

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ВОЗБУДИТЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ — ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

С. С. КРОПАНИН

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Исследование переходных процессов в машинах постоянного тока с учетом нелинейностей имеет важное практическое значение. Учет нелинейных параметров машин позволяет вскрыть существенно новые свойства и явления, которые часто не могут быть обнаружены, если эти параметры рассматривать как линейные. Часто решение нелинейных задач связано со значительными трудностями математического характера. Для ряда случаев нет единых методов аналитического выражения законов изменения отдельных нелинейных параметров.

В практике применяются методы аналитической аппроксимации, поскольку они дают достаточную точность при выражении самой аппроксимируемой величины и достаточную точность и простоту выражения производных, относительно простой пригодный для исследования вид решения [1].

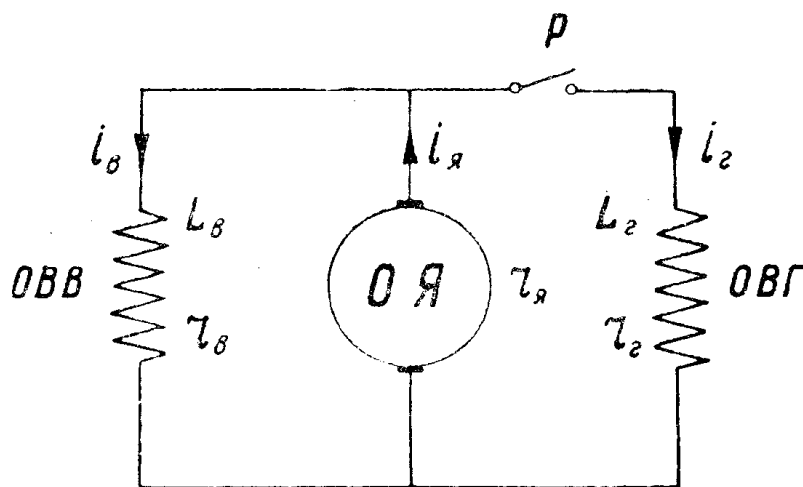
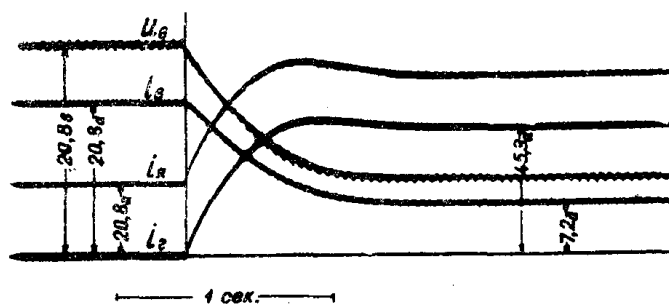


Рис. 1.

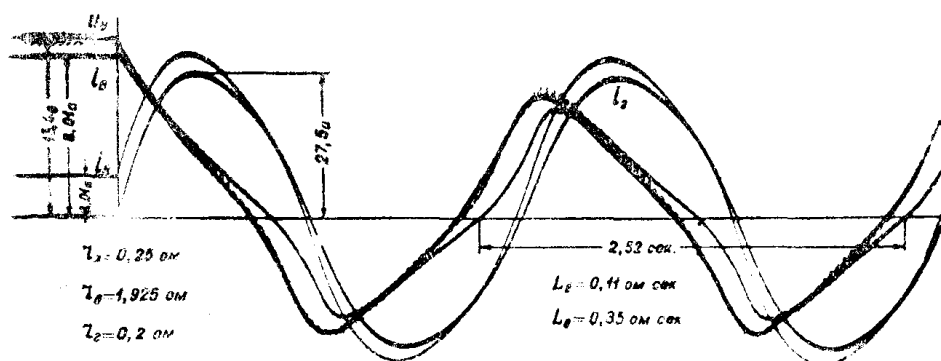
Для системы, схема которой изображена на рис. 1, после замыкания рубильника P (при некотором соотношении параметров) возможны следующие виды движения, изображенные на рис. 2 [2, 3, 4]: а) установление нового равновесного состояния, б) незатухающие периодические колебания, в) аperiodические затухающие колебания.

Ввиду сложности явлений, происходящих в рассматриваемой системе, и влияния большого числа факторов на характер переходных режимов необходимо сделать следующий ряд допущений, который бы позволил произвести исследования работы системы достаточно простым и пригодным для практики методом с достаточной для целей практики точностью [5].

1. Считаем, что число оборотов якоря возбудителя постоянно.
2. В расчетах не учитываем реакции якоря возбудителя.
3. Не учитываем явления гистерезиса.
4. Пренебрегаем влиянием вихревых токов в массивных частях электрических машин.
5. Пренебрегаем взаимоиנדукцией между обмотками якоря и возбуждения возбудителя.



$$\begin{aligned} r_g &= 0,25 \text{ ом} & L_e &= 0,11 \text{ ом сек.} \\ r_a &= 1,0 \text{ ом} & L_g &= 0,35 \text{ ом сек.} \\ r_e &= 0,2 \text{ ом} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} r_e &= 0,25 \text{ ом} & L_e &= 0,11 \text{ ом сек.} \\ r_g &= 1,925 \text{ ом} & L_g &= 0,35 \text{ ом сек.} \\ r_a &= 0,2 \text{ ом} \end{aligned}$$

Рис. 2 а, б.

6. Пренебрегаем индуктивностью обмотки якоря $L_{я}$ возбудителя.
7. Принимаем постоянными индуктивности обмотки возбуждения возбудителя L_e и обмотки возбуждения генератора L_g .
8. Принимаем постоянным сопротивление обмотки якоря возбудителя.
9. Принимаем за существенно нелинейную функцию $e_b(i_b)$.

Необходимо отметить, что сделанные допущения повлияют на точность результата, однако допущения эти являются вынужденными, поскольку мы ставим своей целью исследовать переходные режимы достаточно простыми для практики методами, позволяющими с наименьшей затратой труда и времени получить удовлетворительные результаты.

Указанное выше выражение $e_g(i_g)$ представляет собой нелинейную функцию от тока возбуждения возбудителя i_g и может быть изображено в виде характеристики холостого хода. Как известно, в ли-

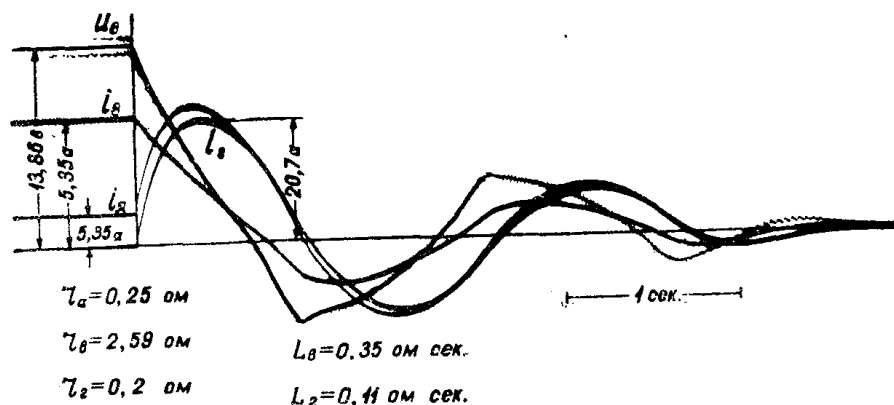


Рис. 2 в.

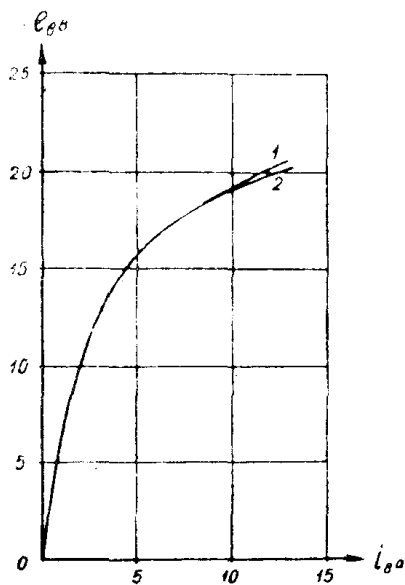
тературе [1, 6] имеется большое количество методов аппроксимации кривой намагничивания электрических машин. Из всех известных нам формул, дающих аналитическое выражение кривой намагничивания, мы выбрали формулу

$$e_g(i_g) = A e_{BH} \operatorname{arctg} B i_g, \quad (1)$$

дающую наилучшее приближение как кривой намагничивания, так и ее производной по току возбуждения [6]. В формуле (1) e_{BH} — номинальное значение э. д. с. холостого хода возбудителя, A и B — постоянные коэффициенты, определяемые видом опытной характеристики холостого хода.

На рис. 3 представлены опытная (кривая 1) и рассчитанная по уравнению (1) характеристика холостого хода возбудителя (кривая 2). Сравнение действительной и рассчитанной характеристик дает хорошее совпадение. Наибольшая ошибка составляет 2,5%. Использование средней статической характеристики холостого хода возбудителя при расчете переходных режимов внесет неточность в полученные результаты, но с этим приходится мириться, так как учет гистерезиса и динамической характеристики холостого хода представляет значительные трудности.

Напишем уравнения, характеризующие переходные процессы в рассматриваемой системе с учетом принятых выше допущений, и выражения э. д. с. холостого хода возбудителя согласно формуле (1) после замыкания рубильника P



$$\begin{aligned} e_{BH} &= 12a & A &= 1,2 & P &= 1 & C &= 7880 \\ i_{BH} &= 2,85 & B &= 0,386 & W_n &= 245 & B_n &= 1,1 \end{aligned}$$

Рис. 3.

$$Ae_{вн} \operatorname{arc} \operatorname{tg} Bi_6 = i_6 r_6 + i_я r_я + L_6 \frac{di_6}{dt}, \quad (2)$$

$$Ae_{вн} \operatorname{arc} \operatorname{tg} Bi_6 = i_2 r_2 + i_я r_я + L_2 \frac{di_2}{dt}, \quad (3)$$

$$i_я = i_6 + i_2, \quad (4)$$

где r_6 — сопротивление обмотки возбуждения возбудителя,
 r_2 — сопротивление обмотки возбуждения генератора,
 $i_я$ — ток в обмотке якоря возбудителя,
 i_2 — ток в обмотке возбуждения генератора.

Подставляя значения тока якоря возбудителя $i_я$ из уравнения (4) в уравнение (2), выражаем ток возбуждения генератора

$$i_2 = \frac{Ae_{вн} \operatorname{arc} \operatorname{tg} Bi_6 - i_6(r_6 + r_я) - L_6 \frac{di_6}{dt}}{r_я}. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по времени, будем иметь

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\left[\frac{ABe_{вн}}{1+B^2 i_6^2} - (r_6 + r_я) \right] \frac{di_6}{dt} - L_6 \frac{d^2 i_6}{dt^2}}{r_я}. \quad (6)$$

Подставляя (4), (5), (6) в (3) и разрешая относительно тока возбуждения возбудителя, получим уравнение движения в системе

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_6}{dt^2} + \left[\frac{r_6 + r_я}{L_6} + \frac{r_2 + r_я}{L_2} - \frac{ABe_{вн}}{L_6(1+B^2 i_6^2)} \right] \frac{di_6}{dt} + \\ + \frac{(r_6 r_я + r_2 r_я + r_6 r_2) i_6 - r_2 Ae_{вн} \operatorname{arc} \operatorname{tg} Bi_6}{L_6 L_2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, аналитическое решение которого представляет значительную трудность.

Для решения уравнения (7) необходимо выбрать такой метод, который был бы единым для всех возможных видов движения в системе (рис. 2), обладал бы достаточной точностью, наглядностью, позволял бы оценить качественную картину движения без аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения. Всем указанным выше требованиям отвечает графоаналитический метод изоклин, дающий решение на фазовой плоскости с последующим графическим построением переходных режимов в осях координат ток—время [7, 8]. Следует отметить, что:

1. Для решения необходимо знать численное значение всех параметров системы.

2. Непосредственно по фазовому портрету можно судить только о величине амплитуды искомого переменного. Время переходного процесса можно определить только после дополнительных построений в осях координат ток—время.

Обозначим в уравнении (7)

$$\frac{di_6}{dt} = Y \quad \text{и} \quad \frac{dY}{di_6} = \Theta, \quad (8)$$

где $\Theta = \operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона касательной к интегральной кривой, проведенной в точке пересечения искомой интегральной кривой с изоклиной.

Подставляя (8) в (7) и разрешая последнее относительно U , получим уравнение изоклин

$$U = - \frac{Ae_{вн} \operatorname{arc} \operatorname{tg} Bi_b - (r_b r_{я} + r_2 r_{я} + r_b r_2) i_b}{L_b L_2 \left[\frac{r_b + r_{я}}{L_b} + \frac{r_2 + r_{я}}{L_2} - \frac{ABe_{вн}}{L_b (1 + B^2 i_b^2)} + \Theta \right]} \quad (9)$$

Задавая различные значения Θ от $+\infty$ до 0 и до $-\infty$ и изменяя значения тока возбуждения возбудителя в реальных пределах, строим семейство изоклин на фазовой плоскости производная—ток, а по изложенному в [7, 8] способу строим интегральную кривую. Начальными условиями для построения интегральной кривой являются:

$$t = 0; \quad \frac{di_b}{dt} = 0; \quad i_b = i_{бнач.},$$

где $i_{бнач.}$ — начальное значение тока возбуждения возбудителя до замыкания рубильника.

После построения интегральной кривой, пользуясь методом, изложенным в [7, 8], строим переходный процесс в осях координат ток—время.

Произведем указанные выше расчеты для конкретной системы.

а) Переход от одного установившегося равновесного состояния к другому после замыкания рубильника P .

Задавая соответствующими параметрами системы (рис. 2а), строим изоклины и интегральную кривую на рис. 4а. Пользуясь указанным в [7, 8], методом, на рис. 5а строим переходные процессы для тока возбуждения возбудителя в осях координат ток—время.

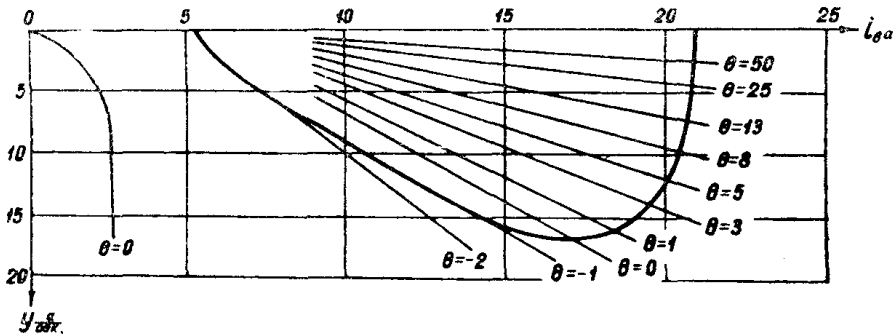


Рис. 4 а.

б) Незатухающие периодические колебания.

Увеличивая активное сопротивление цепи обмотки возбуждения возбудителя и оставляя остальные параметры системы прежними, получим режим незатухающих периодических колебаний. Принятые для этого случая параметры системы указаны на рис. 2б. Пользуясь указанной выше методикой на рис. 4б строим семейство изоклин, по которым ведем построение интегральной кривой переходного процесса для тока возбуждения возбудителя. На рис. 5б строим переходные процессы в осях координат ток—время.

в) Аперiodические затухающие колебания

При дальнейшем увеличении активного сопротивления цепи обмотки возбуждения возбудителя мы можем получить режим аперiodи-

ческих затухающих колебаний. Если исследование рассмотренных выше переходных режимов для целей практики представляет значительный интерес (поскольку двигатели, работающие в этих режимах, могут быть использованы для приведения в действие рабочих органов соответствующих механизмов), то использование электрического двигателя, работающего в режиме апериодических затухающих колебаний,

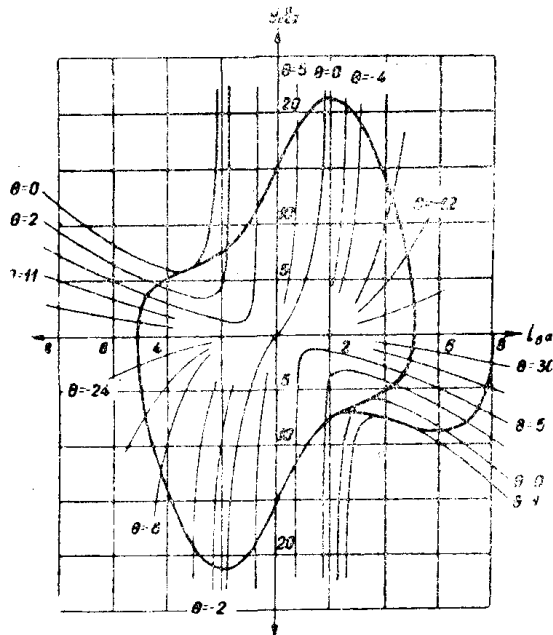


Рис. 4 б.

вряд ли целесообразно. Мы опустим изложение методики построения переходных процессов для этого случая (θ), ибо она имеет некоторую особенность.

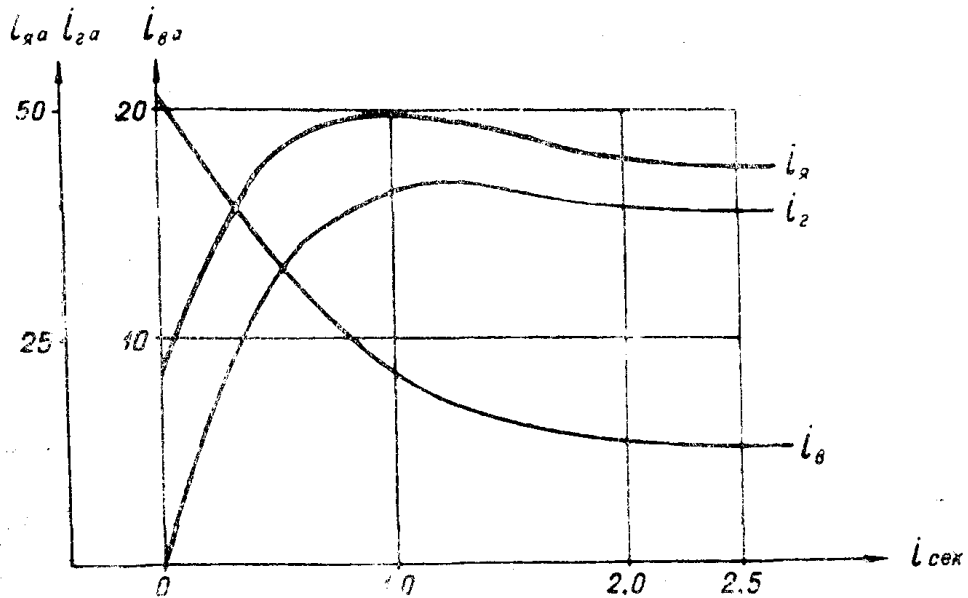


Рис. 5 а.

В лаборатории кафедры электрификации промышленных предприятий Томского политехнического института им. С. М. Кирова нами

испытывается рассматриваемая система применительно к главному приводу продольно-строгального станка [3, 9].

Построение переходных режимов для тока возбуждения генератора, тока якоря возбудителя и напряжения возбудителя можно производить изложенным выше методом. Однако используя известные уже зависимости $\frac{di_B}{dt}(i_B)$ и $i_B(t)$ (рис. 4, 5) и уравнение (5), можно с меньшей затратой труда построить переходные режимы для тока возбуждения генератора. Используя уравнение (4) и полученные нами графики $i_B(t)$ и $i_2(t)$, можно простым геометрическим суммированием построить график переходного режима для тока якоря возбудителя. Все расчеты проведены на рис. 5б.

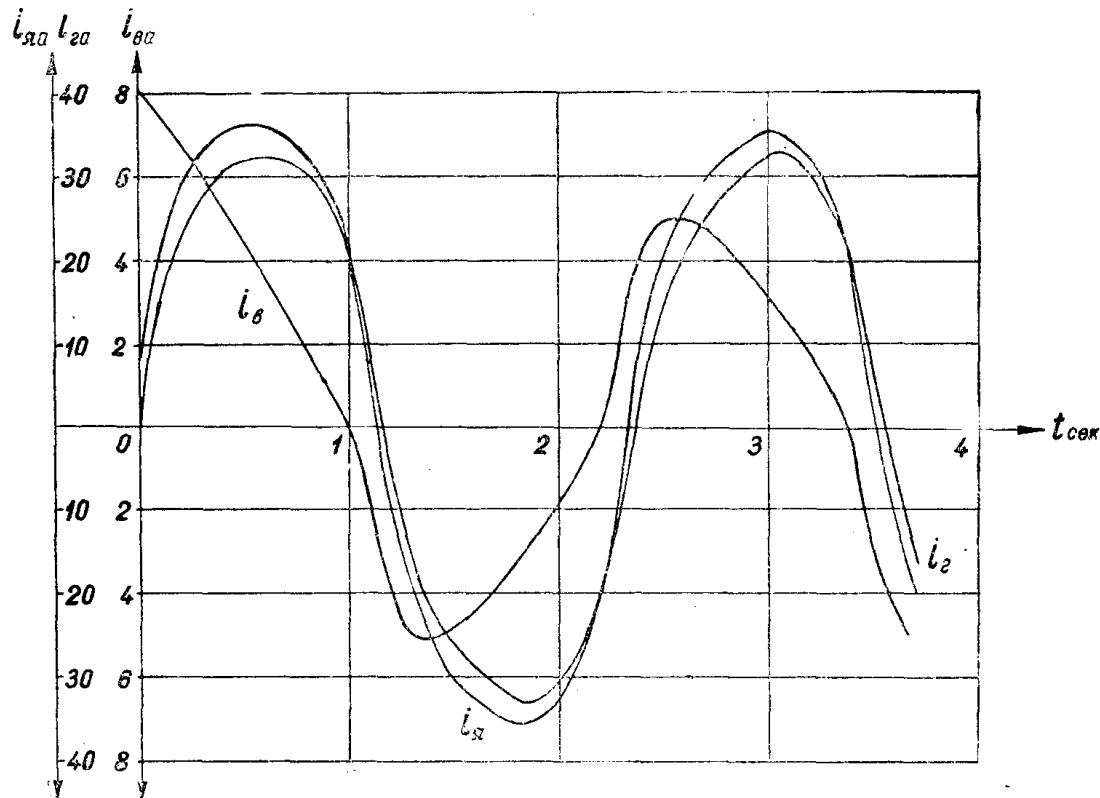


Рис. 5 б.

Сравнение действительных и рассчитанных нами кривых переходных процессов по рис. 2б и рис. 5б позволяет положительно оценить использованный нами метод, поскольку полученные результаты удовлетворительно отражают как качественную, так и количественную картину переходных режимов. Для тока возбуждения возбудителя ошибка по амплитуде составляет 4,3%, по периоду 5,4%. Для тока возбуждения генератора соответственно 21,8 и 5,4%. Для тока якоря 16,0 и 5,4%.

Практический интерес рассматриваемых вопросов состоит в том, что излагаемая методика позволяет достаточно просто и с достаточной для практики точностью рассчитывать переходные процессы в электрических машинах только с учетом основной нелинейности $e_B(i_B)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдбаум А. А. Введение в теорию нелинейных цепей, ГЭИ, 1948.
2. Шулейкин М. В. Об электрических колебаниях, „Журнал русского физико-химического общества“, том XII, физический отдел, выпуск I, 1910.

3. Г о в о р к о в В. А. Работы академика М. В. Шулейкина по электрическим машинам, „Электричество“, № 5, 1952.
 4. Г а н д ж а Л. И. и К р о п а н и н С. С. О колебаниях в возбудителе системы „генератор—двигатель“, „Известия Томского политехнического института им. С. М. Кирова“, том 82, 1956.
 5. Е р м о л и н Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. ГЭИ, 1951.
 6. А р х а н г е л ь с к и й Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин, „Электричество“, № 3, 1950.
 7. А н д р о н о в А. А. и Х а й к и н С. Э. Теория колебаний, ОНТИ, ч. I, 1937.
 8. Под общей редакцией Поливанова К. М. Физические основы электротехники. ГЭИ, 1950.
 9. К р о п а н и н С. С. Авторское свидетельство на изобретение „Электропривод“ № 91805, 1951.
-