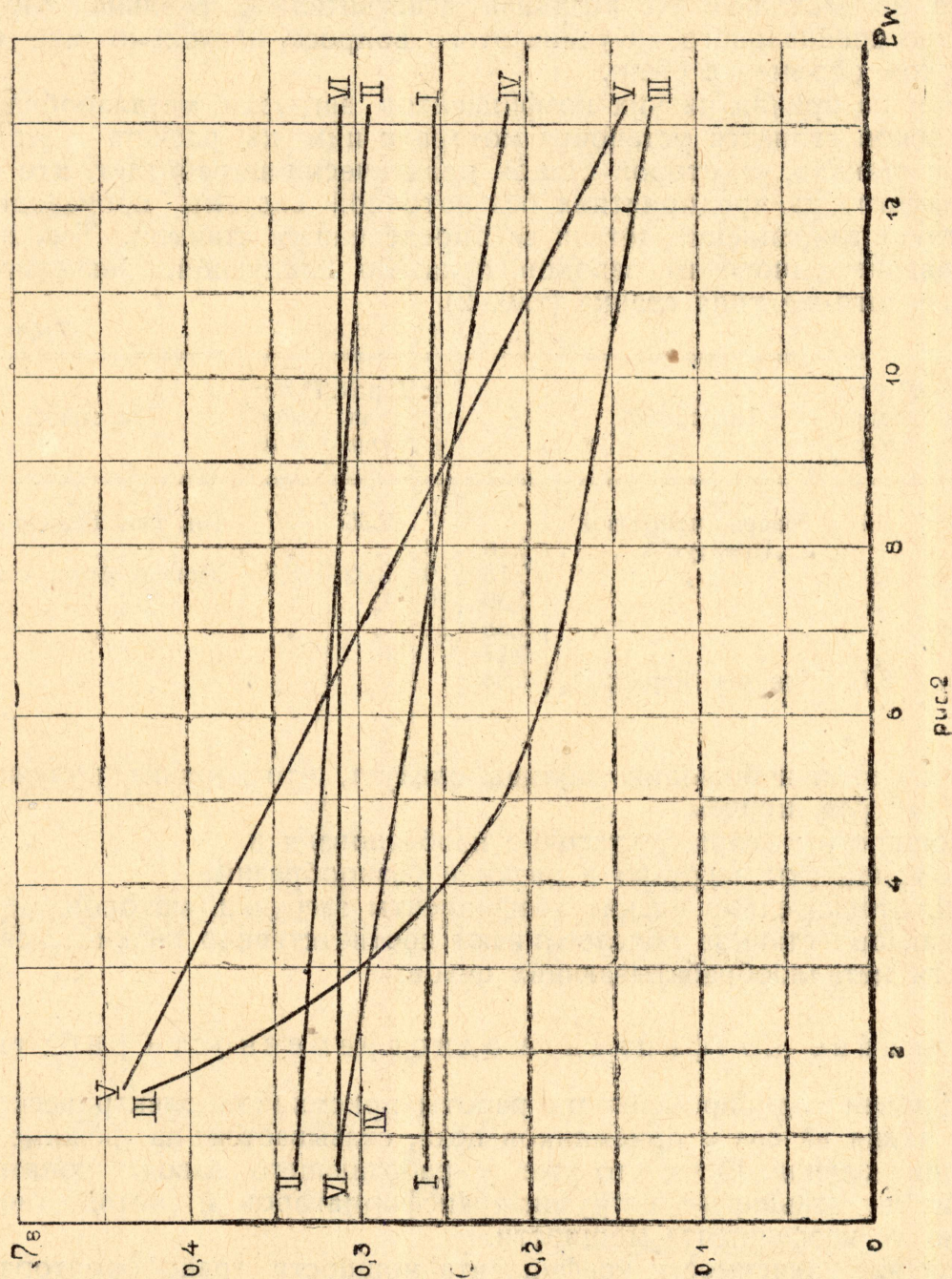
Приняты следующие обозначения:

J_x, J_n — ток мотора при его частичной и полной загрузке,
 $\eta_n, \cos \varphi_n$ — коэффициент полезного действия и коэффициент мощности при
 полной нагрузке,

α — отношение постоянных потерь электродвигателя к переменным.

Уравнение (5-а), не имея непосредственного расчетного значения, достаточно ярко характеризует зависимость $\cos \varphi$ мотора от степени его загрузки, т. к. уменьшение номинального $\cos \varphi_n$ будет тем больше, чем меньше степень загрузки двигателя. Иначе оно указывает на вредные последствия с точки зрения $\cos \varphi$, вызываемые слабо загруженными моторами.

На рис. 2 представлены кривые зависимости коэффициента загрузки моторов металлообрабатывающих станков, полученные в результате обследо-



вания группы металлообрабатывающих заводов в г. Ленинграде, причем приняты следующие обозначения:

P_w — механическая (установленная) мощность станка. Обозначения кри-

вых: I—токарные станки, II—револьверные станки, III—фрезерные станки, IV—сверлильные станки, V—карусельные станки, VI—строгальные станки.

Низкие значения коэффициентов загрузки моторов станков обуславливают низкие значения $\cos \varphi$ цеха.

Так, например, для токарно-центрового станка с $P_n = 6,8$ квт, $n = 950$ об/м будет:

$$\cos \varphi_n = 0,81 \quad \eta_B = 1$$

$$\cos \varphi_x = 0,48 \quad \eta_B = 0,26,$$

т. е. уменьшение $\cos \varphi$ на 0,31 против нормального значения.

Необходимо оговориться, что проектные величины η_B обычно выше. Например, Гипромаш берет в качестве основного $\eta_B = 0,6$ для одиночного привода, но насколько эта величина действительно реальна, трудно сказать, т. к. специального изучения этого вопроса, насколько мне известно, в широком объеме не было.

Одной из причин низких коэффициентов загрузки металлообрабатывающих станков является установка мотора к ним из расчета максимальной загрузки станков, с которой станок практически не работает. Это особенно резко заметно на предприятиях без поточной системы производства, где отсутствует закрепление детали за определенным станком. Так, например, обследование одного из заводов показало следующие значения η_B для одного и того-же типа станка (таб. 2).

Таблица 2

№ п/п	$P_{\text{ном. стан. квт}}$	$P_{\text{уст. мотор. квт}}$	Тип станка	η_B	№ п/п	$P_{\text{ном. стан. квт}}$	$P_{\text{уст. мотор. квт}}$	Тип станка	η_B
1	8,6	7,4	Токарн. центровой		7	2,36	3,7	Ток. рев. Вернер . .	0,325
			„Прейтус“	0,18	8				0,21
2	4,8	„	„	0,13	9	3,02	3,7	Универ. фрез. . . .	0,34
3	5,5	„	„	0,30	10	„	„	„	0,13
4	5,96	„	„	0,38	11	„	„	„	0,22
5	—			0,17					
6	2,36	3,7	Ток. рев. Вернер . .	0,38					

Уже из этой небольшой таблицы следует, что картина получается довольно пестрая, причем

- а) мощность мотора достаточно необоснована и
- б) коэффициенты загрузки и низки и разнообразны.

Итак, относительно низкие коэффициенты загрузки моторов металлообрабатывающих станков обуславливают соответственно низкий коэффициент мощности металлообрабатывающих цехов.

3) Влияние коэффициента одновременности работы (η_d).

Коэффициент одновременности работы приемников электрической энергии, не влияя на $\cos \varphi$ приемников цеха, сказывается на режиме работы подстанций завода. Ясно, что уже у работающего завода понижение η_d приводит к уменьшению нагрузки трансформаторов и соответственно понижению их коэффициента мощности.

Уравнение зависимости коэффициента мощности трансформатора может быть представлено в виде:

$$\varphi_1 \cong \varphi_2 + \arcsin \left(\frac{J_0}{J_1} \cos \varphi_2 \right)$$

или, т. к.

$$J_1 = J_n \cdot \eta_{\text{вт}}$$

то

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \arcsin \left[\frac{J_0 \cos \varphi_2}{J_n \eta_{\text{вт}}} \right].$$

Если выразить коэффициент загрузки трансформатора через установленную мощность моторов, приняв некоторые средние значения, при условии неизменного $\cos \varphi_2$ и нагрузки отдельных приемников, то

$$\eta_{\text{в.т.}} = \frac{\eta_{\text{гх}}}{\eta_{\text{гн}}} \dots \dots \dots (6)$$

Окончательно будем иметь

$$\varphi_1 \cong \varphi_2 + \arcsin \left[\frac{J_0 \eta_{\text{гн}} \cos \varphi_2}{J_{1\text{n}} \eta_{\text{гх}}} \right] = \varphi_2 + \arcsin \left(\frac{C}{\eta_{\text{гх}}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

При выводе были приняты следующие обозначения:

φ_1 и φ_2 — углы сдвига первичного и вторичного тока трансформатора относительно соответствующих Э. Д. С.

J_0 — ток холостого тока трансформатора.

$J_{1\text{n}}$ — нормальный ток нагрузки трансформатора.

$\eta_{\text{гн}}$ — коэффициент одновременности, обуславливающий нормальную нагрузку трансформатора.

$\eta_{\text{гх}}$ — коэффициент одновременности при любой нагрузке трансформатора.

Уравнение (7) показывает, что уменьшение коэффициента одновременности работы приемников по сравнению с запроектированным должно ухудшать условия работы трансформаторов, понижая их коэффициент загрузки и коэффициент мощности. Это уменьшение $\cos \varphi$ собственно трансформаторов должно понизить величину общезаводского $\cos \varphi$.

4) Влияние режима работы приемников на коэффициент мощности.

Если во время работы приемника отсутствует постоянство нагрузки, то коэффициент мощности за какой либо произвольный промежуток времени при любом графике нагрузки может быть определен, исходя из общих уравнений.

Пусть активная энергия забираемая приемником из сети будет равна:

$$W_a = \frac{\sum P m_n t_n}{\eta_n}$$

и соответственно реактивная энергия будет

$$W_p = \frac{\sum P m_n t_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n},$$

где $P m_n$ — мощность на валу данного мотора, принятая постоянной за промежуток времени t_n ,

$\operatorname{tg} \varphi_n$ — соответствует тому же промежутку времени.

Тогда среднее значение $\cos \varphi$ можно определить из равенства:

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{\sum P m_n t_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\frac{\sum P m_n t_n}{\eta_n}} \dots \dots \dots (8)$$

Анализ уравнения (8) в общем виде затруднителен; поэтому составим его для частного случая периодически повторяющейся нагрузки с равно-

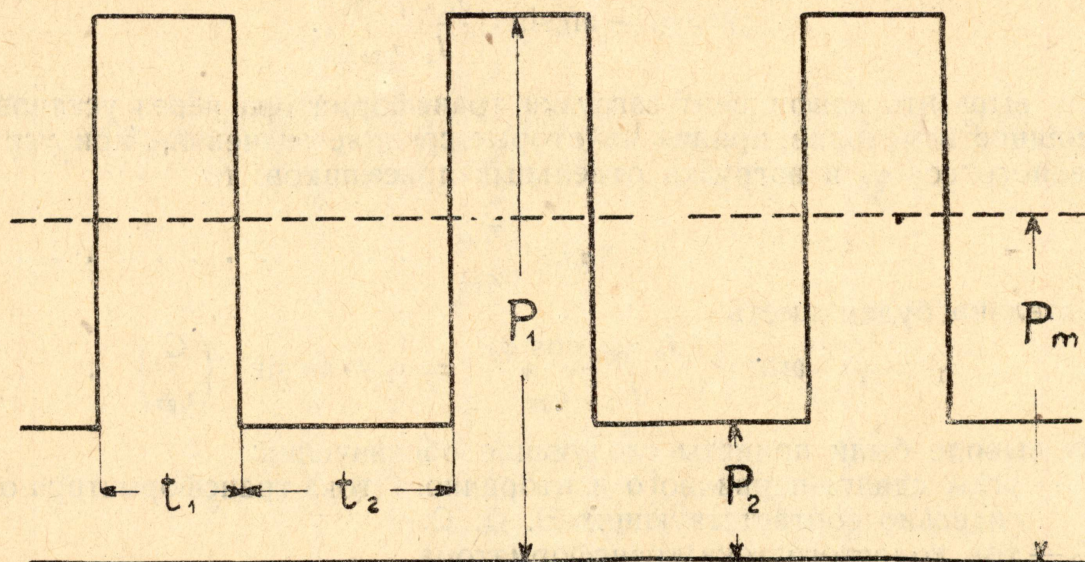


Рис. 3.

мерными пиками потребления энергии, какой имеет место, например, у кузнечных машин.

Примем для расчета упрощенный график рис. 3 и введем следующие обозначения:

$$\eta_{в1} = \frac{P_1}{P_m}; \quad \eta_{в2} = \frac{P_2}{P_m}; \quad \gamma = \frac{t_2}{t_1}$$

На основании уравнения (8) будем иметь:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \operatorname{tg} \varphi_1 + \frac{P_2}{P_1} \frac{t_2}{t_1} \frac{\eta_1}{\eta_2} \operatorname{tg} \varphi_2 \\ &\quad 1 + \frac{P_2}{P_1} \frac{t_2}{t_1} \frac{\eta_1}{\eta_2} \end{aligned}$$

или, заменив $\frac{t_2}{t_1}; \frac{\eta_1}{\eta_2}; \frac{P_2}{P_1}$, получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 + \alpha \beta \gamma \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \alpha \beta \gamma} \dots \dots \dots (9)$$

$$\alpha = \frac{\eta_{в2}}{\eta_{в1}}; \quad \beta = \frac{\eta_1}{\eta_2}; \quad \gamma = \frac{t_2}{t_1} \dots \dots \dots (10)$$

Рассмотрим уравнение (9) применительно к различным режимам работы электромоторов.

а) Кратковременная работа, очевидно, будет при

$$P_2 = 0, \quad \alpha = 0, \quad \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \varphi_1$$

и, следовательно, ухудшение $\cos \varphi$ будет зависеть только от перегрузки мотора, которая в данном случае обычно бывает порядка 150—200% от номинальной. Обычно максимум $\cos \varphi$ у нормальных моторов бывает при $P = (1,25 - 1,40) P_m$ и дальше идет его убывание, не столь значительное, чтобы с ним можно было особо считаться. Режим кратковременной работы

на металлообрабатывающих предприятиях встречается сравнительно редко, и поэтому с небольшим ухудшением $\cos \varphi$ приемников на подобном режиме можно не считаться, тем более, что и удельный вес энергии, потребляемой приемниками, обычно очень мал.

б) Повторно-кратковременная работа, к которой можно отнести в первую очередь крановые моторы, играет более существенную роль, причем $P_0 < P_2 < P_m$ и P_1 обуславливается величиной мощности при пуске с расчетом выдержать не менее 1,5-кратную перегрузку. К этому необходимо добавить, что $\cos \varphi$ крановых двигателей меньше $\cos \varphi$ нормальных моторов, и поэтому средний коэффициент мощности только крановых установок чрезвычайно низок.

Немного иначе дело обстоит, если рассматривать потребление энергии крановыми установками, работающими совместно с нормальными моторами.

Уравнение (9) можно рассматривать как уравнение при наличии 2-х видов нагрузок:

P_1 — нормальные потребители электроэнергии,

P_2 — крановые моторы,

t_1 — время работы нормальных потребителей,

t_2 — время работы крановых моторов.

В таблице 3 дана сводка по отдельным заводам удельного веса крановых моторов и их годового потребления, из которых можно сделать заключение об относительном влиянии крановой нагрузки на $\cos \varphi$ завода.

Если принять среднее значение $\cos \varphi_1 = 0,707$ ($\lg \varphi_1 = 1$), $\cos \varphi_2 = 0,40$ ($\lg \varphi_2 = 2,3$), то получаются значения общезаводского $\cos \varphi$, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

№ п/п		Норм. моторы $P_{уст.}$ средн.	Кранов. моторы $P'_{уст.}$ средн.	$\Sigma P'_{уст.}$ $\Sigma P_{уст.}$ %/о	Сред. мощн. транс. для кранов	Сред. мощн. транс. для норм. мотор.	$\cos \varphi$ завода	Расход энергии в год кранами в % расх. норм. моторами
1	Механо-сбор. цеха . . .	17,7	8,4	44	551	2460	0,625	22,5
2	"	15	17,7	68	84	241	0,595	35
3	"	12,5	7,4	42	70	331	0,63	21
4	"	9,0	6,2	33	93	574	0,643	16
5	"	7,7	5,2	34	38,4	224	0,641	17
6	"	7,4	7,9	51	135	539	0,618	25
7	"	5,2	3,7	44	28	128	0,627	22
8	Заводы	6,7	4,9	32	119	811	0,649	14,7
9	"	8,5	4,9	41,5	176	925	0,634	19,1
10	"	—	—	72,0	247	750	0,599	33
11	"	5,9	2,76	25,0	16,5	251	0,68	6,5
12	"	7,9	3,5	75,0	84	313	0,618	25

Максимальное отклонение при $\frac{\Sigma P_2 t_2}{\Sigma P_1 t_1} = 0,35$

от принятого коэффициента мощности нормальных моторов равно 0,11, причем для подсчета взята только нагрузка нормальных моторов и не учтено освещение, электропечи и другие приемники, повышающие коэффициент мощности завода. Отсюда можно сделать тот вывод, что влияние крановой нагрузки на коэффициент мощности не превышает 15—20% от моторной нагрузки и от общезаводской не более 10—15%.

в) Длительная работа, очевидно будет иметь место при $\gamma = 0$; $\alpha = 1$; $\beta = 1$ и уравнение (9) переходит в уравнение

$$\lg \varphi = \lg \varphi_1 \quad \cos \varphi = \cos \varphi_1.$$

Этот режим достаточно подробно разобран выше и поэтому здесь не разбирается.

г) Ударная или пиковая нагрузка, чередующаяся с холостым ходом мотора, приводит к тому, что средний $\cos \varphi$ имеет малое значение. Величину его можно определить по уравнению (9) за один цикл работы машины орудия.

Приведем данные, характеризующие ударный режим, взяв кузнечные машины (табл. 4).

Таблица 4

№№	Наименование машин	Мощность в квт					Коэффициент загрузки			Время			Cos φ_{cp}
		P_{ycr}	P_{max}	P_1	P_2	P_{cp}	$\eta_{в max}$	$\eta_{в1}$	$\eta_{в2}$	t_1	t_2	$\gamma = \frac{t_1}{t_2}$	
1	Ковочная „National“	55	120	40,5	7,0	28	2,00	0,67	0,12	13	15	1,15	0,60
2	„	37	100	40,7	5,3	21,6	2,40	1,00	0,17	11	30	2,72	0,66
3	„ 4''	26	28,0	15,8	4,0	6,1	0,96	0,5	0,14	9	20	2,2	0,51
4	„ 3''	20,5	31,2	14,7	2,2	8,1	1,33	0,66	0,09	4	10	2,5	0,51
5	„ 2,5''	14,5	16,6	8,7	2,0	4,7	1,0	0,53	0,12	3	9	3,0	0,47
6	„ 1,5''	7,4	11,9	6,1	1,0	4,3	1,35	0,69	0,11	4	4	1,0	0,54
7	„ 1,5''	7,4	12,0	5,7	1,0	3,4	1,36	0,65	0,11	6	12	2,0	0,46
8	Бульдозер „Geeveland“	7,5	9,1	3,63	0,7	3,7	1,03	0,43	0,08	4	4	1,0	0,51
9	Молот „Erie“ 2500 ф	14,8	38	10,3	3,0	14,6	2,28	0,62	0,19	10	15	1,50	0,51
10	„	14,8	37	21,5	1,8	13,3	2,22	1,28	0,11	20	35	1,75	0,72
11	„	18,9	30	20,7	1,8	12,1	1,46	1,0	0,10	12	27	2,25	0,65
12	„	14,0	40	19,8	1,2	12,4	2,40	1,15	0,07	12	19	1,58	0,75
13	„ 1600 ф	15	30,3	17,8	1,8	11,4	1,77	1,04	0,11	9	13,5	1,5	0,71
14	„	15	33,0	7,5	1,8	4,4	1,94	0,44	0,11	9	20	2,2	0,44
15	„	15	33,0	19,5	1,8	12,4	1,94	1,14	0,11	14	21	1,5	0,63
16	„ 1200 ф	7,4	15,8	10,0	1,5	5,5	1,80	1,14	0,20	8	20	2,5	0,70
17	„	7,4	14,8	11,6	1,5	7,7	1,68	1,32	0,20	15	20	1,3	0,72
18	„	7,4	16,2	10,4	1,5	6,6	1,85	1,18	0,20	7,5	11	1,5	0,70
19	„	10	19,4	9,3	0,7	6,3	1,65	0,79	0,06	10	15	1,5	0,65
20	Пресс „Kiserling“	6,8	8,0	5,8	1,2	6,2	1,0	0,72	0,15	12	36	3,0	0,43

Из таблицы № 4 следует, что при относительно большом максимуме нагрузки рабочего хода (P_{max} и $\eta_{в max}$), среднее значение коэффициента мощности, подсчитанное по уравнению (9), ниже нормально принятого 0,8.

Основное влияние на величину $\cos \varphi$ кузнечных машин имеет $\gamma = \frac{t_1}{t_2}$, т. е. про-

должительность холостого хода мотора и относительная величина загрузки

характеризуемая коэффициентом $\alpha = \frac{\eta_{в2}}{\eta_{в1}}$. Уменьшение этих отношений улуч-

шает средний $\cos \varphi$ мотора *). В качестве конечного вывода можно считать, что кузнечные цеха понижают общезаводский $\cos \varphi$.

5) Влияние режима работы предприятия на суточный коэффициент мощности.

Обычно работа металлообрабатывающих заводов посменно бывает различна, причем максимум световой нагрузки приходится на II-ю смену. Это обуславливает соответствующие величины коэффициента мощности посменно и так как в проектах редко предусматривают возможность выключения и переключения трансформаторов, исходя из их максимальной нагрузки, то недогрузка II и III смен приводит к понижению среднесуточного и следовательно месячного коэффициента мощности за счет снижения $\cos \varphi$

*) Подробнее смотри: „Вестник Эл-ности“, № 3, 1934 г., ст. инж. Гейлера Л. Б.

трансформатора. Разберем проект одного паровозоремонтного завода с точки зрения коэффициента мощности, учитывая режим работы предприятия, положив в основу средние значения, принятые при проектировании (таблица 5).

Таблица 5

№№ под-станций	Время работы	Установл. мощн. транс.	Данные без учета $\eta_{вт}$ трансформ.			Данные с учетом $\eta_{вт}$ трансформ.			
		$P_{уст}$	P_a	P_p	$\cos \varphi$	$\eta_{вт}$	$\cos \varphi$	P_a	P_p
1	8—16	8×320	648	655	0,70	0,965	0,665	648	738
2	"	2×560	830	745	0,76	0,975	0,73	830	772
3	"	2×320	476	440	0,73	0,975	0,70	476	450
По заводу . . .			1954	1840	0,727	—	0,700	1954	1960
1	16—24	3×320	745	559	0,8	0,97	0,765	745	630
2	"	2×560	950	667	0,82	1,035	0,79	950	738
3	"	2×320	524	339	0,84	0,975	0,81	524	374
По заводу . . .			2219	1565	0,82	—	0,786	2219	1742
1	24—8	2×320	466	212	0,91	0,80	0,87	466	274
2	"	2×560	695	416	0,86	0,72	0,81	695	502
3	"	2×320	406	252	0,85	0,75	0,81	406	293
Среднесуточные значения			1560	880	0,872	—	0,824	1567	1069
			5740	4285	0,802	—	0,768	5740	4770

Очевидно, что если бы при проектировании учли влияние коэффициента мощности не догруженных трансформаторов, то для третьей смены надо было бы взять другую комбинацию трансформаторов. Обычно график нагрузки бывает еще более резко колеблющимся между I и III сменами, при чем не всегда эксплуатационные техники идут на выключение работающих с недогрузкой трансформаторов. Приведем подсчет $\cos \varphi$ для того же завода только для летнего графика нагрузки (таблица 7).

Таблица 6

№№ п/с	Время работы	Р установл. трансформ. ква	Без учета $\eta_{вт}$			С учетом $\eta_{вт}$			
			P_a	P_p	$\cos \varphi$	$\eta_{вт}$	$\cos \varphi$	P_a	P_p
1, 2, 3	8—16	По заводу	1954	1840	0,727	—	0,719	1954	1960
1	16—20	3×320	470	533	0,66	0,74	0,61	470	610
2	"	2×560	733	605	0,77	0,85	0,73	733	682
3	"	2×320	357	329	0,72	0,765	0,675	357	390
По заводу . . .			1560	1467	0,727	—	0,68	1560	1682
1, 2, 3	20—24	—	2219	1565	0,817	—	0,786	2219	1742
1, 2, 3	24—4	По заводу	1567	880	0,872	—	0,824	1567	1069
1	4—8	1×320	199	202	0,7	0,89	0,66	199	235
2	"	2×560	484	396	0,77	0,56	0,71	484	481
3	"	2×320	244	241	0,70	0,545	0,64	244	293
По заводу . . .			927	839	0,741	—	0,676	927	1009
Суточный . . .			—	—	0,77	—	0,730	—	—

При проектировании принято на весь год расчетной величиной $\cos \varphi = 0,802$, в то время как при самом осторожном подсчете, без учета обещанных перерывов, 7-ми часового рабочего дня, пускового времени перед сменами, получена величина в летнее время $\cos \varphi = 0,730$, т. е. разница на 0,072.

Недостаточный учет графика загрузки предприятия и слишком большое увлечение „средними“ значениями приводят к тому, что коэффициент мощности металлообрабатывающих заводов очень резко отличается от запроектированного. В таблице 8 даны значения $\cos \varphi$ нескольких заводов по результатам обследования, подтверждающие вышеизложенное:

Таблица 7

№№	З а в о д	С о с φ			
		I смена	II смена	III смена	Суточный
1	Электроаппарат	0,51	0,44	0,33	0,44
2	Электросила (ОНМ)	0,599	0,652	0,595	0,61
3	Электроприбор	0,669	0,62	0,578	0,643
4	Телеграфный з-д	0,53	0,48	0,50	0,508
5	Меднопрокатный	—	—	—	0,47
6	Средний по 26 металлообр. зав. г. Москвы .	—	—	—	0,62

6) Влияние на общезаводский коэффициент мощности вида приемника электроэнергии.

Дать какие-либо обобщения очень трудно, т. к. все зависит от относительного веса каждого вида приемника электроэнергии в общем балансе электрохозяйства завода.

Укажем только значение $\cos \varphi$ сварочных трансформаторов для нескольких заводов и их относительное влияние на $\cos \varphi$ завода (таблица 9).

Таблица 8

№№	Характер завода	$\Sigma P_{уст}$ по заводу	Нагруз- ка P_a	Сварочн. трансформ. и агрегаты				
				$\Sigma P'_{уст}$	Нагруз- ка P'_a	$\frac{\Sigma P'_{уст}}{\Sigma P_{уст}}$	$\frac{P'_a}{P_a}$	Про- ектный $\cos \varphi$
		Квт	Квт	Квт	Квт	%	%	—
1	Паровозоремонтный	2787	1954	97	68	3,5	3,5	0,35—0,8
2	Запчасти с. х.	856	539,6	15	1,70	1,70	0,31	0,30
3	Грузоподъем. сооруж.	1992	1140	155	32,3	7,8	7,2	0,5—0,8
4	Машиностроит.	3136	500	1429	90	1,6	6,3	0,6

Таблица составлена по проектным данным Гипромаша. Из нее следует, что удельный вес сварочных агрегатов и трансформаторов незначителен и следовательно, не оказывает особого влияния на $\cos \varphi$ завода.

Крупные электрические печи обычно имеют самостоятельный трансформатор и поэтому на коэффициент мощности завода со стороны низкого напряжения не влияют. Они улучшают общезаводский $\cos \varphi$, поскольку имеют собственный $\cos \varphi = 0,8—0,9$.

То же можно сказать и о крупных моторах, например, компрессорных установок, которые включены на стороне высокого напряжения. Улучшая общезаводский $\cos \varphi$, они не решают вопроса в целом, так как сеть низкого напряжения не освобождается от реактивных токов.

7) Регулировка скорости электрическим путем наиболее экономична при наличии на заводе постоянного тока. Это в свою очередь вызывает необходимость установки, преобразовывающей переменный ток в постоянный, и в зависимости от способа преобразования сказывается на общем $\cos \varphi$ завода. Преобразователи больших мощностей имеют высокий $\cos \varphi$, следовательно, улучшают общезаводский коэффициент мощности.

На металлообрабатывающих заводах без собственной металлургической базы и при небольших моторных установках роль постоянного тока в общей системе очень незначительна, и поэтому ее можно особо не оговаривать.

8) Правильность выбора установленной мощности в конечном счете определяет η моторов и, следовательно, его $\cos \varphi$. Избыток установленной мощности моторов увеличивает необходимую мощность трансформаторов, которые в этом случае тоже имеют неполную загрузку.

Насколько иногда неудачно подходят к этому вопросу видно из табл. 10, где приведены соотношения мощностей различных станков одного из машиностроительных заводов.

Таблица 9

№	Наименование станка	$P_{уст}$ станка квт	$P_{уст}$ мотора квт	№	Наименование станка	$P_{уст}$ станка квт	$P_{уст}$ мотора квт
1	Горизон. фрез. № 1½ Цинцинати	2,61	5,5	15	Горизон. фрез. Бариканд .	1,62	1,75
2	"	3,02	3,7	16	" Зондерман .	2,43	4,5
3	"	2,90	5,5	17	Верт. фрез. Зондерман . .	3,17	4,5
4	"	2,9	3,7	18	"	7,4	5,5
5	Горизон. фрез. № 2 Цинцинати	6,25	3,7	19	Универ. фрез. Ингерсоль .	7,4	10
6	"	4,20	3,7	20	Токарн. центр. Прейтус . .	5,5	7,4
7	"	4,0	3,7	21	"	4,8	7,4
8	"	5,9	2,6	22	"	5,96	7,4
9	Горизон. фрез. № 3 Цинцинати	4,1	3,7	23	"	8,6	7,4
10	"	5,0	3,7	24	"	8,85	7,4
11	"	5,4	3,7	25	"	1,89	5,5
12	Горизон. фрез. Райникер .	3,02	4,5	26	Токарн. рев. Вернер . . .	2,36	3,7
13	"	4,8	7,4	27	"	2,36	3,7
14	Горизон. фрез. Вандерер .	2,95	4,5	28	"	2,36	3,7
				29	Строгальн. дв. Револ. . . .	2,94	4,5
				30	Токарно-центров. Ланге . .	8,85	11,05
				31	"	11,8	14,7

Таблица достаточно показательна как с точки зрения бессистемности выбора моторов, так и с точки зрения излишней мощности моторов. Кстати отметим, что взятые на выдержку станки составляют около 15% их общего количества на заводе. Еще хуже дело обстоит с загрузкой станков, т. е. с их фактическим использованием, что видно из таблицы 2.

II. Наиболее экономичные способы компенсации сдвига фаз металлообрабатывающих заводов.

Кратко резюмируем условия, в которых должна будет протекать компенсация сдвига фаз. Эти условия следующие:

1) наличие большого количества мелких моторов как результат широкого распространения одиночного привода, позволяющего дробить мощность не только применительно к данному агрегату, но и на агрегате расчленять отдельные операции. Средняя установленная мощность моторов не превышает 10 квт.;

2) не стационарный режим работы моторов, приводящих в движение машины-орудия, как следствие смены операций на машинах-орудиях;

3) относительно большая и разветвленная распределительная сеть низкого напряжения;

4) низкие значения средних коэффициентов загрузки машин-орудий, обуславливающие соответственно низкие коэффициенты загрузок электромоторов и понижающие их коэффициенты мощности;

5) незначительное применение постоянного тока, т. к. для вспомогательных приводов металлообрабатывающих станков (плиты шлифовальных станков, электромагнитные муфты строгальных станков и т. д.) можно применять небольшие преобразователи. Крановые моторы применяются, как правило, на переменном токе, т. к. не требуется большой точности регулировки их скорости как, например, в крупных сталелитейных цехах, где часто предпочитают постоянный ток переменному, именно из соображений регулировки скорости;

6) крупные электромоторные установки свыше 250 квт, к которым могут быть отнесены компрессора; электрические печи в случае наличия собственного литейного цеха устанавливаются или непосредственно на высоком напряжении (компрессора) или имеют самостоятельный трансформатор питания (электропечи) и поэтому их высокий коэффициент мощности сказывается на общезаводском $\cos \varphi$;

7) переменный режим металлообрабатывающих заводов посменно.

Ограничим задачу компенсации сдвига фаз только до вводных фидеров заводской п/с., взяв типичный металлообрабатывающий завод с питанием от районной сети.

Из существующих методов компенсации сдвига фаз в пределах завода различают три основных.

1) Централизованная компенсация, понимая под ней установку на высоком напряжении для улучшения общезаводского коэффициента мощности без влияния на величину реактивной отстающей мощности в сети низкого напряжения.

2) Групповая компенсация—установка генераторов реактивной мощности низкого напряжения на цеховых подстанциях или непосредственно в цехах на группу приемников электрической энергии.

3) Индивидуальная компенсация сдвига фаз, понимая под ней компенсацию сдвига фаз до определенной величины каждого приемника электрической энергии.

Централизованная компенсация сдвига фаз, применяемая в высоковольтных сетях из соображений разгрузки генераторов для регулирования напряжения сети, в условиях металлообрабатывающих заводов очевидно не решает вопроса в целом.

Централизованное улучшение коэффициента мощности решает две задачи: а) освобождение высоковольтной сети и генераторов центральной станции от остающей реактивной мощности так или иначе повышает располагаемую мощность станции;

б) уменьшение оплаты за электрическую энергию, при чем второй вопрос есть по существу только вопрос тарифной политики—„контроль рублем“, не решает основной задачи освобождения завода от реактивной мощности.

Наиболее благоприятным решением вопроса, очевидно, будет такое решение, при котором вся распределительная сеть и трансформаторные подстанции освобождаются от реактивной мощности, так как при этих условиях оборудование будет использовано максимально.

Определим наивыгоднейшие условия компенсации сдвига фаз.

1) Если активная мощность трансформаторов равна P_a , то при $\cos \varphi_1$ необходима их кажущаяся мощность, равная:

$$P_1 = \frac{P_a}{\cos \varphi_1}$$

Повысив коэффициент мощности до значения равного $\cos \varphi_2$ при постоянстве F_a , мы очевидно получим необходимую кажущуюся мощность:

$$P_2 = \frac{P_a}{\cos \varphi_2}$$

Откуда избыток установленной мощности трансформаторов будет равен:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} 100 = \left(1 - \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}\right) 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Так как $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$, то разность будет положительной.

Сравнивая с $\cos \varphi_2 = 1$, получим уравнение (1-а)

$$\Delta P = (1 - \cos \varphi_1) 100\% \dots \dots \dots (1-a)$$

т. е. необходимый избыток кажущейся мощности трансформаторов при коэффициенте мощности меньше единицы прямо пропорционален имеющемуся коэффициенту мощности.

С другой стороны, разность ΔP равна нулю при $\cos \varphi_1 = 1$, откуда следует, что компенсация выгодна до $\cos \varphi = 1$, так как в этом случае необходима минимальная мощность трансформаторов.

2) Коэффициент полезного действия трансформатора при пониженном $\cos \varphi_1$ может быть выражен как:

$$\eta_{\text{тр}1} = \frac{P_n \cos \varphi_1}{P_n \cos \varphi_1 + \frac{\Delta U P_n}{100} + P_0} \dots \dots \dots (2)$$

и при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_{\text{тр}2} = \frac{P_n}{P_n + \frac{\Delta U P_n}{100} + P_0} \dots \dots \dots (3)$$

Относительное уменьшение к.п.д. трансформатора будет равно

$$\Delta \eta_{\text{тр}2} = \frac{\eta_{\text{тр}2} - \eta_{\text{тр}1}}{\eta_{\text{тр}1}} 100\%,$$

что после подстановки и преобразований дает:

$$\Delta \eta_{\text{тр}} = \frac{0,01 \Delta U P_n + P_0}{P_n + 0,01 \Delta U P_n + P_0} \cdot \left[\frac{1}{\cos \varphi_1} - 1 \right] = C_1 \left[\frac{1}{\cos \varphi_1} - 1 \right] \dots \dots (3-a)$$

откуда следует, что к.п.д. трансформатора имеет максимум при $\cos \varphi_1 = 1$.

В уравнениях (2), (3) и (3-а) приняты следующие обозначения:

P_0 — мощность холостого хода трансформатора,

P_n — номинальная мощность трансформатора в кВа.

ΔU — падение напряжения на вторичных зажимах трансформатора, в $\%/\%$.

3) Относительное увеличение потерь мощности в сети может быть выражено следующим образом:

$$P_1 = \frac{P_a L}{K q U^2 \cos^2 \varphi_1} \quad P_2 = \frac{P_a L}{K q U^2 \cos^2 \varphi_2}$$

Приняты следующие обозначения:

$K = \frac{1}{S}$ — удельная проводимость,

q — сечение кабеля,

U — линейное напряжение,

L — длина распределительной сети или отдельного кабеля, фидера и т. д.

При $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100\% = \left[\frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1} - 1 \right] 100\% \dots \dots \dots (4)$$

При $\cos \varphi_2 = 1$, т. е. по сравнению с наиболее благоприятным случаем:

$$\Delta P = \operatorname{tg}^2 \varphi_1 100\% \dots \dots \dots (4-a)$$

4) Уменьшение коэффициента полезного действия сети может быть получено из предыдущих уравнений, учтя следующее:

$$\eta_{c1} = \frac{P_a}{P_a + P_1} \quad \eta_{c2} = \frac{P_a}{P_a + P_2}$$

$$\Delta \eta_c = \frac{\eta_{c2} - \eta_{c1}}{\eta_{c2}} = \frac{P_1 - P_2}{P_a + P_2} \dots \dots \dots (5)$$

Относительное уменьшение к.п.д. сети, после преобразований будет:

$$\Delta \eta_c = \frac{L (\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1)}{\cos \varphi_1 (a \cos^2 \varphi_2 + L)},$$

где $a = Kq U^2$

При $\cos \varphi_2 = 1 \dots \varphi_2 = 0$ получим:

$$\Delta \eta_c = \frac{L}{a + L} \left[\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1 \right] = C_2 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 \dots \dots \dots (5-b)$$

Из уравнения (5) следует, что к.п.д. сети тоже будет иметь максимум при $\cos \varphi_1 = 1$, что вполне объяснимо поскольку джоулевы потери определяющие η_c , пропорциональны квадрату тока, который в свою очередь обратно пропорционален $\cos \varphi$.

5) Относительное уменьшение сечения распределительной сети при данной и постоянной активной мощности равно:

$$\Delta q = \frac{q_1 - q_2}{q_1} 100 = \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right] 100\% \dots \dots \dots (6)$$

Если нас интересует относительная экономия при $\cos \varphi_2 = 1$, т. е. относительное увеличение сечения при уменьшении $\cos \varphi_2$ от 1 до $\cos \varphi_1$, то уравнение примет вид:

$$\Delta q = [1 - \cos^2 \varphi_1] 100\% \dots \dots \dots (6-a)$$

что опять показывает, что наивыгоднейшим случаем будет $\cos \varphi = 1$.

6) Увеличение веса кабеля очевидно равно:

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_2}{G_1} 100\% = \frac{\gamma L}{\gamma L} \left[\frac{q_1 - q_2}{q_1} \right] = \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right] 100\%$$

или при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\Delta G = [1 - \cos^2 \varphi_1] 100\% \dots \dots \dots (7)$$

I. Итак наивыгоднейшим технически случаем является компенсация сдвига фаз на стороне низкого напряжения до угла равного нулю или до коэффициента мощности равного единице. В этом же случае максимально сокращается необходимое сечение распределительной сети и мощности трансформаторов и их коэффициент полезного действия имеет максимум.

Как условились выше, под групповой компенсацией понимается установка генераторов реактивной мощности:

а) на шинах низкого напряжения п/с,

б) непосредственно в цеху на группу приемников электрической энергии.

Первый метод, более удобный с точки зрения обслуживания компенсирующей установки, и выбора крупных единиц технически не выгоден тем, что распределительная сеть не разгружается от реактивной мощности.

Второй метод, разгружая, кроме трансформаторов, распределительную сеть, имеет тот недостаток, что ухудшаются условия обслуживания и кроме того должны устанавливаться генераторы более мелких мощностей, конечно при условии, что предполагается разгрузка от реактивной мощности всей распределительной сети завода (от групповых щитков).

Относительная невыгода групповой компенсации заключается еще в том, что по условиям графика работы металлообрабатывающих заводов, очень неравномерного, при компенсации до $\cos \varphi$ близкого к единице возможна перекомпенсация, т. е. нагрузка сети реактивной опережающей мощностью, что приведет к указанным выше последствиям.

Переменный график работы предприятия посменно, а также относительное уменьшение реактивной (отстающей) мощности в вечерние и ночные смены как за счет уменьшения числа работающих моторов, так и за счет увеличения $\cos \varphi$ вследствие включения осветительной нагрузки потребует специального контроля за установками для компенсации сдвига фаз. Все эти три обстоятельства не позволяют рекомендовать групповую компенсацию в условиях металлообрабатывающих предприятий.

Основными потребителями реактивной (отстающей) энергии на металлообрабатывающих заводах являются мелкие моторы с условиями работы перечисленными выше; поэтому если учитывать, кроме того, I вывод, то наиболее применим 3-й способ, т. е. индивидуальная компенсация.

II. Следовательно, наиболее целесообразной в условиях металлообрабатывающих заводов является индивидуальная компенсация сдвига фаз.

Перейдем к вопросу выбора генераторов реактивной мощности металлообрабатывающих заводов.

1) Синхронные и асинхронные компенсаторы очевидно совершенно не могут быть применены на металлообрабатывающих заводах, как основной генератор реактивной мощности, для централизованного улучшения $\cos \varphi$ тем более, что они строятся больших мощностей (от 1000 ква и выше) и преимущественно на высокое напряжение.

2) Синхронные моторы найдут весьма ограниченное применение для привода компрессоров.

Минимальная мощность серии СТ заводов ВЭО равна 82 ква или $P_m \cong 60$ квт.

Кроме того, они не решают вопрос, т. к. являются средством централизованной или групповой компенсации.

3) Фазокомпенсаторы применимы только при мощностях моторов порядка не менее 200—250 квт. и выше и поэтому вообще не применимы в условиях металлообрабатывающих заводов, т. к. для привода крупных машин целесообразнее брать нормальный синхронный мотор.

4) Синхронизированные асинхронные моторы при полной нагрузке имеют малую устойчивость, низкий коэффициент полезного действия. При наличии нескольких крупных моторов, удаленных на достаточное расстояние, требуется или применение возбудителя низкого напряжения порядка 10—15 вольт и ниже или же создание специальной сети низкого напряжения того же порядка, так как величина напряжения генератора в данном случае определяется только падением напряжения в роторной обмотке мотора. Если устанавливается несколько моторов крупных, но различных

мощностей, то появляется добавочный расход энергии вследствие того, что моторы меньшей мощности, как требующие меньший ток возбуждения, должны быть шунтированы (обычная схема—последовательное включение роторной цепи нескольких моторов для увеличения напряжения генератора). Если же учесть величину средней установленной мощности моторов (табл. 1), то станет ясно, что этот метод улучшения коэффициента мощности нельзя рекомендовать как массовый метод в условиях металлообрабатывающих предприятий. Возможно, что в отдельных частных случаях работы мотора с недогрузкой, при его большой мощности может оказаться и этот метод применим в виде особого исключения, хотя при крупном уже существующем моторе выгоднее применить фазокомпенсатор, а при вновь устанавливаемом брать нормальный синхронный мотор.

5) Компенсированные асинхронные моторы с $\cos \varphi = 1$ у нас совершенно не изготавливаются из-за их дороговизны и усложнения условий эксплуатации. За границей они находят очень малое применение, и также поэтому можно дальше их не рассматривать.

6) Коллекторные двигатели переменного тока, имея высокий $\cos \varphi$ и широкую регулировку скорости, обладают относительно низким коэффициентом полезного действия, дороги и неудобны в эксплуатации, поэтому распространения в условиях металлообрабатывающих заводов не нашли.

7) Статические конденсаторы—единственное средство, которое можно рекомендовать для улучшения $\cos \varphi$ металлообрабатывающих заводов без особых оговорок.

III. Итак для улучшения $\cos \varphi$ металлообрабатывающих заводов наиболее технически правильным будет применение статических конденсаторов на низком напряжении непосредственно у потребителей реактивной энергии.

Рассмотрим более подробно достоинства и недостатки статических конденсаторов.

1) Экономическое сравнение статических конденсаторов с другими видами компенсации.

Экономическое сравнение взято по тем видам компенсации, которые могут быть применимы в условиях металлообрабатывающих предприятий, т. е. не выше 400 ква в единице. Поскольку синхронные конденсаторы являются средством централизованной компенсации сдвига фаз, то естественно, что они здесь не рассматриваются.

Годовая стоимость эксплуатации какой либо установки для производства реактивной мощности состоит из:

а) постоянных расходов, к которым надо отнести отчисление на амортизацию оборудования и процентные отчисления на первоначальные затраты, и

б) переменных расходов, состоящих в свою очередь из стоимости потерь активной энергии, необходимых для производства реактивной мощности, и стоимости обслуживания.

Введем следующие обозначения:

K —стоимость годовой эксплуатации установки,

A —стоимость первоначальных затрат,

P —процентные отчисления,

V —потери в установке,

h —число часов использования,

b —стоимость одного киловатт-часа,

W —стоимость обслуживания установки.

Тогда полные годовые расходы по эксплуатации компенсационной установки можно выразить в виде

$$K = pA + Vhb + W \dots \dots \dots (8)$$

Для того чтобы можно было сравнивать различные методы компенсации, введем понятие удельной стоимости эксплуатации, понимая под ней стоимость годовых эксплуатационных расходов, отнесенных к одному реактивному ква. В этом случае, очевидно, будем иметь:

$$K = pa + vhb + w \dots \dots \dots (9)$$

Все обозначения прежние, только отнесены к одному реактивному ква. На рис. 4 приведено сравнение этой удельной стоимости эксплуатации для синхронизированных моторов при различном числе часов использова-

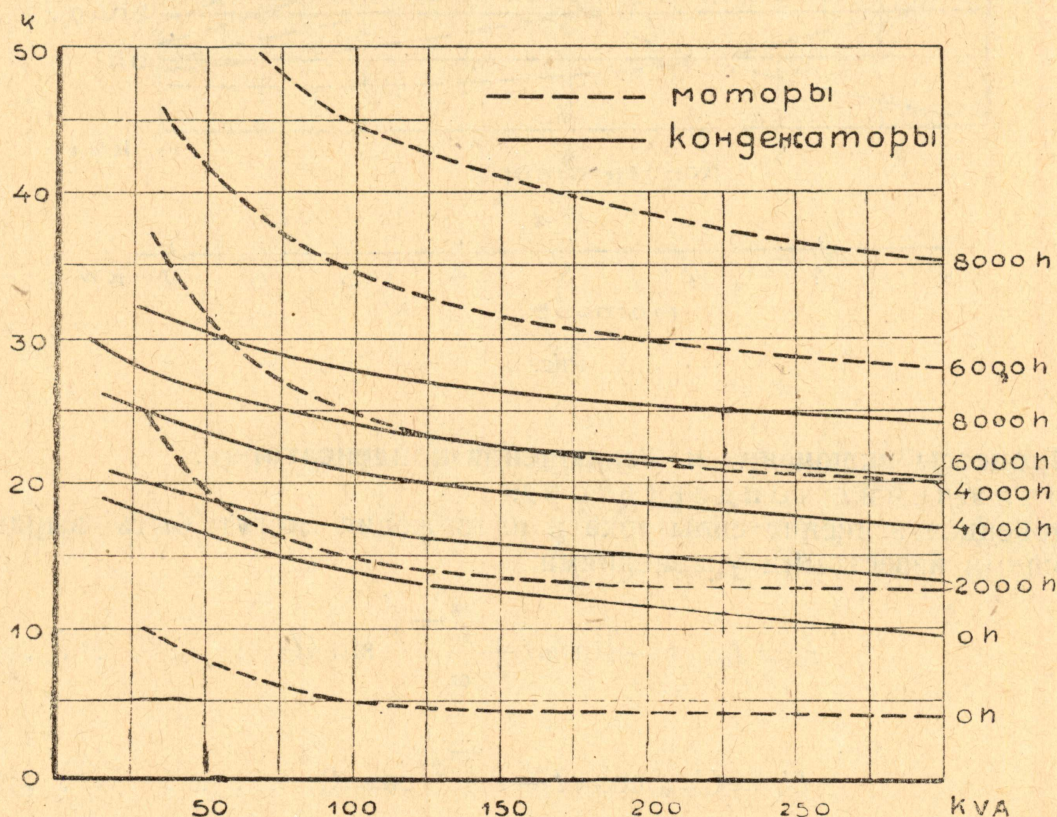


Рис. 4.

ния по данным немецкой фирмы Сименс-Шуккерт. Из сравнения кривых следует, что, несмотря на большую первоначальную стоимость статических конденсаторов ($h \equiv 0$), уже при $h = 2000$ часов в год экономичнее статические конденсаторы (при малых мощностях меньше 50 ква). Безусловное экономическое преимущество статических конденсаторов будет при $h = 4000$ часов в год.

На рис. 5 дано сравнение статических конденсаторов и компенсированных двигателей малых мощностей по тем-же показателям, причем левее пунктирной линии выгоднее статические конденсаторы, правее — компенсированные асинхронные двигатели. Характерно, что в пределах небольших мощностей величина удельных расходов не зависит от мощности конденсатора. Это вполне объяснимо, т. к. 1-й и 3-й член уравнения (9) оста-

ются неизменными, а 2-й изменяется только пропорционально числу часов использования.

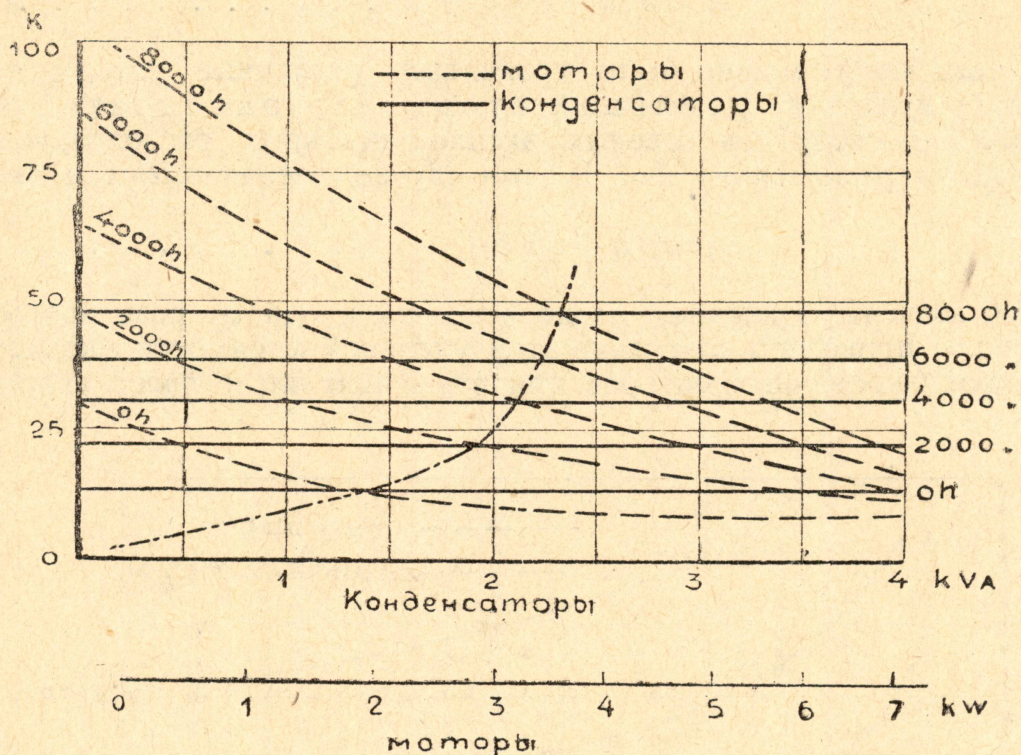


Рис. 5.

2) Процессы включения и выключения конденсаторов.

а) Включение конденсатора.

Мгновенное значение силы тока и напряжения могут быть выражены следующими известными уравнениями:

$$i_c = J_{\max} \left(-\sin \omega t + \frac{e^{-\frac{t}{2T}}}{\omega} \sin \nu t \right) \dots \dots \dots (10)$$

$$U_c = U_{\max} \cos \omega t - e^{-\frac{t}{2T}} \cos \nu t \dots \dots \dots (11)$$

где $J_{\max}$ $U_{\max}$ — амплитудные значения зарядного тока и напряжения при установившемся режиме,

$T = \frac{L}{R}$ — постоянная времени колебательного контура.

$$\nu = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \dots \dots \dots (12)$$

— собственное число колебаний контура.

Из уравнения (10) следует, что ток включения есть сумма установившегося и уравнивающего тока, при чем уравнивающий ток равен произведению установившегося тока на отношение частот: собственной частоты колебания данного контура к частоте сети. Обычно частота собственных колебаний лежит в пределах 250—350 пер/сек. и поэтому следует ожидать толчок тока в первый момент включения равной 5—7 кратному нормаль-

ному току. Это при условии незначительного активного сопротивления контура. Если же R велико, то как следует из уравнения (10), собственная частота контура понижается и соответственно должен снизиться ток включения. Длительность процесса включения, величины получающихся при этом толчков тока и влияние добавочного сопротивления при включении показывает рис. 6, при чем взяты два момента включения, а именно

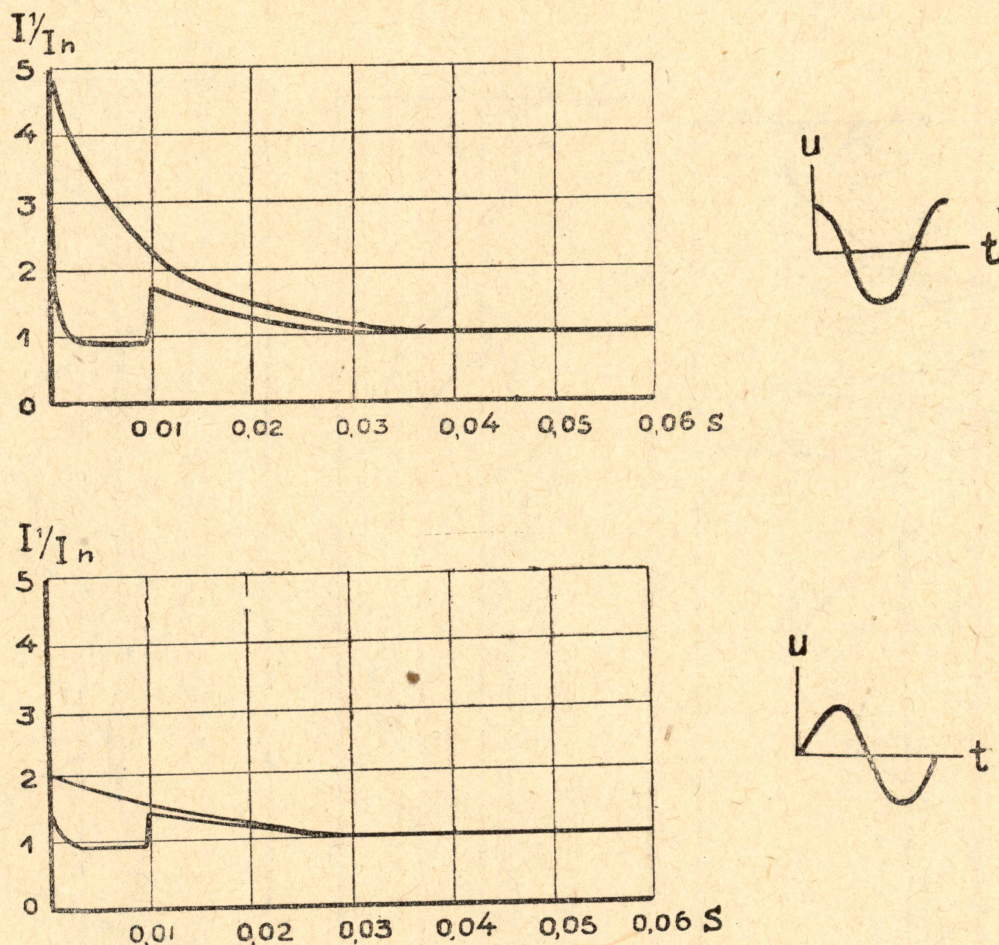
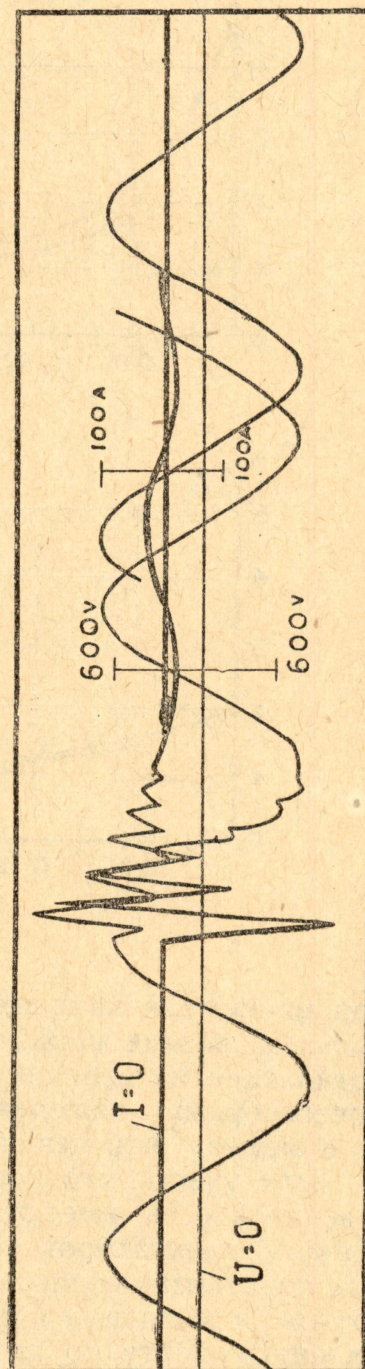
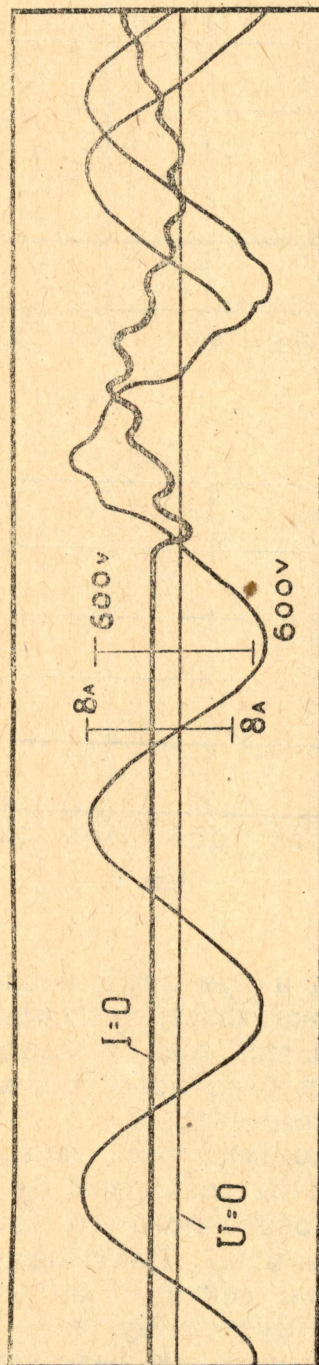
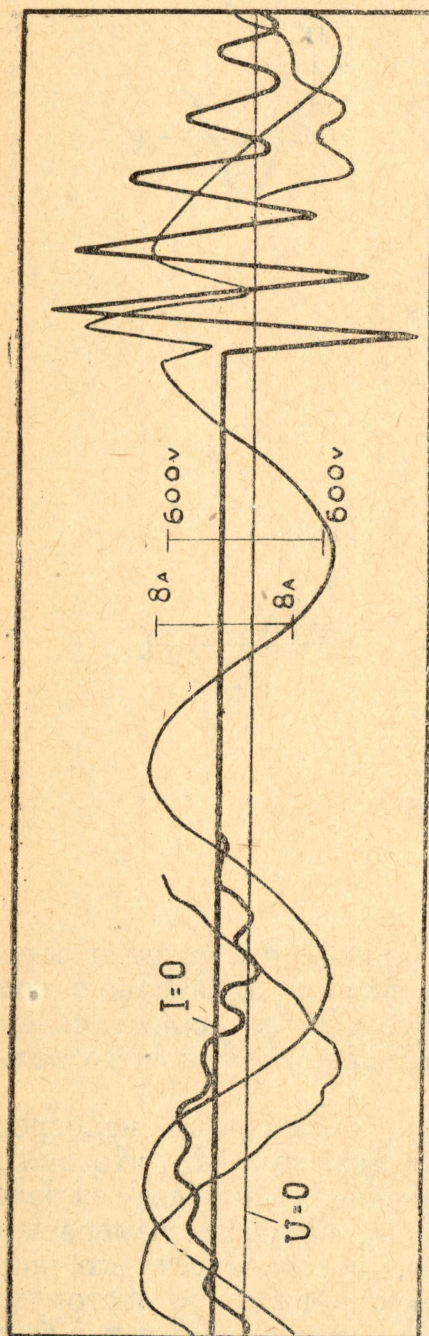


Рис. 6.

при максимуме напряжения и при прохождении кривой напряжения через нуль. Сравнение кривых показывает, как сильно влияет добавочное сопротивление на величину толчка тока и, следовательно, для снижения его целесообразно включение добавочного сопротивления, работающего только в момент включения конденсатора.

Если учесть, что короткозамкнутые двигатели, включаемые непосредственно в сеть, имеют толчок тока того же порядка, то ясно, что включение конденсаторов без добавочного сопротивления не опаснее включения короткозамкнутых двигателей. Длительность же процесса, измеряемая сотыми и тысячными долями секунды, очевидно, обеспечивает его нормальную работу по тепловому режиму, даже при относительно частом его включении, т. к. количество энергии выделяющееся в нем, не должно быть особо велико ($I^2 R_c t$), так как t очень мало.

На рис. 7—13 представлены осциллограммы включения в различные моменты прохождения кривой напряжения. В таблице 11 (см. стр. 232) сведены данные относящиеся к перечисленным осциллограммам, при чем часть опытов для наглядности была произведена с однофазной цепью.



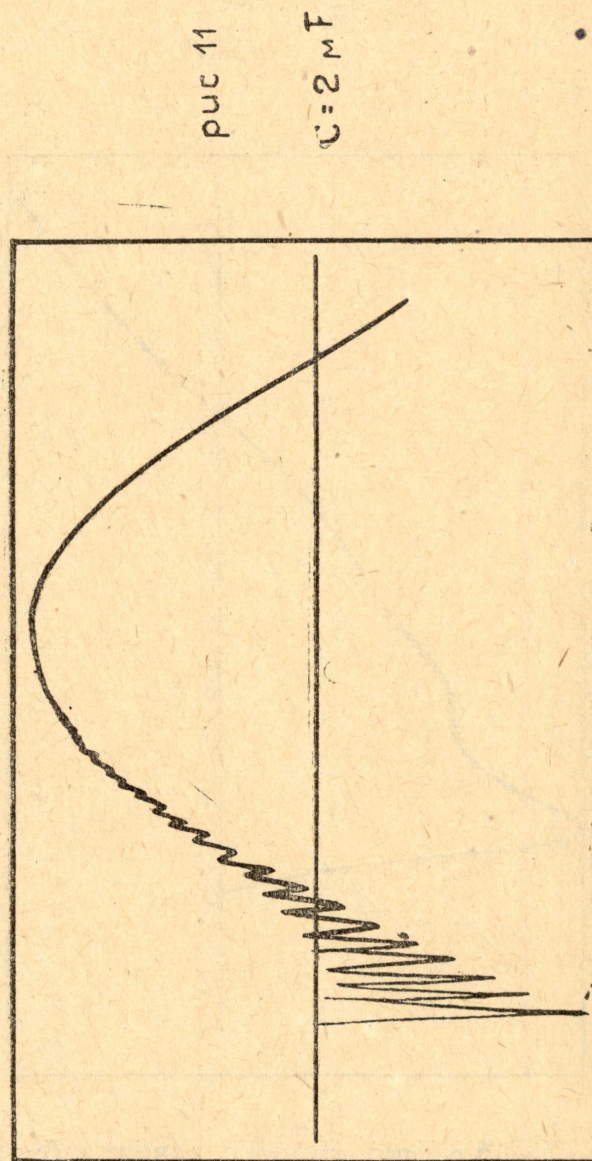
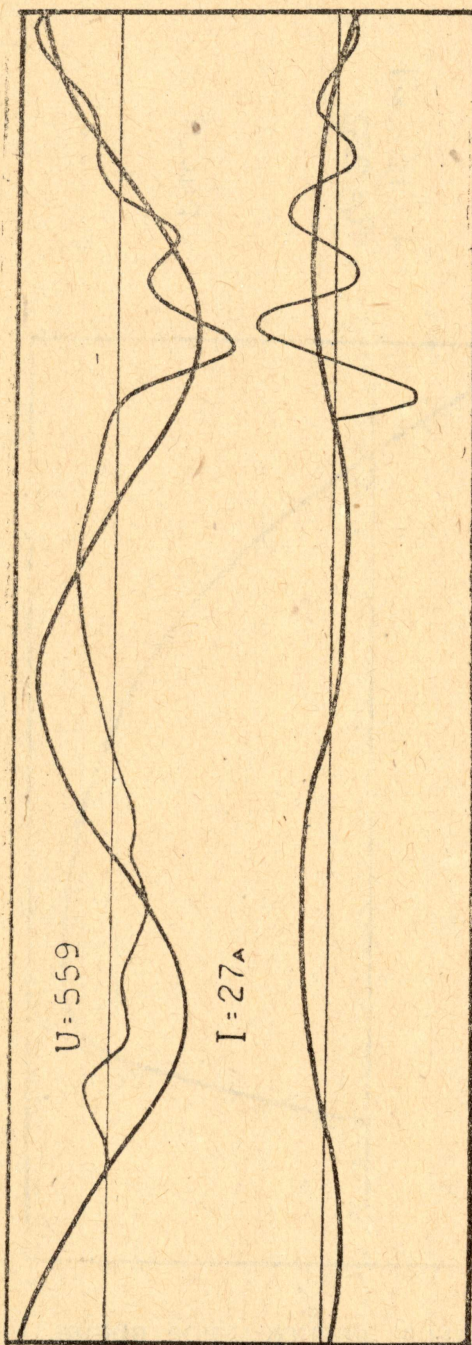
б) Выключение конденсатора.

Разряд конденсатора через внешнее сопротивление в математической форме может быть выражен следующими уравнениями:

$$u_c = U e^{-\frac{t}{T_1}} \dots \dots \dots (13)$$

$$L_c = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T_1}} \dots \dots \dots$$

где U — напряжение в момент выключения и R_1 разрядное (внешнее сопротивление), $T_1 = RC$ — постоянная времени разряда, если пренебречь индуктивным сопротивлением. Следовательно, чем больше емкость и сопротивление,



тем длительнее будет процесс разряда. Если разряжать конденсатор только через его собственное сопротивление, которое обычно очень велико,

Таблица 10

№№ рис.	С. т F	R _{доб} Ω	Момент включе- ния e=	U _{эфф}	ν	t	U' U _{эфф}	J' J _{эфф}	Конденсатор приключен k
7	13	0	макс.	505	350	0,017	1,8	7	Индукт. рег.
8	13	0	0	495	350	0	1,0	1	35 ква
9	82	0	макс.	540	650	0,014	1,75	12	Тр-р 45 ква
10	3×89	дрос.		504	300	0,02	1,56	4,7	—
11	2	0	любое	520	3000	0,008	—	—	Трансф. 50 ква
12	134	1	"	520	0	—	—	—	" 280 "
13	134	2	"	520	...	—	—	—	" 280 "

рис. 12

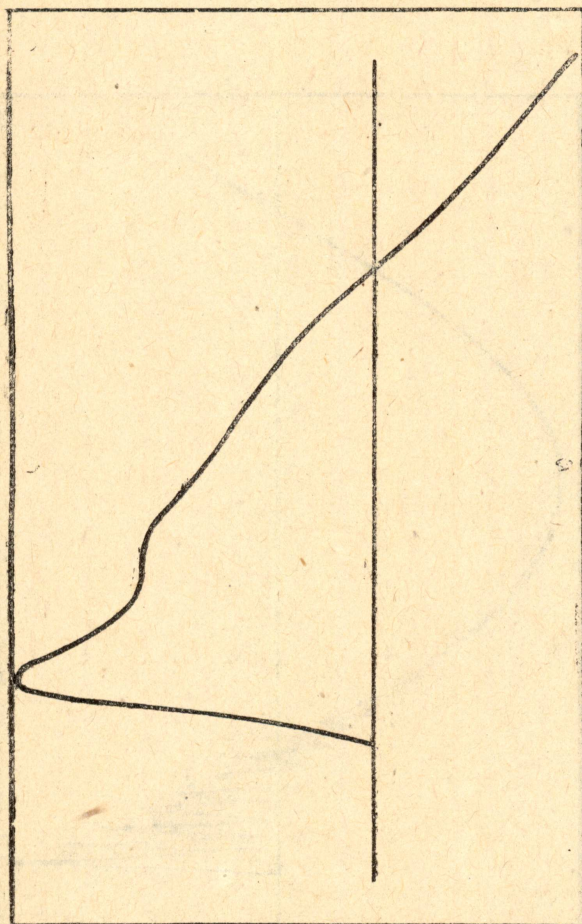
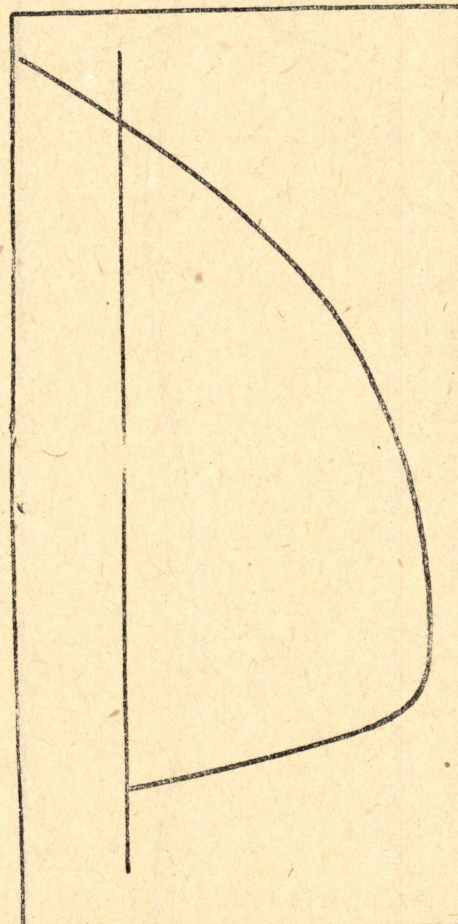
C = 134 мF
R₁ = 1 ΩC = 134 мF
R₁ = 2 Ω

рис. 13



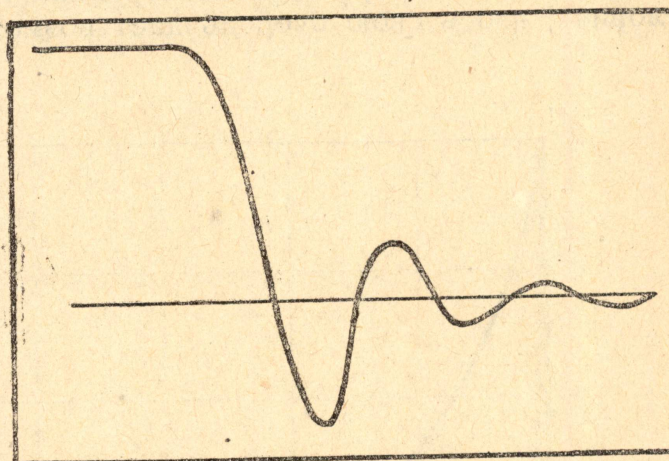
естественно, что процесс разряда будет длиться значительное время. Очевидно, что при разряде можно не опасаться повышения напряжения даже без защитного сопротивления, и разряд в основном нужен для быстрого святия напряжения конденсатора во избежание возможного случая прикасания к конденсатору рабочего. Длительность процесса разряда, очевидно,

можно уменьшить, приключив параллельно к нему добавочное омическое сопротивление. Это влияние добавочного сопротивления указано на рисунках 14—15, в первом случае при короткозамкнутом конденсаторе (рис. 14), во втором при $R_1 = 2$ ома.

Приключение индуктивного сопротивления тоже благотворно действует на процесс разряда конденсатора. На рисунке 16 изображены 2 кривые: первая для случая разряда через высокоомное сопротивление, и вторая кривая—разряд через дроссель. Как видно из сравнения, во втором случае затухание происходит очень быстро.

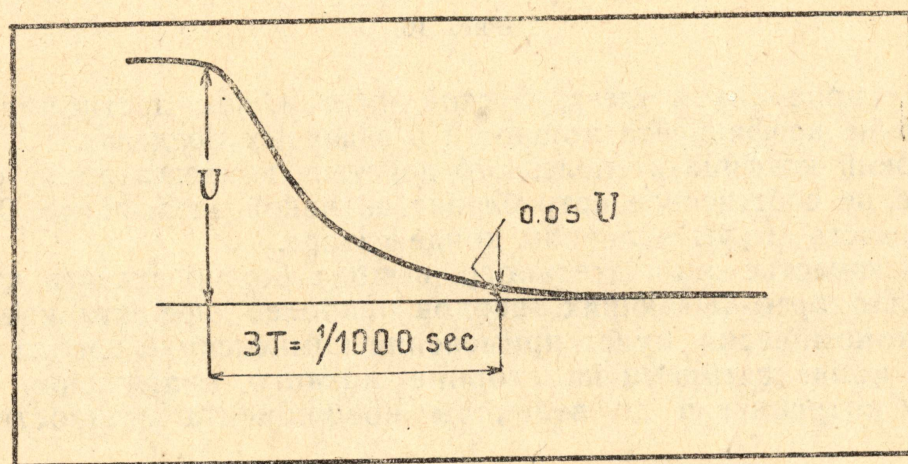
В качестве дросселя при индивидуальной компенсации может служить обмотка мотора, к которому приключен конденсатор.

Рассмотрение нестационарного режима работы конденсаторов приводит нас к выводу, что при соответствующих мероприятиях (защитное разряд-



$$C = 134 \mu F \quad R_1 = 1 \Omega$$

рис. 14



$$C = 134 \mu F \quad R_1 = 2 \Omega$$

рис. 15

ное сопротивление) эти режимы не будут влиять на нормальную эксплуатацию заводского электрохозяйства, поэтому и с этой точки зрения конденсаторы вполне применимы.

Из прочих достоинств статических конденсаторов, надо будет отметить следующее:

- 1) простота конструкции конденсаторов, требующая минимального обслуживания или вернее их периодического контроля;
- 2) дробимость статических конденсаторов, которые могут быть выполнены от нескольких десятых до сотен кВА в одной единице, что позво-

ляет их установку к каждому приемнику электрической энергии в соответствии с величиной компенсируемой реактивной мощности.

Дробимость и простота конструкции позволяет их установку в любых условиях, что в свою очередь дает возможность включения и выключения

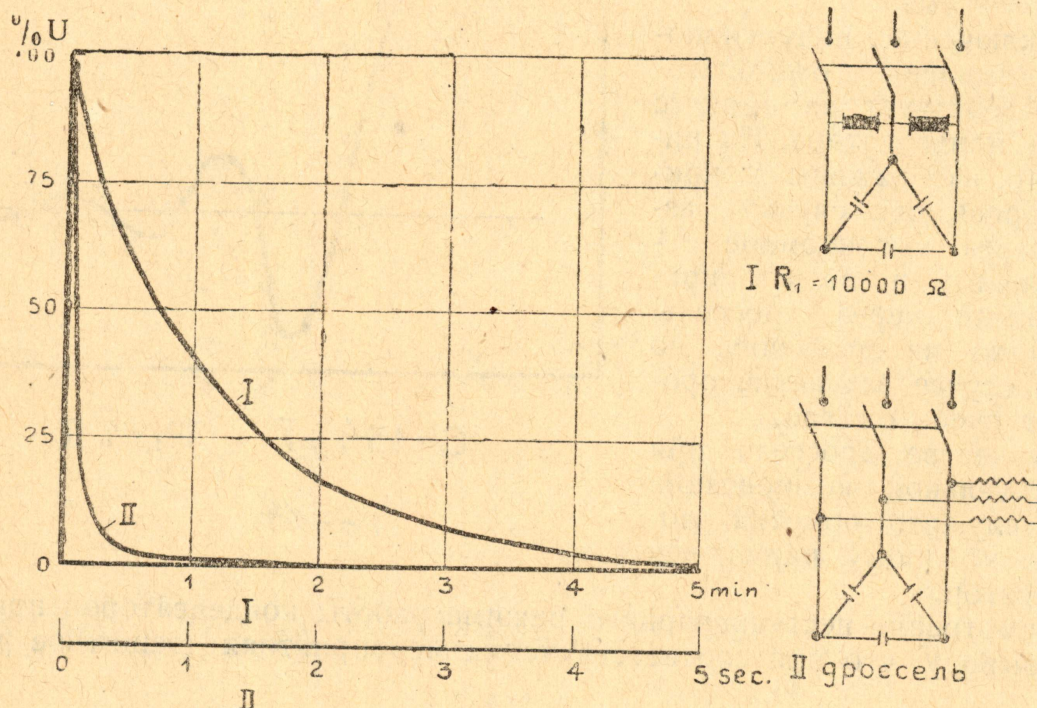


Рис. 16.

их вместе с приемником электрической энергии, чем достигается простое регулирование коэффициента мощности в заданных пределах.

3) Высокий коэффициент полезного действия конденсаторов, обуславливающий малое собственное потребление активной энергии ($\eta_k = 0,99 - 0,995$) и независимость его от величины конденсатора.

Итак, в качестве окончательного вывода можно сказать, что в условиях металлообрабатывающих заводов наиболее эффективным и технически и экономически будет применение компенсации сдвига фаз статическими конденсаторами на стороне низкого напряжения непосредственно у потребителя до величины коэффициента мощности равного единице.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.

- 1) Scharowsky. Der Leistungsfaktor. 1930. Berlin.
- 2) K. Baudisch u H. Kann. Die Kondensatoren in Industrieanlagen und Verteilungsnetzen (Simens-Zelfschriff. 1932, H. 10).
- 3) Max Hürbin. Statische Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktor in ihrer Rückwirkung auf das Netz. Schweiz. Elektrotechnischer Verein Bulletin, № 19, 1929.
- 4) Рис. 2 взят из технического отчета обследования металлзаводов г. Ленинграда бригадой ЛОВЭО под руководством проф. С. А. Ринкевича.