

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ (БЭМУ) ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Н. ПОДБОРСКИЙ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Современная полупроводниковая техника позволяет решать вопросы, связанные с разработкой бесколлекторных электромашинных усилителей. Нами разработаны и исследуются модели БЭМУ постоянного тока. Такой усилитель состоит из двух синхронных генераторов с различными числами пар полюсов, совмещенных в одном магнитопроводе. Первый генератор питает обмотку возбуждения второго генератора.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая работу усилителей.

Номинальные данные моделей такие:

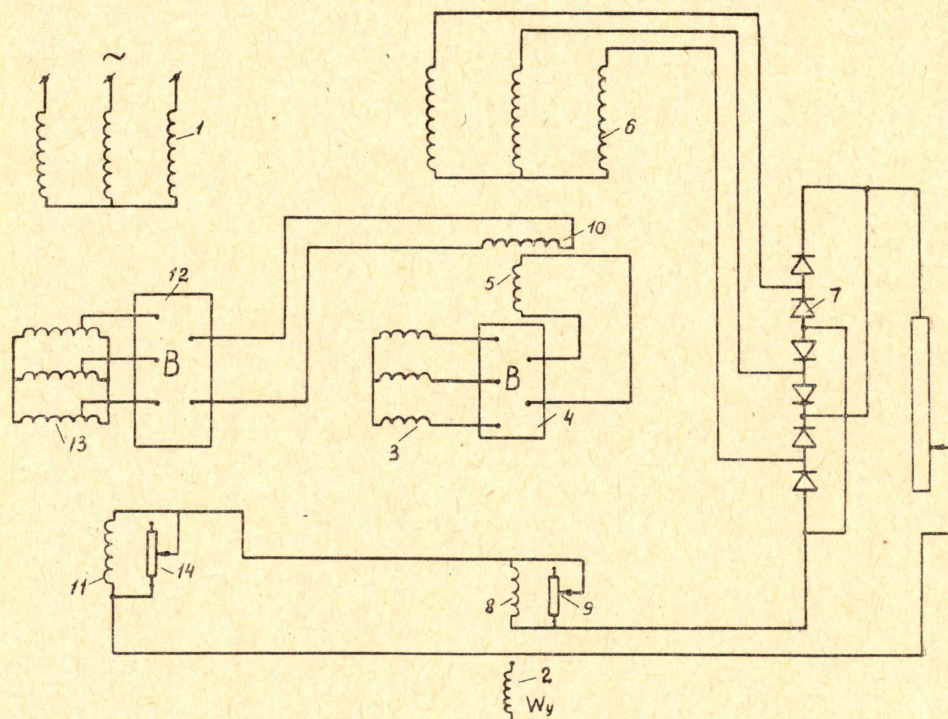


Рис. 1.

- |                              |                         |                           |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1. $P_H = 3 \text{ кВт}$ ,   | $U_H = 230 \text{ в}$ , | $n = 3000 \text{ об/мин}$ |
| 2. $P_H = 1,2 \text{ кВт}$ , | $U_H = 115 \text{ в}$ , | $n = 3000 \text{ об/мин}$ |

Отличие этих моделей состоит в том, что у одного из усилителей на роторе выходная обмотка первого каскада выполнена трехфазной, а у другого — восьмифазной.

Числа пазов роторов позволяли выполнить первую модель с числами фаз  $m = 3, 6, 12$  и вторую модель — с  $m = 2, 4, 8, 16$ .

Выбрав у второй модели  $m=8$ , мы имели возможность исследовать работу и при  $m=4$ , отключив половину фаз.

Выпрямители роторов собраны по однополупериодной схеме, так как она требует минимальное число вентиляей, что важно при небольших габаритах ротора.

В изготовленных моделях проводится теоретическое и экспериментальное исследование основных характеристик: внешних, регулировочных, коэффициента усиления, быстродействия. Анализируются кривые тока, э.д.с. и пульсаций выходного напряжения.

При линейной обратной связи по току внешние характеристики для обоих усилителей представлены на рис. 2а, б. Нелинейность характеристик объясняется тем, что поперечная составляющая н.с. реакции якоря совершенно не компенсируется, хотя она составит свыше 90% от результирующей н.с.

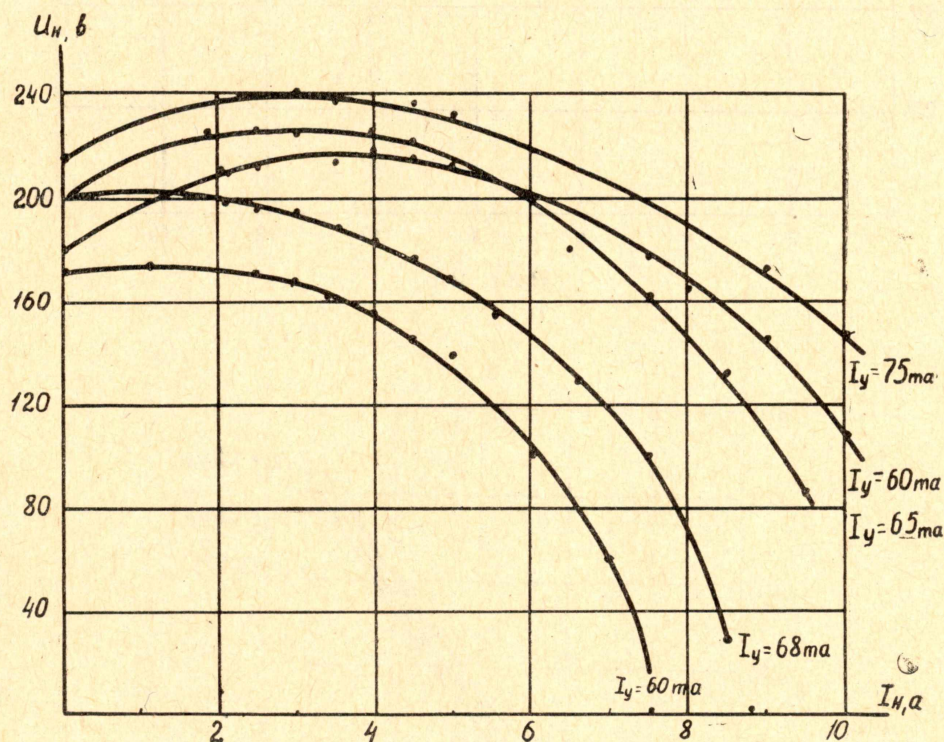


Рис. 2 а.

Внешним характеристикам (рис. 2а) соответствуют регулировочные (рис. 3а), которые имеют такой же вид, как регулировочные характеристики синхронных генераторов.

Рассматриваемым условиям соответствуют осциллограммы фазных токов и напряжений. Как видно из осциллограмм фазных напряжений обоих усилителей, представленных на рис. 4 а, б, поперечная реакция якоря размагничивает набегающий и намагничивает сбегающий край полюса, что сильно искажает кривую фазного напряжения.

Для компенсации поперечной н.с. реакции якоря в обеих моделях были уложены компенсационные обмотки, сдвинутые на 90 электрических градусов относительно обмоток возбуждения второго каскада. Ток нагрузки, протекая по этой обмотке, компенсирует поперечную составляющую н.с. реакции якоря. Степень поперечной компенсации настраивается сопротивлением, шунтирующим компенсационную обмотку.

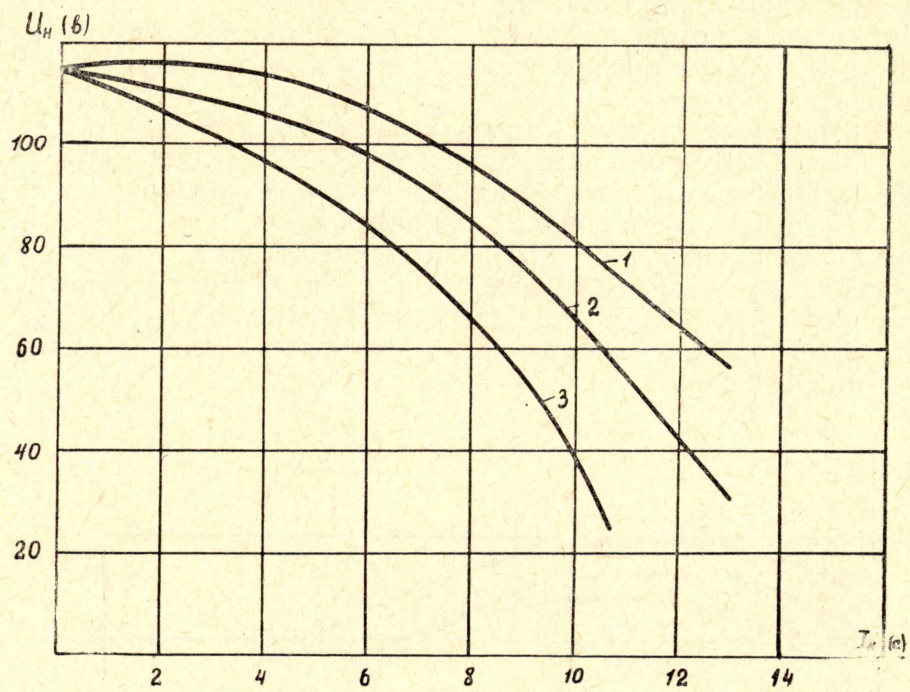


Рис. 2 б.

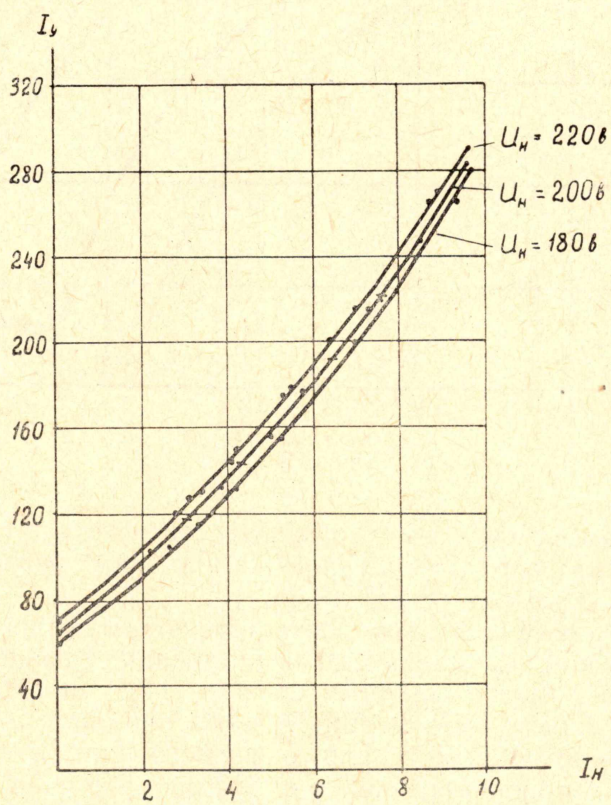


Рис. 3 а.

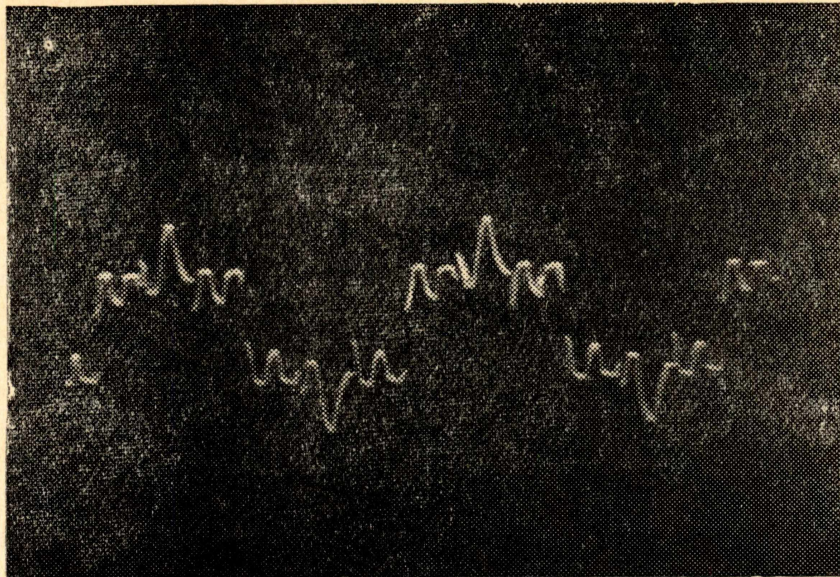


Рис. 4 а.

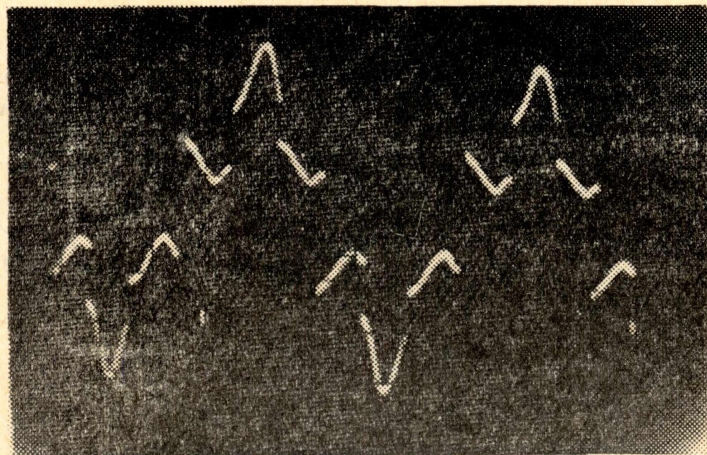


Рис. 4 б.

Если считать, что параметры усилителя постоянны, а ток, напряжение и э.д.с. изменяются во времени по синусоидальному закону, то напряжение на выходе усилителя в общем случае будет равно:

$$U_H = \frac{1}{K_U} \left[ \sqrt{\left( E_{SO} + R_{ad} \frac{W_{ocd}}{W_y} K_{ocd} I_H \right)^2 + (R_{aq} K_{ocq} I_H)^2 - \right. \\ \left. - K_I^2 I_H^2 (X_{cx} \cos \varphi - r_s \sin \varphi)^2 - K_I X_{cx} I_H \sin \varphi - K_I I_H r_s \cos \varphi \right], \quad (1)$$

где

$K_U = \frac{U_S}{U_H}$  — отношение действующего значения фазного напряжения к выпрямляемому;

$K_I = \frac{I_S}{I_H}$  — отношение действующего значения фазного тока к выпрямляемому;

$E_{so}$  — э.д.с. фазы при холостом ходе;

$R_{ad} = \frac{E_{so}}{I_y}$  — сопротивление намагничивания по продольной оси;

$I_{ocd} = K_{ocd}$  — ток в обмотке обратной связи по продольной оси;

$R_{aq}$  — сопротивление намагничивания по поперечной оси;

$K_{ocq} \cdot I_H$  — ток в обмотке компенсации по поперечной оси;

$X_{cx}$  — синхронное индуктивное сопротивление выходной обмотки;

$W_{ocd}$  — число витков в обмотке обратной связи по продольной оси;

— число витков в обмотке управления;

$r_s$  — активное сопротивление выходной обмотки;

$\cos \varphi$  — коэффициент мощности.

При полной поперечной компенсации

$$R_{aq} K_{ocq} = K_I (X_{cx} \cos \varphi - r_s \sin \varphi).$$

В этом случае уравнение внешней характеристики значительно упрощается и принимает вид:

$$U_H = \frac{1}{K_U} \left[ \left( E_{so} + R_{ad} \frac{W_{ocd}}{W_y} K_{ocd} I_H \right) - K_I X_{cx} I_H \sin \varphi - K_I r_s I_H \cos \varphi \right]. \quad (2)$$

Следует заметить, что при изменении нагрузки изменяется индуктивность выходной обмотки и взаимная индуктивность выходной обмотки и обмотки возбуждения. Но учитывая, что отношение этих индуктивностей практически не зависит от тока нагрузки, уравнение внешней характеристики бесколлекторного ЭМУ при полной поперечной компенсации и ненасыщенном первом каскаде примет вид:

$$U_H = \frac{1}{K_U} (E_{so} + K_{ocd} R_{ad} I_H) \frac{X_{cx}}{X_{cx0}} - \frac{K_I}{K_U} X_{cx} \sin \varphi I_H - \frac{K_I}{K_U} r_s I_H \cos \varphi.$$

В этом уравнении угол

$$\varphi = \frac{\gamma}{2} + \alpha,$$

где  $\gamma$  — угол коммутации,

$\alpha$  — угол зажигания.

Углы  $\gamma$  и  $\alpha$  можно рассчитать по формулам [1].

$X_{cx0}$  — ненасыщенное синхронное индуктивное сопротивление выходного каскада.

На рис. 5 сплошными линиями представлены внешние характеристики, полученные экспериментально для второй модели, и для сравнения показаны пунктирными линиями характеристики, рассчитанные по уравнению (3). Обращает внимание прямолинейность характеристик, обусловленная достаточной степенью компенсации поперечной составляющей н. с. реакции якоря, и удовлетворительная сходимость опытных данных и расчетов.

Таким характеристикам соответствуют осциллограммы фазных э.д.с. (рис. 6). Как видно из осциллограммы фазного напряжения, искажающее действие поперечной н.с. реакции якоря значительно меньше, чем это имело место без поперечной компенсации. Прямолинейность внешних характеристик и минимальный уровень пульсаций выходного напряжения является важным достоинством режима работы с полной поперечной компенсацией.

На рис. 7 а, б представлены осциллограммы выходного напряжения для одинаковых значений токов и напряжений нагрузки, полученных

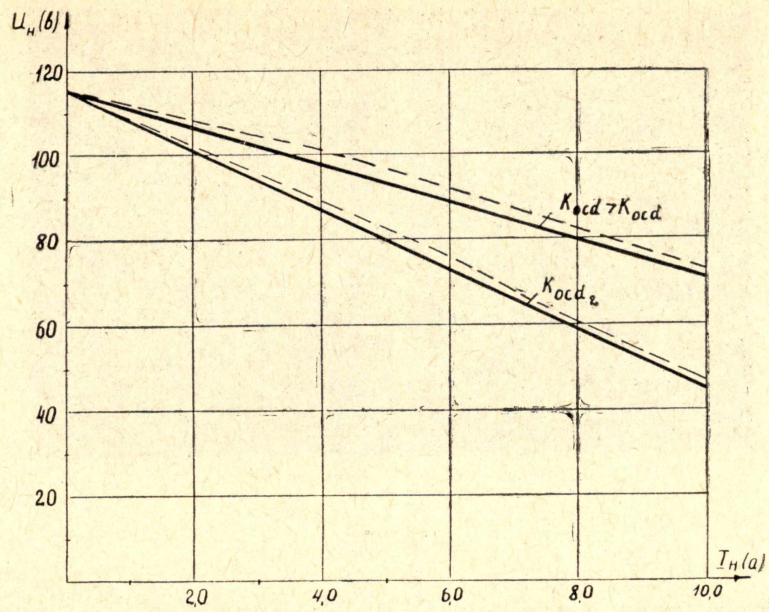


Рис. 5.

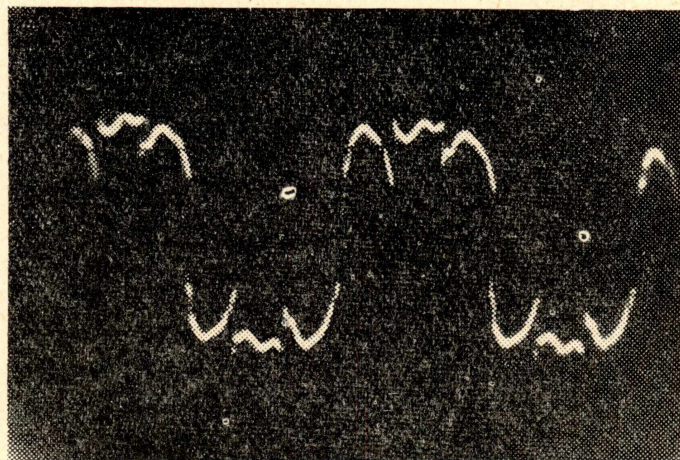


Рис. 6.

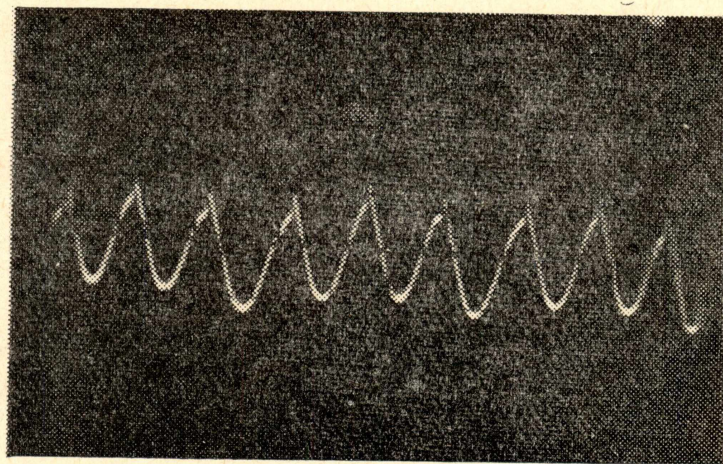


Рис. 7 а.

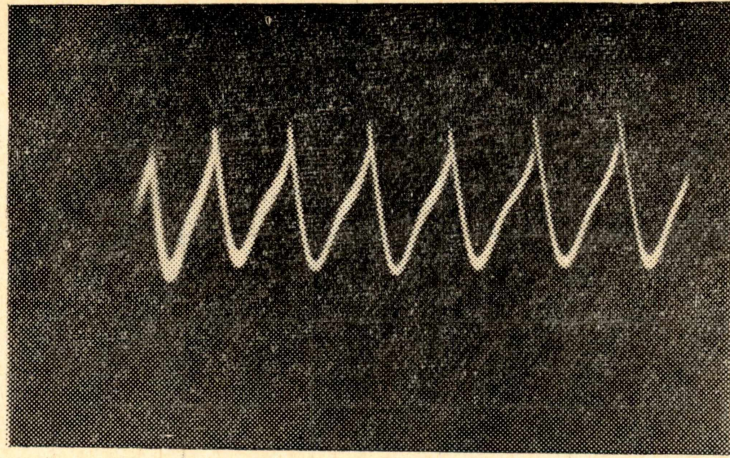


Рис. 7 б.

при полной поперечной компенсации и без поперечной компенсации для второй модели. Уровень пульсаций напряжения, как видно из этих осциллограмм, значительно ниже при полной поперечной компенсации.

Как было установлено из опыта, внешние характеристики прямолинейны только до определенного значения тока нагрузки. С дальнейшим возрастанием нагрузки начинается насыщение первого и дополнительного каскадов усилителя. Это ведет к тому, что рост токов в обмотках возбуждения и поперечной компенсации замедляется, реакция якоря по продольной и поперечной осям оказывается недокомпенсированной и линейность внешних характеристик нарушается. Напряжение на выходе при этом начинает снижаться более резко.

Коэффициент усиления является одним из важнейших показателей усилителя и оценивается соотношением мощностей выхода и входа

$$K_y = \frac{\left( E_{so} + R_{\alpha d} \frac{W_{ocd}}{W_y} K_{ocd} I_H \right) \frac{X_{cx}}{X_{cx0}} I_H - K_I X_{cx} \sin \varphi I_H^2 - K_I r_s \cos \varphi I_H^2}{K_U \cdot U_y \cdot I_y} \quad (4)$$

На рис. 8 представлены зависимости коэффициента усиления от тока нагрузки при различных коэффициентах обратной связи по продольной оси, из которых видно, что при полной поперечной компенсации коэффициент усиления линейно зависит от тока нагрузки. Для первой модели экспериментально полученный максимальный коэффициент усиления равен 500, для второй — 80. При оптимизации моделей коэффициенты усиления могут быть увеличены.

Быстродействие бесколлекторного ЭМУ определяет работоспособность его в динамических режимах. На рис. 9 а, б, в приведены соответственно осциллограммы нарастания тока управления, тока возбуждения второго каскада и выходного напряжения для второй модели.

Быстродействие бесколлекторного ЭМУ приблизительно такое же, как и коллекторного ( $T = 0,07$ ).

Недостатком исследуемых усилителей является отсутствие реверса полярности выходного напряжения при изменении полярности сигнала управления. Устранение его входит в дальнейшую часть работы.

В целом разрабатываемые нами БЭМУ постоянного тока по своим свойствам соответствуют предъявляемым к ним требованиям и могут быть применены в различных отраслях народного хозяйства.

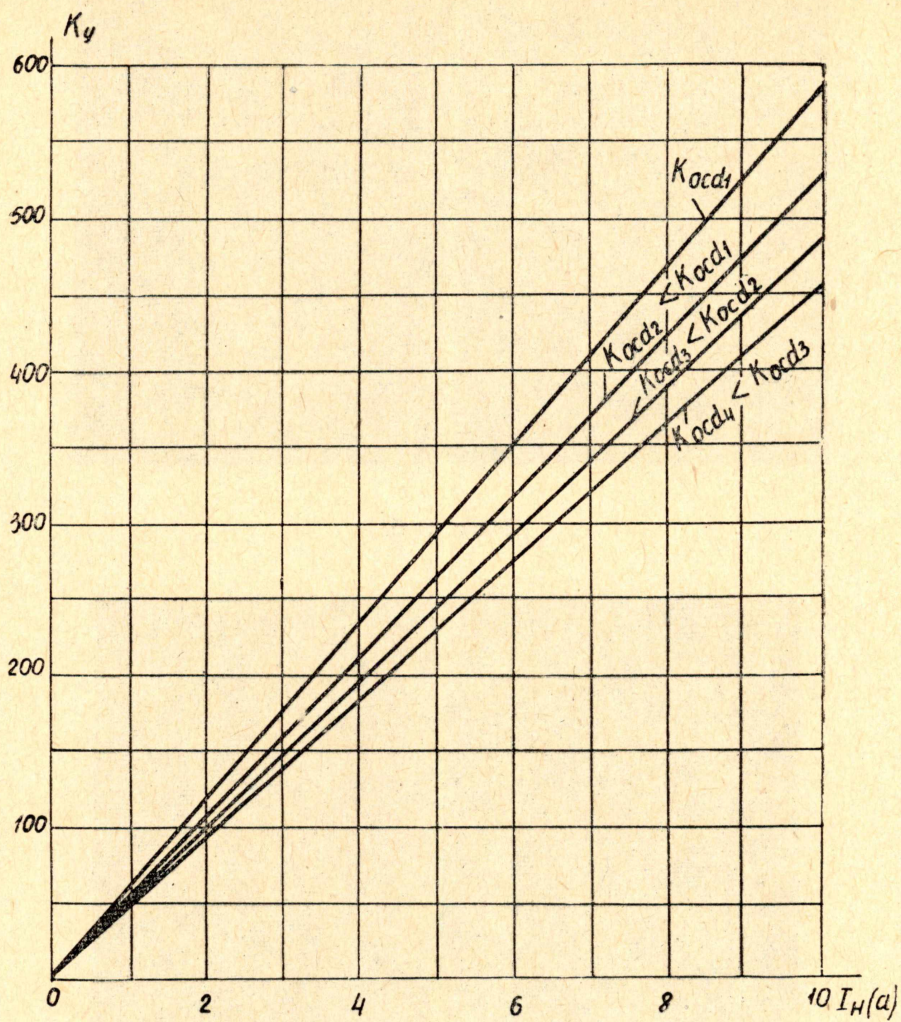


Рис. 8.

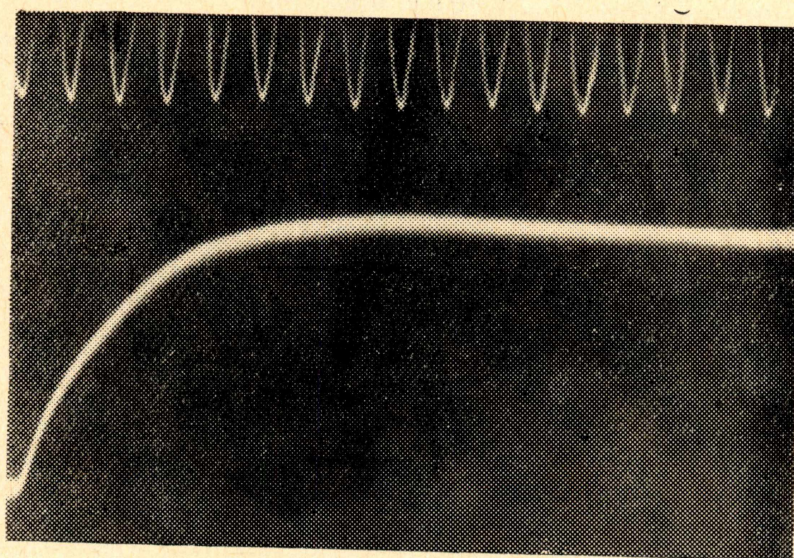


Рис. 9 а.



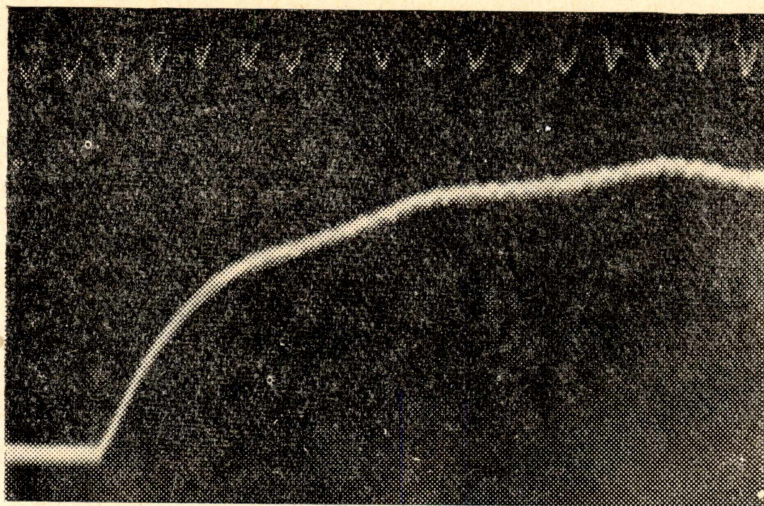


Рис. 9 б.

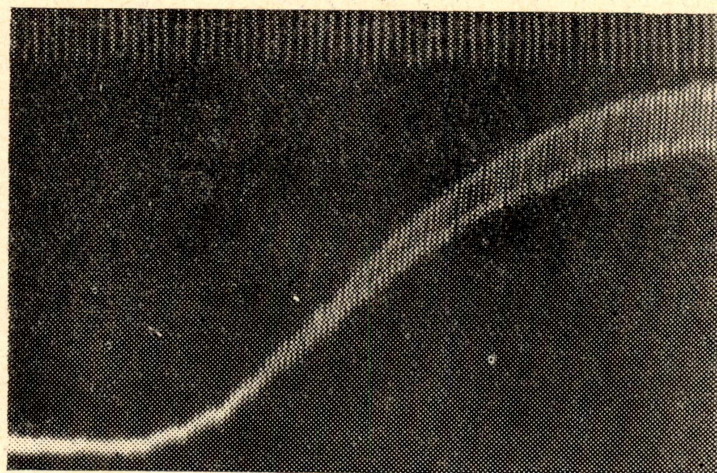


Рис. 9 в.

