

Г. К. САМОЛЕВСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОГО РЕЖИМА
ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО
УСИЛИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958

Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 133

1958

Г. К. САМОЛЕВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОГО РЕЖИМА
ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО
УСИЛИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

Er. 1436

ENSV Teaduste Akadeemia
Kõekraamatukogu

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1958

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в схемах автоматического регулирования все шире внедряются двух- и трёхступенчатые электромашинные усилители продольного поля (рототролы).

Теории и вопросам практического применения подобных усилителей посвящены труды ряда авторов как в Советском Союзе (работы А. Е. Алексева, В. Ф. Байко, А. А. Вавилова, Ф. А. Горяинова, Б. Я. Гусева, В. Е. Малишевского, Б. И. Норневского, Б. Ф. Токарева), так и за границей (статьи В. Litman, M. Liwschitz, F. Tschappu). В опубликованных трудах рассматривается работа усилителя продольного поля в статических и в астатических режимах.

Кроме названных возможна работа усилителя в релейном режиме, изучение которого до сих пор не проводилось. Исследованию релейного режима трёхступенчатого усилителя продольного поля посвящена данная работа.

1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭМУ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

Трёхступенчатый ЭМУ продольного поля (рототрол), именуемый в дальнейшем «усилитель», выполняется в виде четырёхполюсной машины, полная схема которой представлена на рис. 1. Полагая принцип действия усилителя известным, введём здесь следующие условные обозначения:

У, В, СВ, К, Д — обмотки управления, возбуждения, последовательного самовозбуждения, компенсации продольной реакции якоря, добавочных полюсов — соответственно.

Возможны следующие режимы работы усилителя (рис. 2):

1. Если сопротивление цепи нагрузки больше критического, то усилитель будет работать в статическом режиме; в этом случае вольтамперная характеристика aoa располагается выше нагрузочной характеристики dod усилителя.

2. При совпадении вольтамперной характеристики ovv и нагрузочной кривой dod , усилитель работает в астатическом режиме, характерным признаком которого является отсутствие однозначной связи между напряжением U_3 на выходе усилителя и ампервитками возбуждения AW_B в пределах прямолинейной части кривой намагничивания.

3. Если же сопротивление цепи нагрузки меньше критического, чему соответствует положение cos вольтамперной характеристики, то усилитель будет работать в режиме самовозбуждения. Устойчивыми точками работы являются точки пересечения вольтамперной характеристики с кривой намагничивания; точка 0 является неустойчивой точкой работы.

4. Настройкой выходного каскада усилителя на сопротивление, меньшее критического, обеспечивается возникновение ускоряющего напряжения [Л. 2], определяемого по

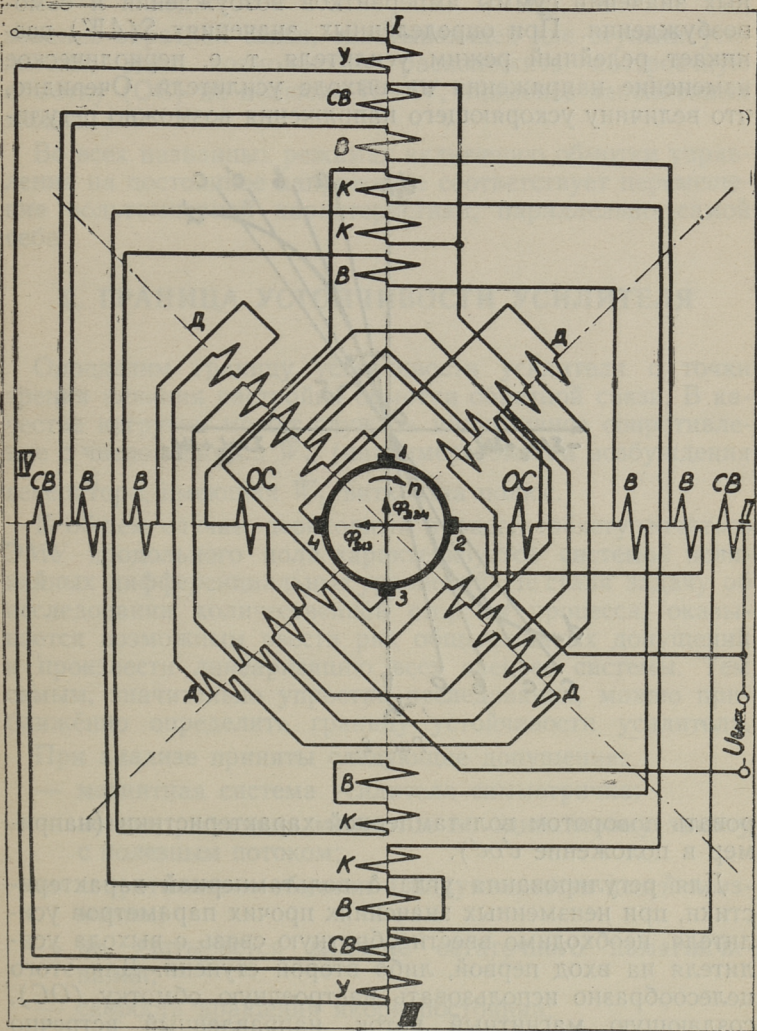


Рис. 1.

нагрузочной кривой и вольтамперной характеристике как разность ординат $S(AW)$ названных кривых, для различных значений суммы ампервитков возбуждения и самовозбуждения. При определённых значениях $S(AW)$ возникает релейный режим усилителя, т. е. периодическое изменение напряжения на выходе усилителя. Очевидно, что величину ускоряющего напряжения возможно регули-

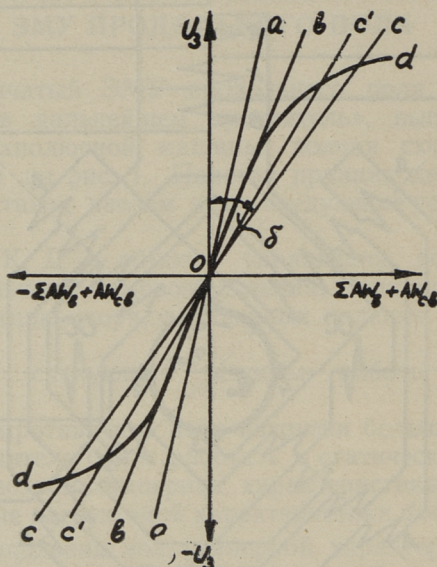


Рис. 2.

ровать поворотом вольтамперной характеристики (например в положение $c'oc'$).

Для регулирования угла δ вольтамперной характеристики, при неизменных значениях прочих параметров усилителя, необходимо ввести обратную связь с выхода усилителя на вход первой, либо второй ступени. Для этого целесообразно использовать настроечную обмотку (ОС), создающую магнитный поток, направленный встречно потоку поперечной реакции якоря. Действие такой обмотки характеризуется возникновением дополнительных ампервитков возбуждения, величина которых, ввиду ненасыщенности промежуточных каскадов меняется линейно

от 0 до значения $AW_{в}$, в пределах изменения ампервитков настроечной обмотки от 0 до значения $\frac{U_3}{r_{oc}} W_{oc}$. Использование обратной связи, охватывающей две ступени усилителя, даёт возможность расположить настроечную обмотку (ОС) на полюсах II—IV, наименее заполненных медью.

Во всех названных режимах включению обмотки управления на постоянное напряжение соответствует перемещение вольтамперной характеристики, параллельно самой себе.

2. ГРАНИЦА УСТОЙЧИВОСТИ УСИЛИТЕЛЯ

Определим границу устойчивости усилителя с точки зрения влияния настройки обмотки обратной связи. В качестве нагрузки может служить индуктивное сопротивление с числом витков W_H (например обмотка возбуждения генератора, имеющая W_H витков на полюс.)

В общем случае переходный процесс трёхступенчатого ЭМУ продольного поля характеризуется системой нелинейных дифференциальных уравнений. Не ставя задачу об исследовании количественной стороны процесса, оказывается возможным ввести ряд общепринятых допущений и произвести линеаризацию всех звеньев системы. Тем самым, значительно упростив исследования, можно приближённо определить границу устойчивости усилителя.

При анализе приняты следующие допущения:

- магнитная система усилителя симметрична;
- потоки рассеяния меняются по одинаковому закону с полезным потоком;
- сопротивление обмоток и индуктивности цепей неизменны;
- не учитывается влияние остаточного намагничивания;
- скорость вращения якоря постоянна;
- допускается кусочно-линейная аппроксимация кривых намагничивания каскадов.

На основании общей теории переходных процессов в машинах постоянного тока [Л. 1], согласно схеме, пред-

ставленной на рис. 1, в предположении наличия шихтованного магнитопровода и прямолинейной коммутации можно записать следующую исходную систему дифференциальных уравнений в операторной форме, при нулевых начальных условиях:

$$\left[1 + \left(T_y - \frac{K_{24}}{K_k} T_{24}\right) p\right] \Phi_{13} - K_{24} \Phi_{24} + \frac{K_{24}}{K_b} T_b p \Phi_3 = \frac{K_y U_y}{C}. \quad (1)$$

$$K_{13} \Phi_{13} - [1 + (T_{13} - T_{oc}) p] \Phi_{24} - K_{oc} \Phi_3 = 0. \quad (2)$$

$$\frac{K_b}{K_k} T_{24} p \Phi_{13} + K_b \Phi_{24} - [1 - K_{cb} + (T_b + T_{cb}) p] \Phi_3 - \frac{K_{cb}}{K_3} T_H p \Phi_H = 0. \quad (3)$$

$$\left(K_H - \frac{K_H}{K_{cb}} T_{cb} p\right) \Phi_3 - \left(1 + \frac{K_H}{K_3} T_H p\right) \Phi_H = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (1) ÷ (4) введены обозначения:
 $K_y, K_{13}, K_{24}, K_k, K_b, K_{cb}, K_{oc}, K_3, K_H$ — коэффициенты обмотки управления, цепей щеток 1—3 и 2—4, компенсационной обмотки, обмоток возбуждения и самовозбуждения, настроенной обмотки, цепи выходного каскада и нагрузки. $T_y, T_{13}, T_{24}, T_b, T_{cb}, T_{oc}, T_H$ — постоянные времени обмотки управления, цепей щеток 1—3 и 2—4, обмоток возбуждения, самовозбуждения, настроенной и нагрузки, соответственно.

C — коэффициент пропорциональности между ЭДС и потоком.

$\Phi_{13}, \Phi_{24}, \Phi_3, \Phi_H$ — магнитный поток первой, второй, третьей ступени и генератора.

U_y — напряжение на обмотке управления.

Решение системы уравнений (1) ÷ (4) относительно потока $\Phi_3(p)$, следовательно и $E_3(p) = c\Phi_3(p)$ приводит к выражению

$$E_3(p) = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4} U_y \quad (5)$$

Представляет интерес реально возможный случай работы усилителя, когда продольная реакция якоря по эквивалентным виткам якоря полностью компенсирована, т. е. $W_{\text{я}} = W_{\text{к}}$; следовательно

$$\varepsilon = \frac{2W_{\text{я}} - 2W_{\text{к}}}{2W_{\text{я}}} = 0;$$

$$K_{24} = \frac{\varepsilon 2W_{\text{я}} C}{a' r_{24}} = 0;$$

$$K_{\text{к}} = \frac{2(W_{\text{я}} - W_{\text{к}} \sigma') C}{a' r_{\text{д}}} \approx 0;$$

$$T_{24} = \frac{2 P_{13} 2(W_{\text{я}} - W_{\text{к}} \sigma') \cdot 10^{-8}}{a' r_{24}} \approx 0;$$

Здесь, дополнительно к принятым ранее, введены обозначения:

$W_{\text{к}}, W_{\text{я}}$ — эквивалентное число витков обмотки якоря и компенсационной обмотки на полюс.

a' — коэффициент пропорциональности между ампервитками и потоком.

$$\sigma' = 1 + \gamma_{\text{s}}(\sigma - 1).$$

$\sigma = 1,15 \div 1,20$ — коэффициент рассеяния главных полюсов.

$\gamma_{\text{s}} = 0,7 \div 0,8$ — коэффициент сцепления потока рассеяния с обмотками.

r_{24} — сопротивление цепи щеток 2—4.

В последнем случае постоянные коэффициенты (a_0, \dots, a_4) и (b_0, \dots, b_3), входящие в выражение (5) имеют следующее значение:

$$a_0 = \frac{K_{\text{H}}}{K_3} T_{\text{y}} T_{\text{b}} T_{\text{H}} (T_{13} - T_{\text{oc}}).$$

$$a_1 = (T_{13} - T_{\text{oc}}) \left[T_{\text{y}} T_3 + \frac{K_{\text{H}}}{K_3} T_{\text{b}} T_{\text{H}} \left(1 + \frac{T_{\text{y}}}{T_{13} - T_{\text{oc}}} \right) \right].$$

$$a_2 = (T_{13} - T_{\text{oc}}) [(1 - K_{\text{cb}}) T_{\text{y}} + T_3] + T_{\text{y}} T_3 + \frac{K_{\text{H}}}{K_3} T_{\text{H}} (K_{\text{b}} K_{\text{oc}} T + T_{\text{b}}).$$

$$a_3 = (1 - K_{cb})(T_y + T_{13} - T_{oc}) + K_b K_{oc} (K_{cb} T_y + \frac{K_H}{K_3} T_H) + T_3.$$

$$a_4 = (1 - K_{cb}) + K_b K_{oc}.$$

$$b_0 = 0; \quad b_1 = 0;$$

$$b_2 = \frac{K_y K_b K_{13} K_H}{K_3} T_H$$

$$b_3 = K_y K_{13} K_b.$$

Из рассмотрения коэффициентов характеристического уравнения $a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0$, путём применения алгебраических критериев устойчивости можно заключить, как изменение величины обратной связи, т. е. изменение K_{oc} и T_{oc} влияет на устойчивость системы.

Известно, что при сопротивлении цепи самовозбуждения, превышающем критическое значение $K_{cb} < 1$; при соответствии критическому $K_{cb} = 1$. В рассматриваемом же случае, когда сопротивление цепи самовозбуждения меньше критического, $K_{cb} > 1$, а величина $(1 - K_{cb})$ имеет отрицательное значение.

Согласно критерию устойчивости Гурвица, граница устойчивости усилителя определяется следующими условиями:

$$1) \quad a_4 = 0 \text{ т. е.} \quad 1 - K_{cb} + K_b K_{oc} = 0$$

$$\text{или} \quad K_{oc} = \frac{1 - K_{cb}}{K_b}. \quad (7)$$

Это условие характеризуется наличием нулевого корня, при положительных значениях остальных коэффициентов характеристического уравнения.

$$2) \quad a_0 = 0 \text{ т. е.} \quad \frac{K_H}{K_3} T_y T_b T_H (T_{13} - T_{oc}) = 0.$$

Ввиду того, что коэффициенты и постоянные времени $K_H, K_3, T_y, T_b, T_H, T_{13}$, и T_{oc} всегда положительны, последнее условие запишется в виде

$$T_{13} - T_{oc} = 0 \quad \text{или} \quad T_{oc} = T_{13}, \quad (8),$$

и характеризуется наличием бесконечного корня.

3) Условие границы устойчивости $a_3(a_1a_2 - a_0a_3) - a_4a_1^2 = 0$ характеризуется наличием пары чисто мнимых корней при всех положительных коэффициентах.

В принятых обозначениях это условие запишется в виде:

$$K_{oc} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (9),$$

где дискриминант $D < 0$ ($D = 4AC - B^2$), так как по существу коэффициент $K_{oc} = \frac{2W_{oc}C}{a' r_{oc}}$ может иметь только поло-

жительное и вещественное значение.

Здесь W_{oc} — число витков настроечной обмотки на полюс.

r_{oc} — сопротивление цепи настроечной обмотки.

$$A = \frac{K_H}{K_3} K_b^2 T_H T_y (K_{cb} T_y + \frac{K_H}{K_3} T_H).$$

$$2B = K_b \frac{K_H}{K_3} [(1 - K_{cb})(T_H + \frac{K_{cb}}{1 - K_{cb}} \cdot \frac{K_3}{K_H} T_3) T_y^2 + \\ + T_b T_H (K_{cb} T_y + \frac{K_H}{K_3} T_H) + T_y T_H (2T_3 - T_b)].$$

$$C = T_y T_3 [(1 - K_{cb}) T_y + T_3] + \frac{K_H}{K_3} T_b T_H T_3.$$

$$T_{13} - T_{oc} \ll T_H.$$

Согласно условию (9), с уменьшением сопротивления цепи настроечной обмотки, т. е. с увеличением K_{oc} , при неизменных значениях прочих параметров, достигается граница устойчивости.

Таким образом, коэффициент K_{oc} можно назвать коэффициентом усиления настроечной обмотки. Аналитически можно выразить частоту и амплитуду колебаний, в зависимости от параметров усилителя и коэффициента усиления настроечной обмотки.

Однако, не прибегая к теоретическому доказательству, путём практических расчётов нетрудно убедиться, что

- 1) аналитический расчёт представляется достаточно трудоёмким и не обеспечивает достаточной точности по сравнению с экспериментальными данными.

2) Для получения приемлемых результатов достаточно учитывать параметры обмотки управления, настроенной обмотки, выходной ступени и нагрузки усилителя.

Поэтому значительно проще, удобнее и нагляднее пользоваться предлагаемым графоаналитическим способом расчёта колебательного процесса усилителя, изложению которого посвящён следующий раздел работы.

3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЁТА КОЛЕБАНИЙ УСИЛИТЕЛЯ

В основу предлагаемого способа положен общий метод определения самовозбуждающихся колебаний в цепях с нелинейными характеристиками, изложенный в [Л. 2].

Здесь используется возможность представить механизм колебаний как результат действия ускоряющего напряжения $S(AW)$, возникающего при настройке выходного каскада усилителя на сопротивление, меньшее критического.

Рассмотрим следующие основные случаи изменения режима усилителя:

а) изменение коэффициента обратной связи K_{oc} , т. е. изменение величины сопротивления r_{oc} в цепи настроенной обмотки, при неизменном значении прочих параметров усилителя. На рис. 3 показана нагрузочная кривая dod и вольтамперные характеристики a_1oa_1 и a_2oa_2 трёхступенчатого ЭМУ продольного поля, соответствующие двум различным значениям коэффициента обратной связи K_{oc} , при разомкнутом состоянии цепи обмотки управления. Здесь изображена графически зависимость ускоряющего напряжения $S(AW)$ от суммарного значения ампервитков возбуждения и самовозбуждения.

Очевидно, что с увеличением коэффициента K_{oc} , т. е. с уменьшением угла δ , уменьшается амплитудное значение и период ускоряющего напряжения от $S_1(AW)$ до $S_2(AW)$ и соответственно уменьшается его период от τ_1 до τ_2 .

б) Включение обмотки управления на постоянное напряжение U_y .

На рис. 4 показана нагрузочная кривая dod и вольтамперная характеристика a_1oa_1 , соответствующая разомкнутому состоянию цепи обмотки управления, т. е. $i_y = 0$, и вольтамперная характеристика a_3oa_3 , соответствующая включению обмотки управления на постоянное напряжение U_y .

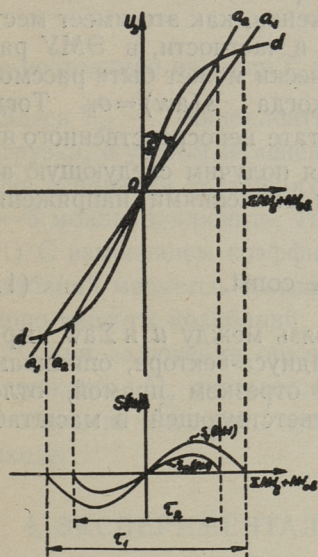


Рис. 3.

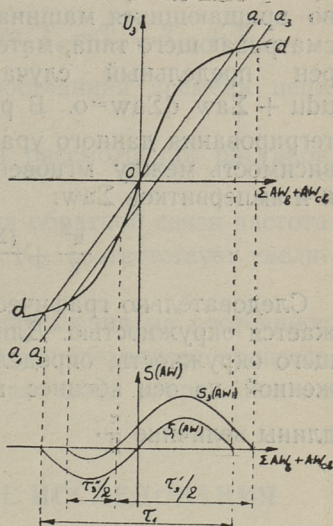


Рис. 4.

Очевидно, что с увеличением тока i_y в обмотке управления, т. е. с перемещением вольтамперной характеристики параллельно самой себе из положения a_1oa_1 в положение a_3oa_3 , происходит смещение кривой ускоряющего напряжения из положения $S_1(AW)$ в положение $S_3(AW)$.

Кривую $S_3(AW)$ целесообразно рассматривать состоящей из двух чередующихся кривых с амплитудными значениями $S_3'(AW)$ и $S_3''(AW)$ и соответственно величиной полупериодов $\frac{\tau_3'}{2}$ и $\frac{\tau_3''}{2}$.

Если кривая намагничивания симметрична, то $\frac{\tau_3'}{2} + \frac{\tau_3''}{2} \approx \tau_1$.

Связь между мгновенными значениями напряжения u_3 , ампервитков Σaw и ускоряющего напряжения $s(aw)$ имеет вид:

$$u du + \Sigma aw d\Sigma aw = s(aw) du. \quad (10)$$

В общем случае, при наличии несимметричной кривой намагничивания для решения этого дифференциального уравнения может быть применён метод изоклин.[Л. 2].

При наличии симметричной кривой намагничивания и при малом ускоряющем напряжении, как это имеет место во вращающихся машинах, и, в частности, в ЭМУ рассматриваемого типа, математически может быть рассмотрен предельный случай, когда $s(aw) = 0$. Тогда $u du + \Sigma aw d\Sigma aw = 0$. В результате непосредственного интегрирования данного уравнения получим следующую зависимость между мгновенными значениями напряжения u и ампервитков Σaw :

$$\frac{u^2}{2} + \frac{(\Sigma aw)^2}{2} = \text{const.} \quad (11)$$

Следовательно графически связь между u и Σaw выражается окружностью. Длина радиуса-вектора, описывающей окружность, определяется отрезком прямой, отложенной на оси абсцисс и соответствующей в масштабе длины величине $\frac{\tau}{2}$.

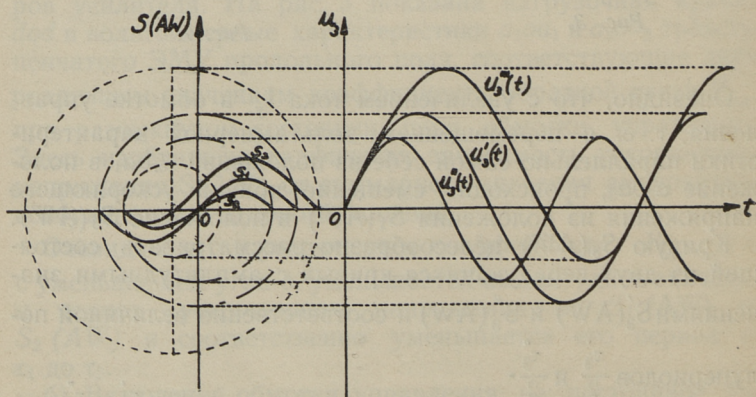


Рис. 5.

Изменение напряжения во времени определяется графически общеизвестным способом, как показано на рис. 5.

При малых ускоряющих напряжениях вращение радиус-вектора происходит с постоянной угловой скоростью. Следовательно, напряжение на выходе усилителя изменяется по синусоидальной кривой. Период колебаний определяется зависимостью

$$\tau = 2\pi T_{\vartheta}, \quad (12),$$

где постоянная времени T_{ϑ} принята: $T_{\vartheta} = T_b + T_{cb} + T'_H$.

Здесь T'_H — эквивалентная постоянная времени цепи нагрузки, с учетом изменения δ .

На основании сказанного и из рассмотрения рисунков 3 ÷ 5 можно заключить, что

1) С изменением коэффициента обратной связи частота колебаний меняется. Увеличение K_{oc} соответствует увеличению частоты колебаний.

2) При включении обмотки управления на постоянное напряжение U_y смещается кривая переходного процесса по отношению к линии нулевых значений напряжения на выходе.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования колебательного процесса были проведены на двух усилителях продольного поля, мощностью 2 квт и 36 квт, построенных на базе машин постоянного тока серии ПН.

На рис. 6, в качестве примера, приводится осциллограмма (1) колебательного процесса усилителя мощностью 36 квт для следующих параметров: $T_b = 0,01$ сек; $T_{cb} = 0,013$ сек; $T'_H = 0,07$ сек.

Этой же осциллограммой подтверждается явление смещения кривой выходного напряжения усилителя по отношению к нулевому значению напряжений, при включении сигнала на вход усилителя. На участке $a-b$ цепь обмотки управления разомкнута. На участке $b-c$ на обмотку управления подано напряжение $U_y = +2,0$ в.

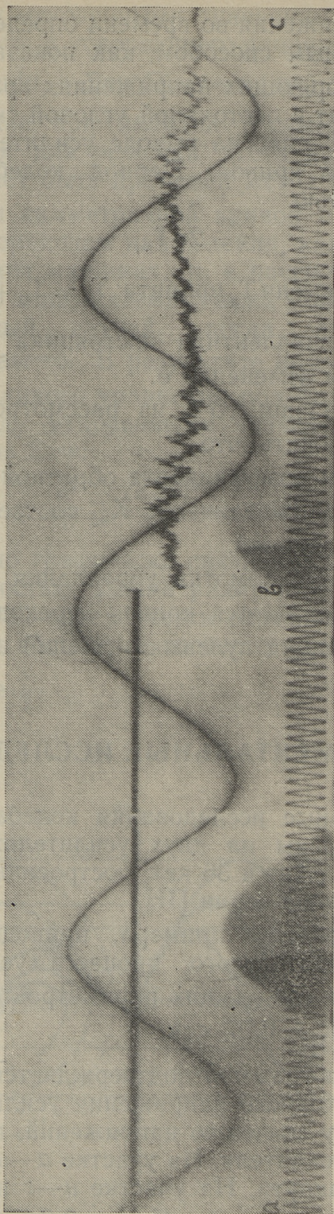


Рис. 6.

Приведённой на рис. 7 осциллограммой (2) характеризуется возможность изменения частоты колебаний путём увеличения коэффициента K_{oc} . Эксперимент проводился на усилителе мощностью 2 квт. При проведении опыта сопротивление r_{oc} менялось в пределах: 1) $r_{oc} = 180$ ом. 2) $r_{oc} = 102$ ом, чему на осциллограмме соответствуют периоды колебаний:

$$\tau_1 = 0,92 \text{ сек}; \quad \tau_2 = 0,38 \text{ сек.}$$

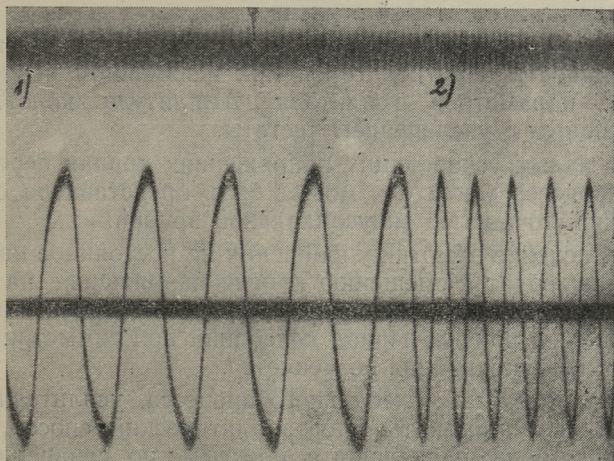


Рис. 7.

ВЫВОДЫ

1. При настройке усилителя на сопротивление, меньшее критического, усилитель может быть введён в колебательный режим путём введения отрицательной обратной связи с выхода на вход второй ступени.

Частоту колебаний можно регулировать изменением коэффициента обратной связи при неизменном значении прочих параметров усилителя. Амплитуда колебаний уменьшается с увеличением частоты.

При малых ускоряющих напряжениях кривая переходного процесса усилителя может быть представлена с достаточной точностью синусоидальной кривой.

2. Включение обмотки управления на постоянное напряжение приводит к смещению кривой напряжения на выходе усилителя по отношению к нулевому уровню этого напряжения, причем период колебаний при симметричной кривой намагничивания не меняется.

3. Для расчёта колебательного процесса усилителя целесообразно применить графоаналитический способ, являющийся более наглядным и простым, по сравнению с аналитическим.

4. Колебательный режим трёхступенчатого усилителя продольного поля может быть использован в реверсивных системах. Усилитель продольного поля может быть использован в качестве управляемого генератора низких частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин Н. П. — Переходные процессы в машинах постоянного тока. 1951.
2. Рюденберг Р. — Переходные процессы в электроэнергетических системах. 1955.

Г. К. Самолевский
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОГО РЕЖИМА
ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ
ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

Издательство Таллинского Политехнического Института

*

Редактор Х. Тийсмус
Технический редактор А. Тамм
Корректор Э. Ристхейн

Сдано в набор 2. IV 1958. Подписано к печати 10. V 1958.
Бумага $54 \times 84 \frac{1}{16}$. Печатных листов 1,25. По формату 60×92 печатных листов 1,02. Учетно-издательских листов 0,65. Тираж 800.
МВ-03170. Заказ № 1108.

Типография «Юхисэлу», Таллин, ул. Пикк 40/42.

Цена 50 коп.

Цена 50 коп.