Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIV, 1982 г.

УДК 62-83:621.314.5 + 621.316.72

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.Ф.ДУБИНИН, Т.О.РОССО, А.В.ШИПУЛИН

Современные нагрузочные стенды в качестве нагрузочной машины используют машину постоянного тока. Стабилизация параметров машины постоянного тока для правильной настройки всего стенда имеет чрезвычайно важное значение. Одним из таких параметров является коэффициент передачи тока якоря - электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = c_м \Phi I_я .$$

Этот коэффициент зависит от значения магнитного потока машины, который определяется током возбуждения, поэтому решением задачи регулирования и стабилизации тока возбуждения является применение статического возбудителя.

Схема частотно-импульсного преобразователя (ЧИП) работает следующим образом (рис.I, а). В исходном состоянии тиристор Т - закрыт, емкость $C_к$ заряжена до напряжения $E_м$; при появлении отпирающего импульса Т открывается, пропуская ток от источника к нагрузке. Одновременно образуется колебательный контур $C_к - L_к - T$; так как конденсатор заряжен, то в контуре возникает колебание.

На втором полупериоде ток колебательного контура течет через Т навстречу току нагрузки, и в момент, когда ток контура начинает превышать ток нагрузки, Т переходит из проводящего состояния в закрытое; коммутирующий конденсатор продолжает перезаряжаться по цепи $E_м - L_к - C_к - (L_н R_н) - E_м$. В момент, когда э.д.с. самоиндукции $e_н$ становится отрицательной, открывается обратный диод Д и перезаряд $C_к$, минуя нагрузку, продолжается через Д. Возможны затухающие подключения диода Д.

Для анализа процессов в ЧИП-возбудителе было использовано решение переходных процессов на цифровой вычислительной машине.

Алгоритм основан на решении эквивалентных схем (рис.I, б-г). Первая эквивалентная схема (рис. I, б) описывается системой дифференциальных уравнений

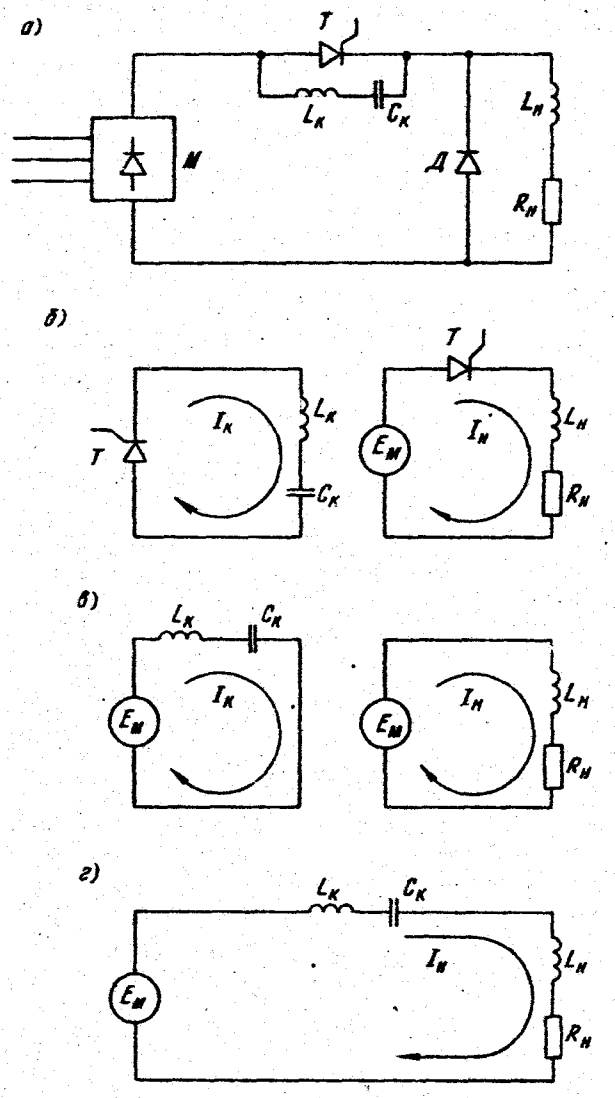


Рис.1. Принципиальная схема ЧИП-возбудителя (а); эквивалентные расчетные схемы (б-г)

$$
\begin{aligned}
&L_к \frac{d^2}{dt^2} q_c + \frac{1}{C_к} q_c = 0;\\
&q_c(0) = C_к U_c(0);\\
&L_н \frac{d}{dt} I_н + R_н I_н = E_м;\\
&I_н(0) = I_{Lн}(0);\\
&I_к(t) = \frac{d}{dt} q_c(t).
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Решение системы (I) имеет вид

$$q_c(t) = -q_c(0)\cos\Omega_к t = -C_к U_c(0)\cos\Omega_к t;$$

$$I_к(t) = C_к\Omega_к U_c(0)\sin\Omega_к t;$$

$$I_н(t) = I_н(0)\exp\left(-\frac{R_н}{L_н}\right)t + \frac{E_м}{R_н}\left(1 - \exp\left(-\frac{R_н}{L_н}t\right)\right);$$

$$\Omega_к = \frac{1}{\sqrt{L_к C_к}}.$$

Решение продолжается до момента $I_к + I_н = 0$. При выполнении условия $I_к + I_н < 0$ происходит переход на эквивалентную схему (рис.I, в или г):

$$L_к\frac{d^2}{dt^2}q_c + \frac{1}{C_к}q_c = E_м;$$

$$q_c(0) = q_c(t_1);$$

$$I_к(0) = I_к(t_1); \qquad (2)$$

$$L_н\frac{d}{dt}I_н + R_н I_н = 0;$$

$$I_н(0) = I_н(t_1),$$

где t_1 - конец предшествующего промежутка.

Решение системы (2) имеет вид

$$q_c(t) = C_к E_м + \left(q_c(0) - C_к E_м\right)\cos\Omega_к t + \frac{I_к(0)}{\Omega_к}\sin\Omega_к t;$$

$$I_к(t) = \left(C_к E_м - q_c(0)\right)\Omega_к\sin\Omega_к t + I_к(0)\cos\Omega_к t;$$

$$I_н = I_н(0)\exp\left(-\frac{R_н}{L_н}t\right).$$

Условие перехода на другую схему замещения $I_к(t) > I_н(t)$ (для рис.I, в):

$$(L_к + L_н)\frac{d^2}{dt^2}q_c + R_н\frac{d}{dt}q_c + \frac{1}{C_к}q_c = E_н. \qquad (3)$$

Если $\left(\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}\right)^2 - \frac{1}{C_к(L_к + L_н)} < 0;$

то

$$q_c(t) = C_к E_м + e^{\sigma}(A_1\cos\Omega_к t + A_2\sin\Omega_к t),$$

где

$$\sigma = -\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}; \quad \Omega_к = \sqrt{\left(\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}\right)^2 - \frac{1}{C_к(L_к + L_н)}};$$

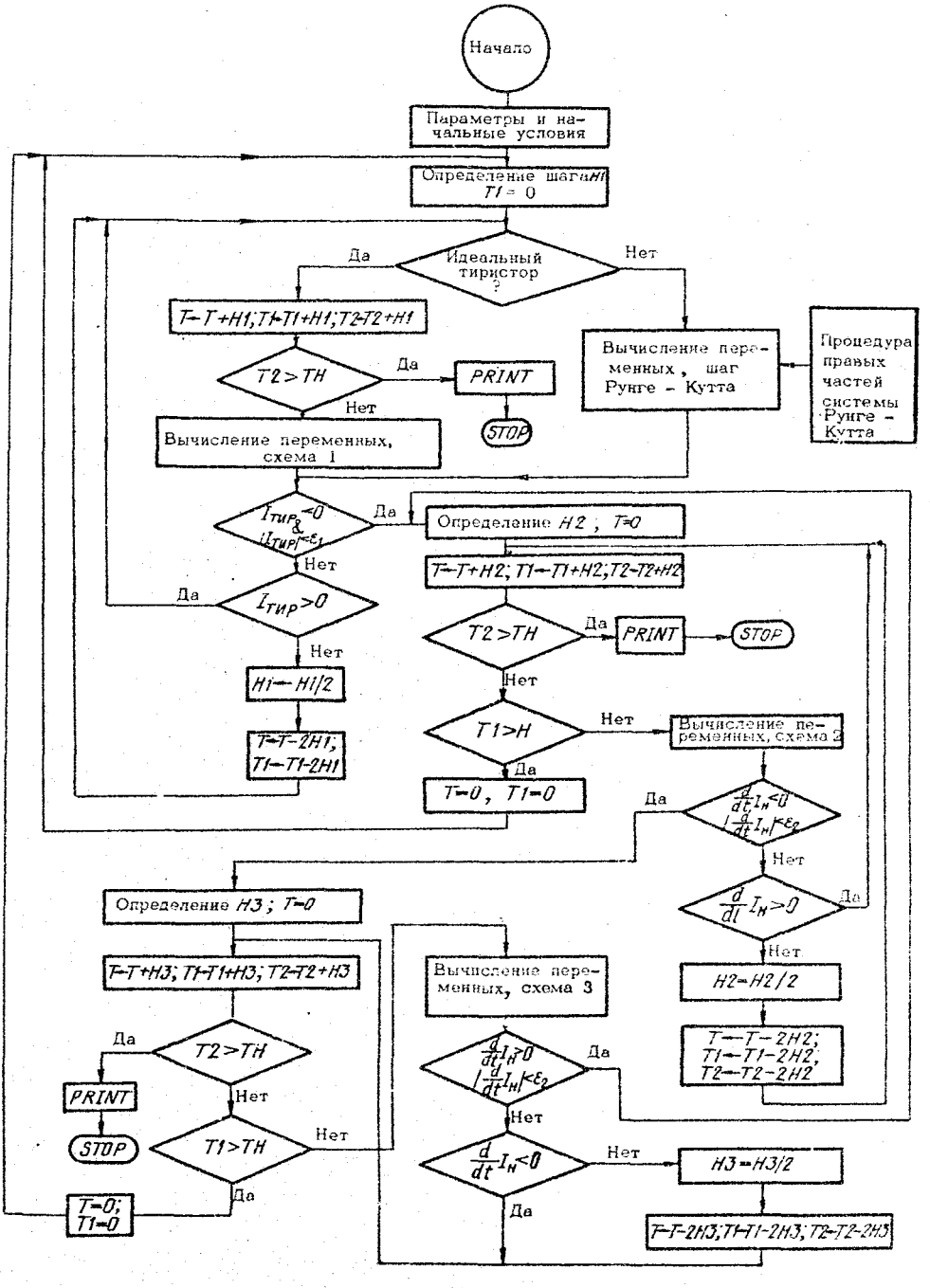


Рис.2. Блок-схема алгоритма расчета переходных процессов ЧИП-возбудителя на ЦВМ

$$A_1 = q_c(0) - C_к E_м ; \quad A_2 = \frac{I_c(0) - \left(q_c(0) - C_к E_м\right)\sigma}{\Omega_к} .$$

Если

$$\left(\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}\right)^2 - \frac{1}{C_к(L_к + L_н)} > 0 ,$$

то

$$q_c(t) = C_к E_м + A_1 \exp(\sigma_1 t) + A_2 \exp(\sigma_2 t) ,$$

где

$$\sigma_1 = -\frac{R_н}{2(L_н + L_к)} + \sqrt{\left(\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}\right)^2 - \frac{1}{C_к(L_н + L_к)}} ;$$

$$\sigma_2 = -\frac{R_н}{2(L_н + L_к)} - \sqrt{\left(\frac{R_н}{2(L_к + L_н)}\right)^2 - \frac{1}{C_к(L_н + L_к)}} ;$$

$$A_2 = \frac{\sigma_1 q_c(0) - I_c(0) - \sigma_1 C_к E_м}{\sigma_1 - \sigma_2} ;$$

$$A_1 = \frac{\sigma_2 q_c(0) - I_c(0) - \sigma_2 C_к E_м}{\sigma_2 - \sigma_1} .$$

Тиристоры и диоды в ЧИП-возбудителе обычно предполагаются идеальными ключами[x].

Эквивалентные схемы, приведенные на рис.I, б–г, соответствуют питанию ЧИП-возбудителя от генератора постоянного тока. При питании от статического неуправляемого выпрямителя токи, протекающие по цепям $E_{м+}$-Т-$L_н$-$E_{м-}$; $E_{м+}$-$L_к$-$C_к$-Д-$E_{м-}$ или $E_{м+}$-$L_к$-$C_к$-$L_н$-$E_{м-}$, могут быть только одного знака.

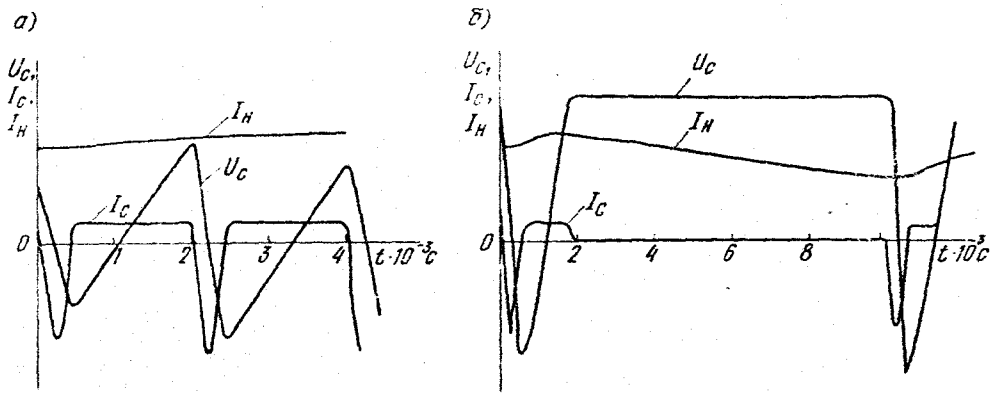


Рис.3. Переходные процессы ЧИП-возбудителя, рассчитанные на цифровой модели, при f_1 = 500 Гц (а); f_2 = 100 Гц (б)

[x] Тиристорный регулятор постоянного тока / В.В.Рудаков, И.М.Столяров, З.Б.Слепцова, А.В.Смирнов – Электротехника, 1976, № 9.

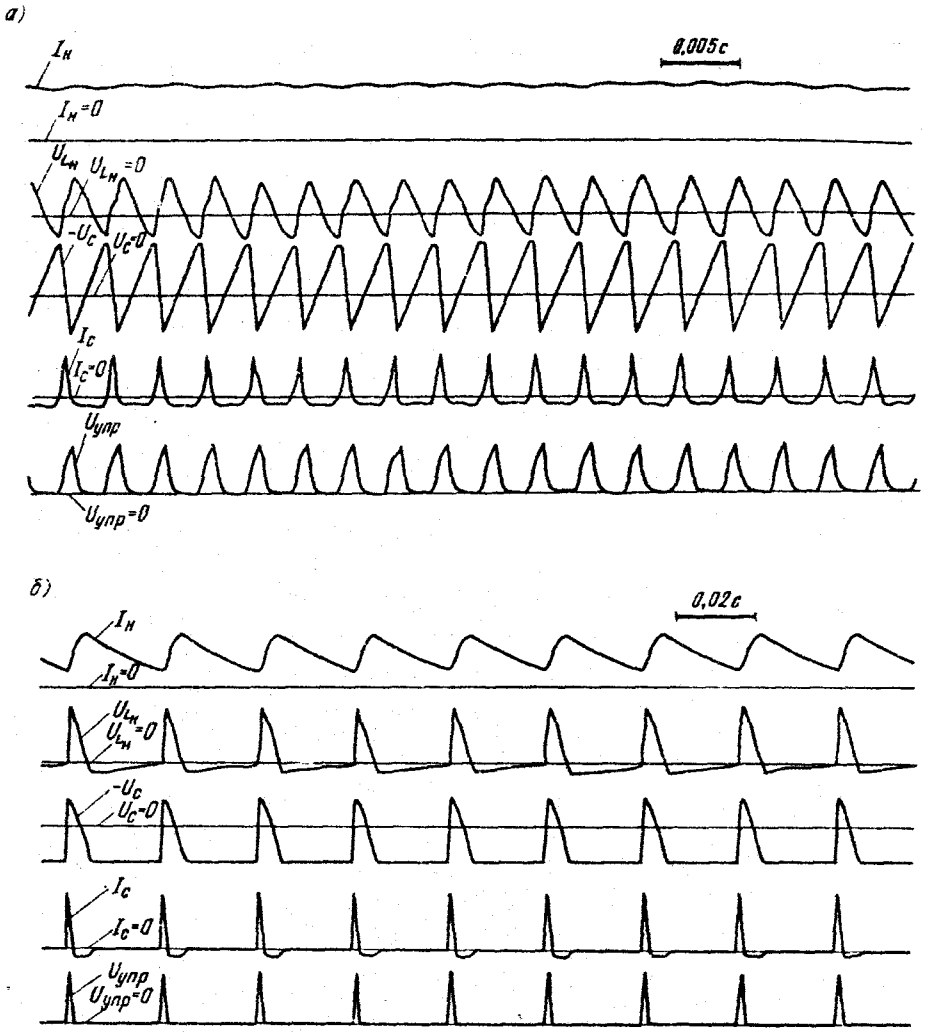


Рис.4. Осциллограммы переходных процессов ЧИП-возбудителя при f_1 = 330 Гц (а); f_2 = 42 Гц (б)

Расчеты показали, что считать тиристор Т идеальным ключом не правомерно. Для получения более точных результатов активное сопротивление прямой проводимости тиристора необходимо принять как

$$R_т = \frac{R_0}{1+aI_т},$$

где $I_т = I_н - I_к$.

Подбор параметров R_0 и a производился при сравнении экспериментальных переходных процессов и полученных на ЭВМ.

На рис.2 приведена блок-схема алгоритма расчета переходных процессов, особенностью алгоритма является автоматический выбор шага вычислений и расчет решений по готовым формулам методом Рунге – Кутта с автоматическим выбором шага.

На рис.3 приведены переходные процессы в ЧИП-возбудителе, полученные на цифровой модели для двух разных частот, а на рис.4 - осциллограммы, полученные на экспериментальной установке.

Исследования показали, что ЧИП-возбудитель с токовым регулятором обеспечивает стабилизацию тока возбуждения двигателя с точностью 2,5 %. Использованные при расчетах алгоритмы решения позволяют оценить токи и максимальные напряжения в элементах схемы ЧИП-возбудителя.