ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА
Том 97 1959 г.

ФИЗИКА КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ВОЗБУДИТЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ—ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

С. С. КРОПАНИН

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В системе, схема которой изображена на рис. 1, при некотором соотношении параметров возможно возникновение незатухающих периодических колебаний тока возбуждения возбудителя $i_в$, тока возбуждения генератора $i_г$, тока якоря возбудителя $i_я$. Объяснение физической сущности незатухающих колебаний дано в [1, 2, 3, 4] недостаточно полно. В [1, 2] система рассматривалась как линейная, в [3] объяснение дано без достаточных обоснований. Упомянутые выше работы не вскрывают физики протекающих процессов и не дают ответа на ряд вопросов, возникающих при изучении работы системы, особенно с учетом основных нелинейностей.

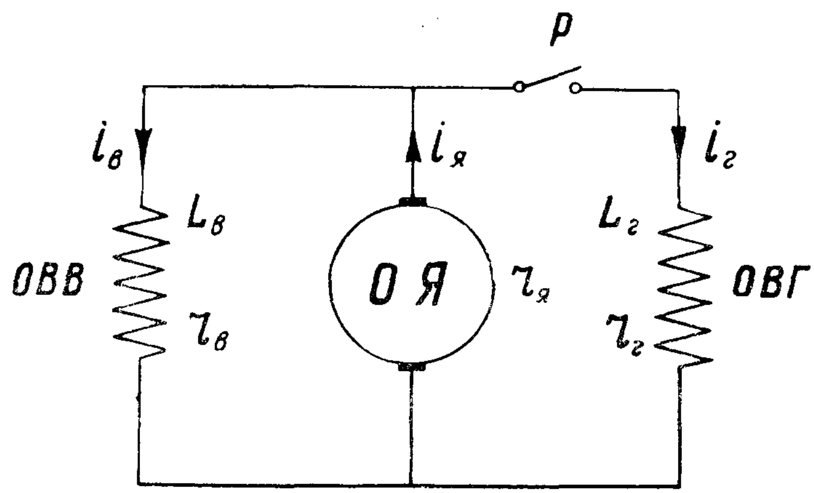


Рис. 1.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в системе после замыкания рубильника P (рис. 1). Все рассуждения проводим с учетом следующих допущений, обоснованных в [4, 5, 6].

1. Принимаем число оборотов якоря возбудителя постоянным.
2. Принимаем коэффициенты рассеяния полюсов обмотки возбуждения возбудителя $\sigma_в$ и генератора ($\sigma_г$) постоянными.

3. Не учитываем реакции якоря возбудителя.

4. Не учитываем явлений гистерезиса.

5. Пренебрегаем взаимоиндукцией между обмотками якоря и возбуждения.

6. Пренебрегаем влиянием вихревых токов в массивных частях электрических машин системы.

7. Пренебрегаем величиной индуктивности обмотки якоря $L_я$.

8. Принимаем за существенно нелинейную функцию э. д. с. возбудителя $e_в(i_в)$.

9. Принимаем индуктивности обмоток возбуждения возбудителя $L_в$ и генератора $L_г$, сопротивление якорной цепи возбудителя $r_я$ постоянными.

К моменту замыкания рубильника P возбудитель возбужден (работает на холостом ходу), что характеризуется точками a на характеристике холостого хода (кривая 1) и $б$ на внешней характеристике возбудителя (кривая 3) на рис. 2. Координаты точки a определяются

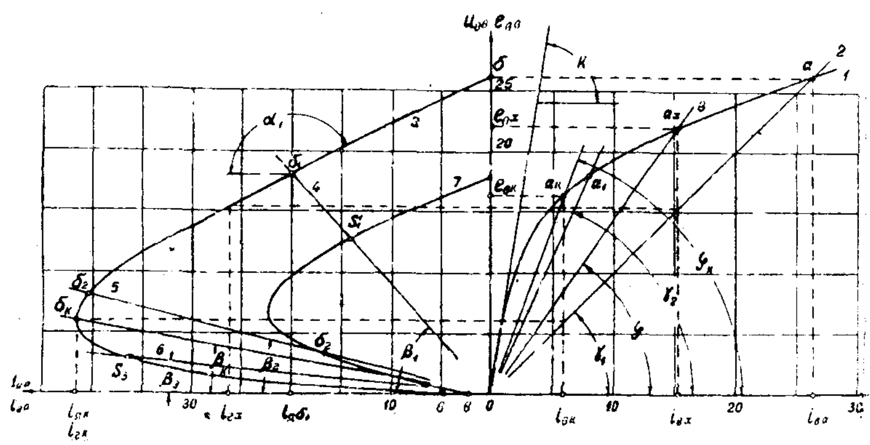


Рис. 2.

пересечением характеристики холостого хода и характеристики $i_в\, r_в$ (характеристика 2), где $r_в = \frac{e_{ва}}{i_{ва}} = \operatorname{tg}\gamma_1$—общее сопротивление обмотки возбуждения возбудителя. Координаты точки $б$ определяются э. д. с. холостого хода возбудителя при токе якоря, равном нулю. После замыкания рубильника ток якоря возбудителя $i_я$ будет увеличиваться, а ток возбуждения $i_в$, э. д. с. $e_в$, напряжение $U_в$—будут уменьшаться. Направление изменения показано на рис. 2 стрелками. Как известно, ток в якоре возбудителя равен

$$i_я = i_в + i_г. \tag{1}$$

Для упрощения рассуждений мы в (1) пренебрежем $i_в$, поскольку ток $i_в$ составляет 2—3 процента от тока якоря $i_я$ [5]. Учитывая принятые нами допущения, построим на рис. 2 внешнюю характеристику возбудителя (кривая 3) и характеристики нагрузки $i_я r_г = i_г r_г$ для различных величин сопротивлений цепи обмотки возбуждения генератора (кривые (4, 5, 6) для сопротивлений $r_{г1} > r_{г2} > r_{г3}$. Очевидно, что тангенс угла наклона (β) характеристики нагрузки $i_г r_г$ к оси абсцисс определится величиной сопротивления нагрузки $r_г$ как:

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \frac{U_{вб2}}{i_{яб2}} = \frac{U_{вб2}}{i_{гб2}} = r_{г2}, \tag{2}$$

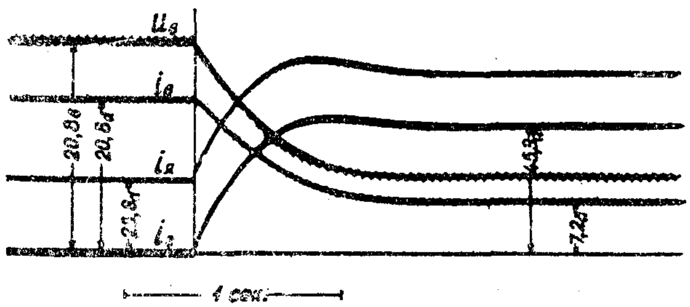
Если при данном сопротивлении нагрузки $r_г$ угол наклона характеристики $i_г r_г$ (β) будет таким, что точка пересечения внешней характеристики и характеристики нагрузки находится на участке $б—б_к$ (кривая 3), то возбудитель будет устойчиво работать с данной нагрузкой (например, точки $б_1$ при $r_{г1}$ или $б_2$ при $r_{г2}$ на рис. 2). Статическая устойчивость системы, работающей на участке $б—б_к$, может быть доказана методом, который применяется в теории привода [7]. Действительно, если провести касательные к внешней характеристике и характеристике нагрузки $i_г r_г$ из точки их пересечения (например, точка равновесного состояния $б_1$ на рис. 2) до оси абсцисс, то условие статической устойчивости может быть записано как

$$\mathrm{tg}\beta_1 > \mathrm{tg}\alpha_1, \tag{3}$$

где α_1—угол между касательной, проведенной к внешней характеристике, и осью абсцисс;

β_1—угол между характеристикой нагрузки $i_г r_г$ и осью абсцисс (рис. 2).

Как видно из рисунка, это условие будет соблюдаться на участке $б—б_к$ внешней характеристики. В качестве примера приводится осциллограмма на рис. 3*а*, где показан переходный процесс от холостого хода до нового устойчивого состояния под нагрузкой при $r_{г2} > r_{гк}$ ($\beta_к$). При уменьшении сопротивления нагрузки точка пересечения внешней



τя = 0,25 ом   Lг = 0,11 ом сек.

τв = 1,0 ом   Lя = 0,35 ом сек.

τг = 0,2 ом

Рис. 3 *а*.

характеристики и характеристики нагрузки (6) находится на участке $б_к—в$. Точка $б_3$ будет точкой неустойчивого равновесия, что легко видно из соотношения (3). Точка $б_к$ на внешней характеристике возбудителя определяет наибольшее „критическое" значение тока якоря $i_{як}$ и, если пренебречь (по малости) величиной тока возбуждения возбудителя—наибольшее значение тока нагрузки $i_{гк}$. Увеличим теперь сопротивление обмотки возбуждения возбудителя до величины $r_{в2} > r_{в1}$ ($\gamma_2 > \gamma_1$). Работа возбудителя на холостом ходу будет характеризоваться точками $а'$ и $б'$. Точка $б'$ будет принадлежать новой внешней характеристике 7. После замыкания рубильника при том же сопротивлении нагрузки $r_{г1}$ (β_1) точка $б'_1$ будет по-прежнему характеризовать статическую устойчивость системы. При уменьшении сопротивления нагрузки до величины $r_{г2} < r_{г1}$ ($\beta_2 < \beta_1$) точка $б'_2$ будет уже характеризовать неустойчивое состояние системы, тогда как при $r_{в1} < r_{в2}$ данная нагрузка $r_{г2}$ характеризовала устойчивую работу возбудителя.

Из сказанного выше следует, что состояние системы определяется соотношением сопротивлений $r_г$ и $r_в$. Приведенные на рис. 3*а* и 3*б* осциллограммы подтверждают правильность сделанных выводов.

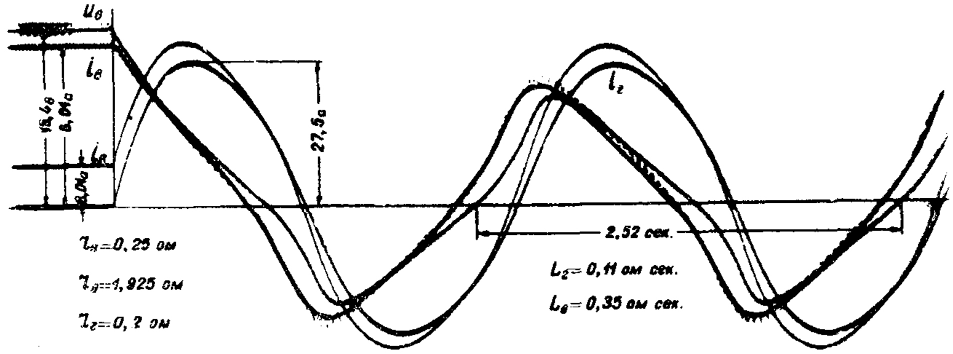


Рис. 3 *б*.

Опишем уравнениями равновесное состояние системы под нагрузкой для точки a_x:

$$e_в(i_{вх}) = i_{вх}(r_в + r_я) + i_{гх} r_я, \tag{4}$$

$$e_в(i_{вх}) = i_{гх}(r_г + r_я) + i_{вх} r_я. \tag{5}$$

Решая совместно уравнения (4) и (5), получим:

$$e_в(i_{вх}) = i_{вх} \frac{r_в r_я + r_г r_я + r_в r_г}{r_г} = i_{вх} R_э \tag{6}$$

или

$$\frac{e_в(i_{вх})}{i_{вх}} = R_э \tag{7}$$

где

$R_э = \frac{r_в r_я + r_г r_я + r_в r_г}{r_г}$ — эквивалентное сопротивление системы. Проведем характеристику $i_в R_э$ из начала координат в точку a_x, расположенную на характеристике холостого хода (характеристика 8 на рис. 2). Обозначим угол наклона этой характеристики к оси абсцисс через φ. Координаты точки a_x определяются э. д. с. возбудителя $e_{вх}$ и током возбуждения $i_{вх}$ при данном токе нагрузки $i_{гх}$. После произведенных построений и анализа уравнения (7) мы видим, что левая часть уравнения представляет собой $\operatorname{tg}\varphi$, а правая часть — эквивалентное сопротивление системы $R_э$, тогда уравнение (7) мы можем переписать как

$$\operatorname{tg}\varphi = R_э. \tag{8}$$

Как нами было доказано ранее, точка $б_к$ на внешней характеристике определяет наибольшее значение тока нагрузки $i_{гк}$, то есть наименьшее сопротивление нагрузки $r_{гк}$, при котором еще возможна устойчивая работа системы. Путем графических построений определим значение э. д. с. $e_{вк}$ и тока возбуждения $i_{вк}$ при наибольшем возможном значении тока нагрузки $i_{гк}$ (точка $a_к$ на рис. 2). Проведем из начала координат характеристику $i_{вк} R_{эк}$ (9) в точку $a_к$. Угол, образованный этим лучом и осью абсцисс, обозначим через $\varphi_к$. Согласно уравнению (8) мы можем написать

$$\operatorname{tg}\varphi_к = R_{эк}. \tag{9}$$

На основании принятых выше условий можно сказать, что угол $\varphi_к$ является наибольшим из всех возможных значений, при котором еще возможна устойчивая работа системы под нагрузкой. Если при данных выбранных нами сопротивлениях $r_в$, $r_г$, $r_я$ $R_э$ будет больше $\operatorname{tg}\varphi_к$, то система становится статически неустойчивой и в ней возможно (как будет доказано ниже) возникновение незатухающих периодических колебаний. Сказанное выше можно записать в виде условия

$$R_э > \operatorname{tg}\varphi_к. \tag{10}$$

Условие (10) является необходимым, но не единственным.

Допустим, что при некотором соотношении параметров системы соблюдается условие (10). После замыкания рубильника P по мере увеличения тока нагрузки уменьшается э. д. с. возбудителя. При малом токе возбуждения, с достаточной для практики точностью, характеристику $e_в(i_в)$ можно считать линейной, тогда

$$e_в(i_в) = K i_в, \tag{11}$$

где K — параметр возбудителя, определяемый обмоточными данными скоростью вращения якоря и сопротивлением магнитной цепи (рис. 2) [8]

Уравнения движения в системе для общего случая переходных режимов будут иметь вид

$$e_в(i_в) = i_я r_я + i_в r_в + L_в \frac{di_в}{dt}, \tag{12}$$

$$e_в(i_в) = i_я r_я + i_г r_г + L_г \frac{di_г}{dt}. \tag{13}$$

Подставляя (11) в (12) и (13) и разрешая полученные уравнения совместно с уравнением (1) относительно тока возбуждения возбудителя, будем иметь:

$$L_в L_г \frac{d^2 i_в}{dt^2} + \left[L_г(r_я + r_в - K) + L_в(r_я + r_г)\right] \frac{di_в}{dt} +$$

$$+ \left[(r_я + r_г)(r_я + r_в - K) + r_я(K - r_я)\right] i_в = 0. \tag{14}$$

Поделив обе части уравнения (14) на выражение $(r_я + r_г)\,[K - (r_я + r_в)]$, получим уравнение движения в системе

$$T_в T_г \frac{d^2 i_в}{dt^2} + \left(T_в - T_г\right) \frac{di_в}{dt} + \left\{\frac{r_я(K - r_я)}{(r_я + r_г)\,[K - (r_я + r_в)]} - 1\right\} i_в = 0, \tag{15}$$

где $T_в = \dfrac{L_в}{K - (r_я + r_в)}$ — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя,

$T_г = \dfrac{L_г}{r_я + r_г}$ — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения генератора.

Уравнение (15) представляет собой линейное дифференциальное уравнение движения в системе. Уравнению (15) соответствуют корни характеристического уравнения

$$P_{1,2} = -\frac{T_в - T_г}{2T_в T_г} \pm$$

$$\pm\sqrt{\left(\frac{T_в - T_г}{2\,T_в T_г}\right)^2 - \left\{\frac{r_я(K - r_я)}{(r_я + r_г)\,[K - (r_я + r_в)]\,T_в T_г} - \frac{1}{T_в T_г}\right\}}. \quad (16)$$

В зависимости от вида корней характеристического уравнения будет определяться характер движения в системе. Если считать, что корни характеристического уравнения P_1 и P_2 вещественные и положительные, то, как известно, линейная система является неустойчивой [9]. Для рассматриваемого случая решение уравнения движения примет вид

$$i_в = C_1 e^{P_1 t} + C_2 e^{P_2 t}, \quad (17)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями.

По данным опыта (параметры указаны на рис. 3*б*) имеем:

$$R_э = 5{,}33\,ом; \quad \operatorname{tg}\varphi_к = 4{,}07\,ом; \quad T_в = 0{,}1272\,сек.$$

$$T_г = 0{,}2445\,сек; \quad P_1 = 3{,}675\,\frac{1}{сек}; \quad P_2 = 0{,}095\,\frac{1}{сек}.$$

Для определения постоянных интегрирования C_1 и C_2 накладываем условия:

$$t = 0; \; i_в = i_{в\,нач.} = 1\,a; \qquad \frac{di_{в\,нач.}}{dt} = -7{,}32\,\frac{a}{сек}.$$

Продифференцировав по времени t уравнение (17) и наложив принятые нами начальные условия, определяем постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{P_2\,i_{в\,нач.} - \dfrac{di_{в\,нач.}}{dt}}{P_2 - P_1}; \qquad C_2 = \frac{\dfrac{di_{в\,нач.}}{dt} - P_1\,i_{в\,нач.}}{P_2 - P_1}; \quad (18)$$

$$C_1 = -2{,}07a; \qquad C_2 = 3{,}07a.$$

Подставляя полученные результаты в уравнение (17), будем иметь:

$$i_в = -2{,}07e^{3{,}675t} + 3{,}07e^{0{,}095t}. \quad (19)$$

Обозначив первую составляющую тока возбуждения через $i_в'$, вторую составляющую через $i_в''$ и задаваясь временем t от нуля и до 0,15 *сек*, вычисляем координаты точек, по которым строим соответствующие характеристики $i_в'(t)$, $i_в''(t)$, $i_в(t)$ на рис. 4. Как видно, ток возбуждения возбудителя $i_в$ изменил свое направление, что означает возможность перемагничивания возбудителя. Если рассматривать участок внешней характеристики вблизи точки короткого замыкания (точка *в*, рис. 2), то для уравнений (12) и (13) знаки у производных $\frac{di_в}{dt}$ и $\frac{di_г}{dt}$ становятся отрицательными (рис. 3*б*). Решая совместно эти уравнения, с учетом знаков у производных относительно тока возбуждения возбудителя, будем иметь

$$i_{\text{в}} = \frac{\left(L_{\text{в}} \left| \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right| + i_г r_г \right) - L_г \left| \frac{di_г}{dt} \right|}{r_{\text{в}}}. \tag{20}$$

Анализ числителя уравнения (20) позволяет сказать, что если в переходных режимах вычитаемое $\left| L_г \frac{di_г}{dt} \right|$ по своему абсолютному значению станет больше уменьшаемого $\left| \left(L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + i_г r_г \right) \right|$, то направление тока в обмотке возбуждения может измениться. Запишем сказанное в виде неравенства

$$\left| L_г \frac{di_г}{dt} \right| > \left| \left(L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + i_г r_г \right) \right| \tag{21}$$

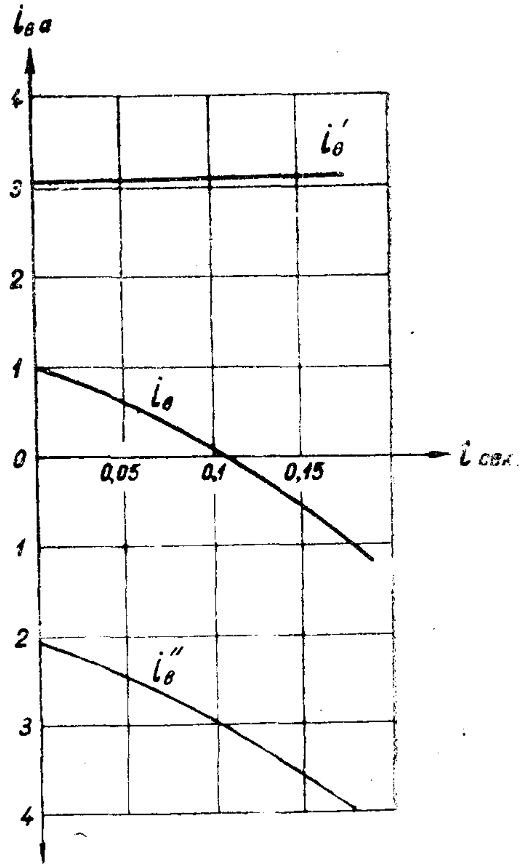


Рис. 4.

Левая часть неравенства (21) представляет собой э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения генератора, правая—сумму э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения возбудителя и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки возбуждения генератора. Помножив обе части неравенства (21) на произведение $i_г\,dt$, получим

$$\left| L_г i_г di_г \right| > \left| \left(L_{\text{в}} i_{\text{в}} di_{\text{в}} \right) \frac{i_г}{i_{\text{в}}} + i^2_г r_г dt \right|. \tag{22}$$

Неравенство (22) представляет собой неравенство изменения энергии в контуре: обмотка возбуждения генератора—обмотка возбуждения возбудителя. Анализируя неравенство (22), мы можем сказать, что ток в обмотке возбуждения возбудителя может изменить свое направление, если изменение электромагнитной энергии обмотки возбуждения генератора будет больше суммы изменения энергии обмотки возбуждения возбудителя и энергии, теряющейся в активном сопротивлении обмотки возбуждения генератора. Поскольку направление тока в обмотке возбуждения возбудителя может измениться, возможно перемагничивание возбудителя. Выясним, при каких условиях возможно перемагничивание возбудителя. На рис. 5 изображена часть характеристики холостого хода возбудителя с учетом гистерезиса, которым мы в данном случае пренебречь не можем. Здесь же изображена характеристика $i_{\text{в}} r_{\text{в}}$. Как мы выяснили выше, ток возбуждения может изменить направление. Если ток обратного направления по своему абсолютному значению станет больше некоторого значения тока $|i_{\text{вс}}|$ (тока самовозбуждения), то произойдет перемагничивание возбудителя, поскольку точка a_c является точкой неустойчивого равновесия [8]. Сказанное выше можно записать в виде неравенства

$$|i_в| > |i_{вс}|. \qquad (23)$$

Такой режим самовозбуждения, когда требуется определенный конечной величины толчок, для того чтобы система самовозбудилась, носит название режима жесткого самовозбуждения. После самовозбуж-

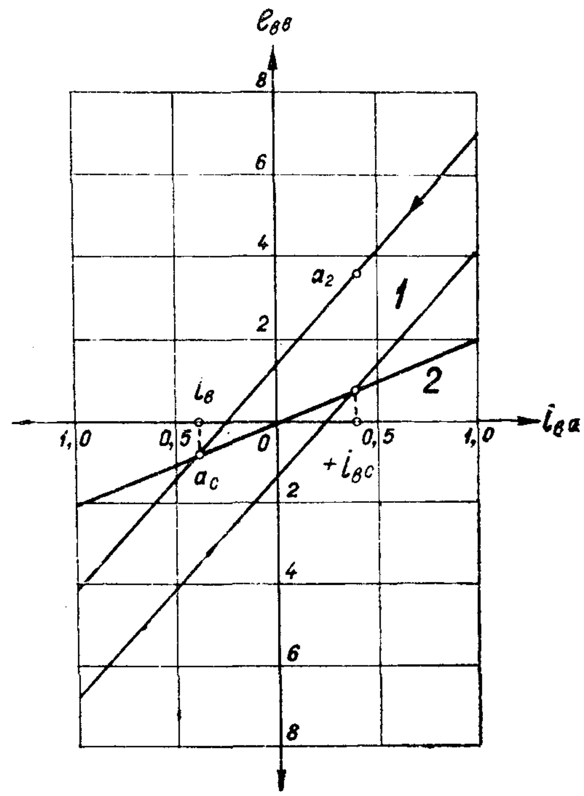


Рис. 5.

дения в обратном направлении весь процесс будет повторяться. В системе возникают периодические незатухающие колебания (рис. 3б)

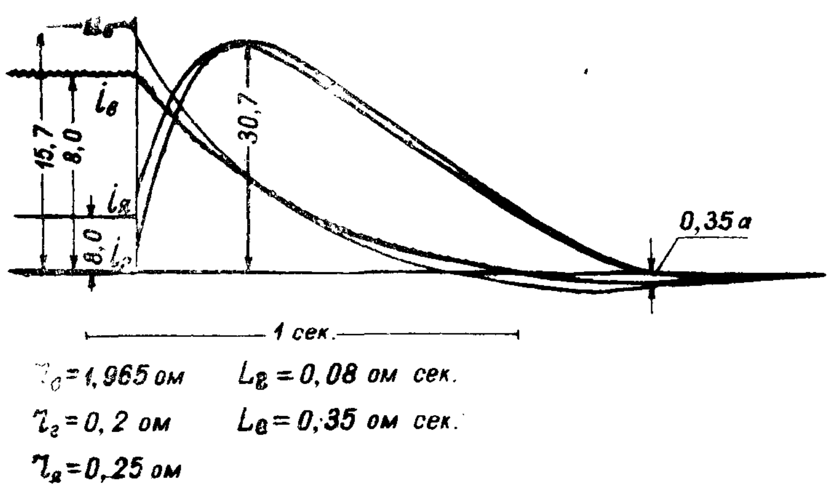


Рис. 6.

На рис. 6 приведена осциллограмма переходного режима для случая, когда выполнялись условия (10, 11, 22), но не выполнялось условие (23), то есть $|i_в|$ был меньше $|i_{вс}|$. Несмотря на то, что направление тока изменилось, перемагничивания возбудителя не произошло. По данным осциллограммы рис. 6 имеем

$$i_в = 0{,}35\ a; \qquad R_э = 4{,}67\ ом.$$

По данным рис. 2 имеем: $\operatorname{tg} \varphi_к = 3{,}88$ *ом.*, а по рис. 5 $i_{вс} = 0{,}38$ *а*. Из сказанного следует, что необходимыми условиями для перемагничивания возбудителя являются условия (10, 22, 23).

Рассмотрим происходящие в системе явления с энергетической точки зрения. После несложных преобразований в уравнениях (1, 12, 13) получим уравнение баланса мощности для системы

$$e_в(i_в)\, i_я - (r_в i_в^2 + r_г i_г^2 + r_я i_я^2) - L_в i_в \frac{di_в}{dt} - L_г i_г \frac{di_г}{dt} = 0. \qquad (24)$$

Каждый член уравнения (24) представляет собой соответственно: первый — мощность источника ($P_и$), второй (сумма, стоящая в скобках) — мощность потерь в активных сопротивлениях системы ($P_п$), третий — мощность магнитного поля обмотки возбуждения возбудителя ($P_{мв}$) и четвертый — мощность магнитного поля обмотки возбуждения генератора ($P_{мг}$). Пользуясь осциллограммой переходного режима (рис. 3б), можно построить составляющие мощности в осях координат мощность — время. График $P\ (t)$ построен на рис. 7. Очевидно, что площадь, ограниченная соответствующей кривой $P\ (t)$ и осью абсцисс, представляет собой соответствующие энергии. Как видно из графика рис. 7, за время

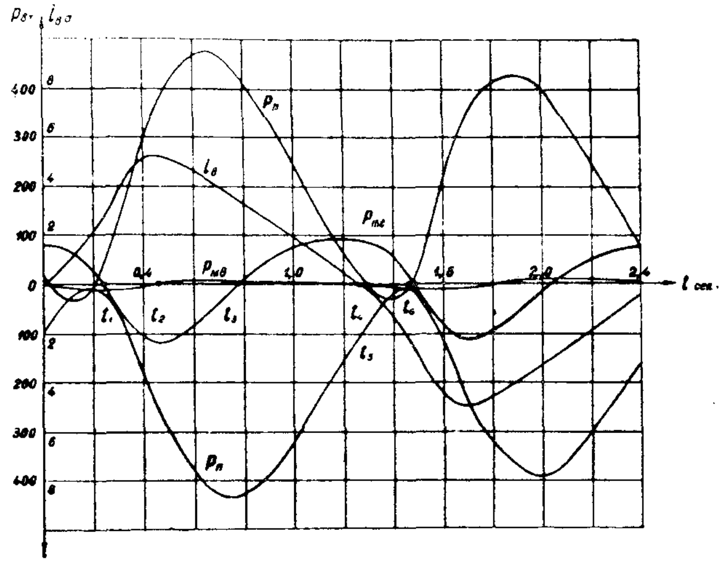


Рис. 7.

от t_1 до t_2 энергия источника расходуется на покрытие потерь в системе. За это же время в обмотках возбуждения генератора и возбудителя запасается некоторое количество магнитной энергии. За время от t_2 до t_3 обмотка возбуждения возбудителя отдает запасенную в ней энергию в систему. За время от t_3 до t_4 обмотка возбуждения генератора так же становится источником энергии для системы. За время от t_5 до t_6 единственным источником энергии в системе становится обмотка возбуждения генератора. Энергия этой обмотки расходуется на покрытие потерь в активных сопротивлениях системы, частично отдается обратно источнику и создает запас энергии в обмотке возбуждения возбудителя. Заметим, что при отдаче энергии обмоткой возбуждения генератора происходит перемагничивание возбудителя.

Выведенное нами уравнение движения в системе (15) справедливо только для линейной части характеристики намагничивания возбудителя. Для того, чтобы охватить полностью весь процесс, необходимо учесть всю характеристику намагничивания. Для вывода общего уравнения движения в системе аппроксимируем входящую в уравнения (12) и (13) нелинейную характеристику намагничивания возбудителя $e_в\ (i_в)$ как

$$e_в\,(i_в) = Ae_{вн}\,\mathrm{arc\,ctg}\,Bi_в, \tag{25}$$

где $e_{вн}$—номинальное значение э. д. с. холостого хода возбудителя, равное в нашем случае 12 вольтам,

A и B—коэффициенты, определяемые видом опытной характеристики намагничивания возбудителя, и равные в нашем случае $A=1{,}2$; $B=0{,}386\ \frac{1}{a}$. Обоснование принятой аппроксимации приводится в [10].

Подставляя принятую аппроксимацию в (12) и (13) и решая полученные уравнения совместно с уравнением (1) относительно тока возбуждения возбудителя, получим нелинейное дифференциальное уравнение движения в системе

$$\frac{d^2i_в}{dt^2}+\left[\frac{r_в+r_я}{L_в}+\frac{r_г+r_я}{L_г}-\frac{e_{вн}AB}{(1+B^2i_в^2)L_в}\right]\frac{di_в}{dt}+$$

$$+\frac{R_э r_г i_в-r_г Ae_{вн}\,\mathrm{arc\ tg}\,Bi_в}{L_в L_г}=0. \tag{26}$$

Решение этого уравнения для исследования переходных режимов в системе при различных параметрах представляет значительные трудности. Для физического анализа получающихся возможных движений следует остановиться на таком методе, который позволил бы с достаточной для практики простотой и точностью исследовать все возможные явления в системе. Изображение происходящих явлений на фазовой плоскости дает представление о характере процесса без решения нелинейных дифференциальных уравнений в конечном виде, сводя их решение к несложному геометрическому построению [9, 11]. Обозначим в уравнении (26) производную $\frac{di_в}{dt}$ через Y и $\frac{dY}{di_в}$ через Θ и перепишем его относительно Y

$$Y=\frac{r_г Ae_{вн}\,\mathrm{arc\,tg}\,Bi_в-R_э r_г i_в}{L_в L_г\left[\frac{r_в+r_я}{L_в}+\frac{r_г+r_я}{L_г}-\frac{e_{вн}AB}{(1+B^2i^2_в)L_в}+\Theta\right]}. \tag{27}$$

Полученное уравнение является уравнением изоклин. Пользуясь методом, изложенным в [9, 11], на фазовой плоскости (рис. 8) строим изоклины для случая заснятого на осциллограмме рис. 3б. По построенным изоклинам строим интегральную кривую, представляющую собой устойчивый предельный цикл. Существование предельного цикла на фазовой плоскости является основным признаком существования автоколебаний [9].

Проведенные выше исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Физическая картина явления перемагничивания возбудителя выявляется из линейного (идеализированного) рассмотрения системы.

2. Перемагничивание возбудителя происходит за счет энергии запасенной в обмотке возбуждения генератора.

3. При учете явления гистерезиса в кривой намагничивания возбудителя выявлен режим жесткого самовозбуждения.

4. Действительная картина движения в системе достаточно полно выясняется на фазовой плоскости с учетом основной нелинейности $e_в\,(i_в)$.

5. Наличие предельного цикла на фазовой плоскости характеризует существование автоколебаний.

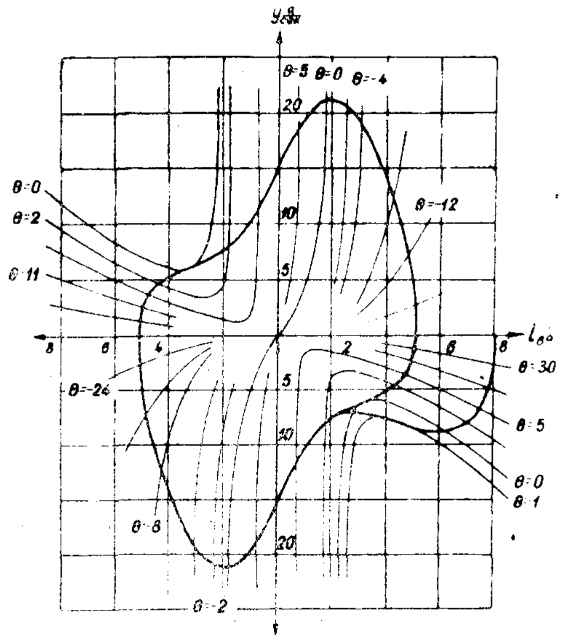


Рис. 8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шулейкин М. В. Об электрических колебаниях, "Журнал русского физико-химического общества", том XLII, физический отдел, выпуск I, 1910.

2. Говорков В. А. Работы академика М. В. Шулейкина по электрическим машинам, „Электричество", 1952.

3. Ганджа Л. И. Самореверсирующиеся системы электроприводов, "Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова", том 72, 1952.

4. Рюденберг Р. Переходные процессы в электрических системах, Перевод с первого американского издания под редакцией Ломоносова В. Ю., ИЛ, 1955.

5. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока, ГЭИ, 1951.

6 Башарин А. В. Графический расчет переходных процессов в системах каскадного возбуждения электрических машин с обратными связями и нелинейностями, „Вестник электропромышленности" № 5, 1956.

7. Андреев В. П. и Сабинин Ю. А. Основы электропривода, ГЭИ, 1956.

8. Толвинский В. П. Электрические машины постоянного тока, ГЭИ, 1956.

9. Андронов А. А. и Хайкин С. Э. Теория колебаний, ОНТИ, ч. 1, 1937.

10. Архангельский Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин. „Электричество". № 3, 1950.

11. Под общей редакцией Поливанова К. М. Физические основы электротехники, ГЭИ, 1950.