

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПИТАЮЩИМИСЯ ОТ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Тарасов В.М., Волков А.А.
Научный руководитель – доцент Буланова О.В.

*Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова*

В современном металлургическом производстве в качестве приводов валков прокатных станов широко используются двигатели постоянного тока, питающиеся от тиристорных преобразователей. Это обусловлено возможностью плавного регулирования скорости двигателя в широких пределах. Одной из особенностей эксплуатационных режимов работы прокатных станов является скачкообразное изменение механического момента и ударное приложение нагрузки, что приводит к возникновению переходных электромеханических процессов в системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-ДПТ). Аналогичные воздействия на ДПТ оказывают резкие изменения напряжения сети (или питающего напряжения от ТП), в случае питания ДПТ от нерегулируемого ТП. Данные обстоятельства негативно сказываются на работе системы ТП-ДПТ, а, следовательно, и на качестве выпускаемой продукции. Поэтому возникает необходимость расчета и прогнозирования эксплуатационных переходных режимов системы ТП-ДПТ в сложно замкнутых системах электроснабжения предприятий, имеющих собственные генераторы.

Для анализа переходных электромеханических процессов в системе ТП-ДПТ необходимо получить математическую модель данной системы на основании уравнения изменения скорости вращения ротора ДПТ.

При питании двигателя постоянного тока с независимым возбуждением от тиристорного преобразователя переходные процессы могут быть описаны двумя дифференциальными уравнениями: уравнением движения и уравнением равновесия ЭДС в цепи якоря. Уравнение равновесия ЭДС относится ко всем возможным режимам: пуску, приему и сбросу нагрузки, изменению питающего напряжения, торможению; лишь в режиме динамического торможения следует принять $U = 0$.

При $\Phi = \text{const}$ ЭДС двигателя пропорциональна скорости ($E = k\Phi\omega$), а момент — току якоря ($M = k\Phi i_a$). Поэтому уравнения движения и равновесия ЭДС могут быть представлены в следующем виде:

$$k\Phi_n i_a - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где k - постоянная для конкретной машины, $k = pN/2\pi a$; Φ - номинальный магнитный поток в зазоре; i_a - ток якорной цепи; M_c - статический момент на валу ротора; J - момент инерции машины; ω - скорость вращения;

$$e_n = k\Phi_n \omega + i_a R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} \frac{di_a}{dt}, \quad (2)$$

где e_n - полное выпрямленное напряжение от ТП; $R_{я\Sigma}$ - полное активное сопротивление якорной цепи; $L_{я\Sigma}$ - полное индуктивное сопротивление якорной цепи.

Подставив значение i_a из уравнения (2) в (1), после преобразований получим дифференциальное уравнение для угловой скорости двигателя:

$$T_{\text{ЭЯ}} T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{e_n}{k\Phi_n} - \frac{M_c R_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi_n)^2}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ЭЯ}} = L_{\text{я}\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}$ - электромагнитная постоянная, $T_M = JR_{\text{я}\Sigma} / (k\Phi_n)^2$ - механическая постоянная.

В правой части первое слагаемое представляет собой управляющее, а второе — возмущающее воздействие. Правую часть уравнения (3) можно представить иначе, введя величины: $\omega_0 = e_n / k\Phi_n$, $\Delta\omega_c = M_c R_{\text{я}\Sigma} / (k\Phi_n)^2$ — статическое падение скорости, $\omega_c = \omega_0 - \Delta\omega_c$ — скорость, соответствующая статическому моменту M_c . Получим:

$$T_{\text{ЭЯ}} T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c. \quad (4)$$

Дифференциальному уравнению соответствует следующее характеристическое:

$$p^2 + \frac{1}{T_{\text{ЭЯ}}} p + \frac{1}{T_{\text{ЭЯ}} T_M} = 0. \quad (5)$$

Корни характеристического уравнения, определяемые равенствами:

$$p_1 = -\frac{1}{2T_{\text{ЭЯ}}} + \sqrt{\frac{1}{4T_{\text{ЭЯ}}^2} - \frac{1}{T_{\text{ЭЯ}} T_M}} \quad p_2 = -\frac{1}{2T_{\text{ЭЯ}}} - \sqrt{\frac{1}{4T_{\text{ЭЯ}}^2} - \frac{1}{T_{\text{ЭЯ}} T_M}}, \quad (6)$$

в зависимости от соотношения $4T_{\text{ЭЯ}} / T_M < 1$ или > 1 могут быть вещественными и комплексными. Для комплексных корней также можно записать:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\nu \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{1}{2T_{\text{ЭЯ}}}$, $\nu = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ЭЯ}} T_M} - \frac{1}{4T_{\text{ЭЯ}}^2}}$

В итоге выражения для скорости в переходном режиме принимают вид:

$$\omega = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \omega_c \quad (8)$$

Постоянные интегрирования A_1 , A_2 для каждого режима (пуск, тот или иной вид торможения, прием или сброс нагрузки, изменение напряжения) должны определяться отдельно. Более того, если пуск или торможение ведется несколькими ступенями, то постоянные интегрирования вычисляются для каждой ступени. При переходе с одной ступени на другую изменяются также и показатели экспонент p_1 и p_2 , так как в них входят постоянные $T_{\text{ЭЯ}}$ и T_M , зависящие от сопротивления цепи якоря.

Для определения постоянных интегрирования в уравнении (8) достаточно двух начальных условий, которые в общем случае при $t = 0$ имеют вид $\omega = \omega_{\text{нач}}$, $i_{\text{я}} = i_{\text{нач}}$.

Для этого подставив в преобразованное выражение (1) и в уравнение (8) начальные условия, получим два уравнения для постоянных интегрирования A_1 и A_2 , из которых могут быть найдены значения постоянных:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{нач}} &= A_1 + A_2 + \omega_c \\ k\Phi_n (I_{\text{нач}} + I_c) / J &= p_1 A_1 + p_2 A_2 \end{aligned} \quad (10)$$

На основании приведенных уравнений можно исследовать переходные электромеханические процессы в системе ТП-ДПТ при изменении момента на валу ротора, а также при изменении питающего напряжения ДПТ.

Изменение момента вводится в дифференциальное уравнение скорости (3) через составляющую:

$$\Delta\omega_c = M_c R_{\text{я}\Sigma} / (k\Phi_n)^2,$$

а изменение напряжения:

$$\omega_0 = e_n / k\Phi_n.$$

При этом для регулируемого ТП:

$$e_n = E_{n0} \cos \alpha = k_{cx} E_{2\phi} \cos \alpha, \quad (11)$$

где E_{n0} – выходное напряжение ТП, α – угол регулирования ($0 < \alpha < 180^\circ$), k_{cx} – коэффициент схемы выпрямления, $E_{2\phi}$ – действующая фазная ЭДС сети.

Если ДПТ питается от регулируемого ТП, то значение e_n не будет изменяться за счет регулирования угла под действием системы управления. При питании ДПТ от нерегулируемого ТП $\alpha=0^\circ$, а значит e_n будет менять пропорционально изменению напряжения сети. На основании вышеизложенных уравнений был разработан алгоритм расчета переходных электромеханических процессов в ДПТ (рис. 1).

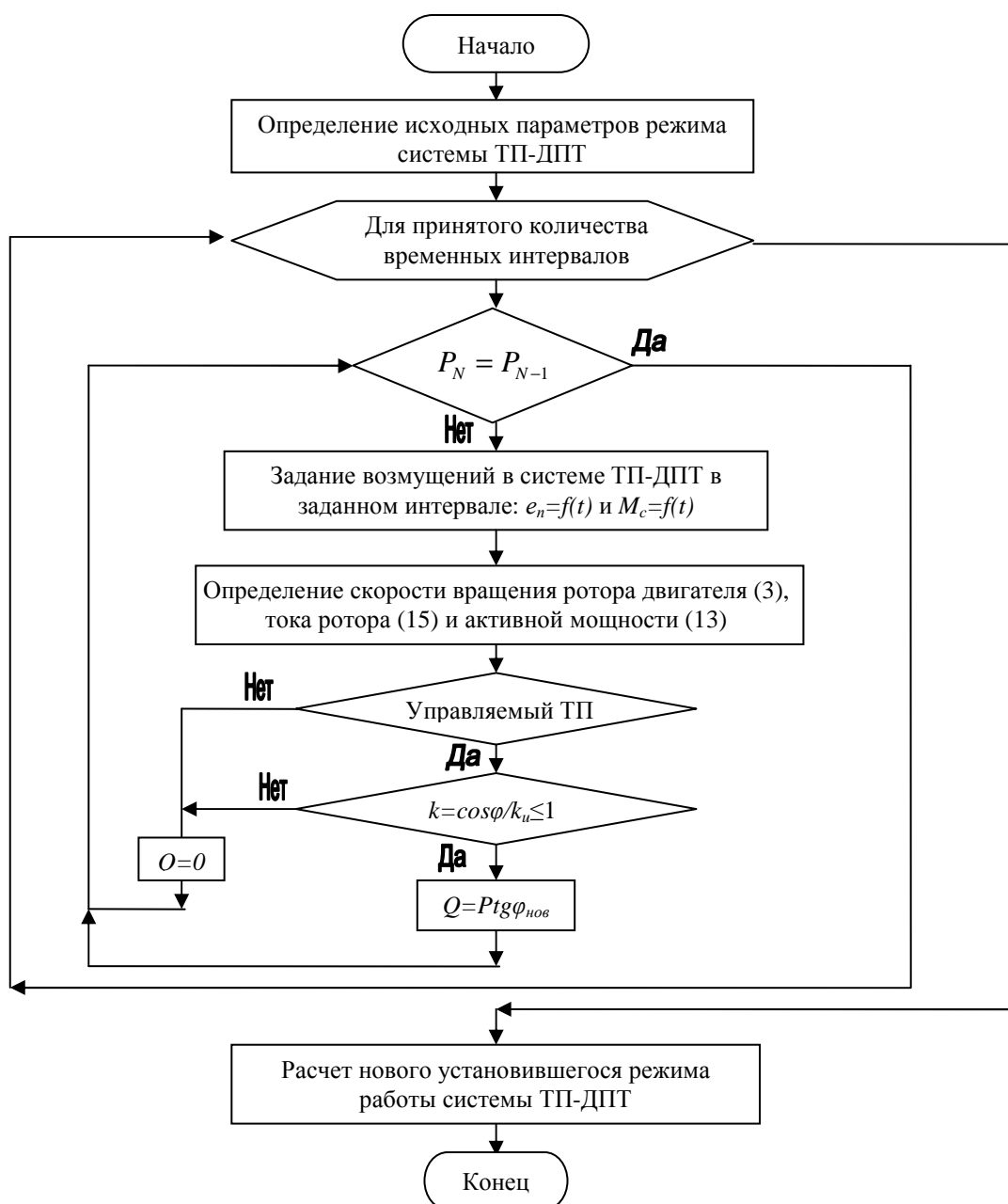


Рис. 1 – Алгоритм расчета переходных процессов в системе ТП-ДПТ

Алгоритм базируется на сочетании модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательных интервалов,

положен в основу оригинального программного обеспечения и позволяет производить расчеты эксплуатационных режимов с учетом параметров резкопеременной нагрузки.

Расчеты режимов предполагается производить на примере системы электроснабжения «Магнитогорский металлургический комбинат», имеющей большое количество резкопеременных энергоемких нагрузок. В качестве примера на рис.2, 3 приведены изменения скорости и токов во времени двигателя типа П2-24/71, $S_H = 8000/6300$ кВт, $U_H = 930$ В, $I_H = 9030$ А, $n_H = 175/330/410$ об/мин клетки №11 ЛПЦ-4 ОАО «ММК».

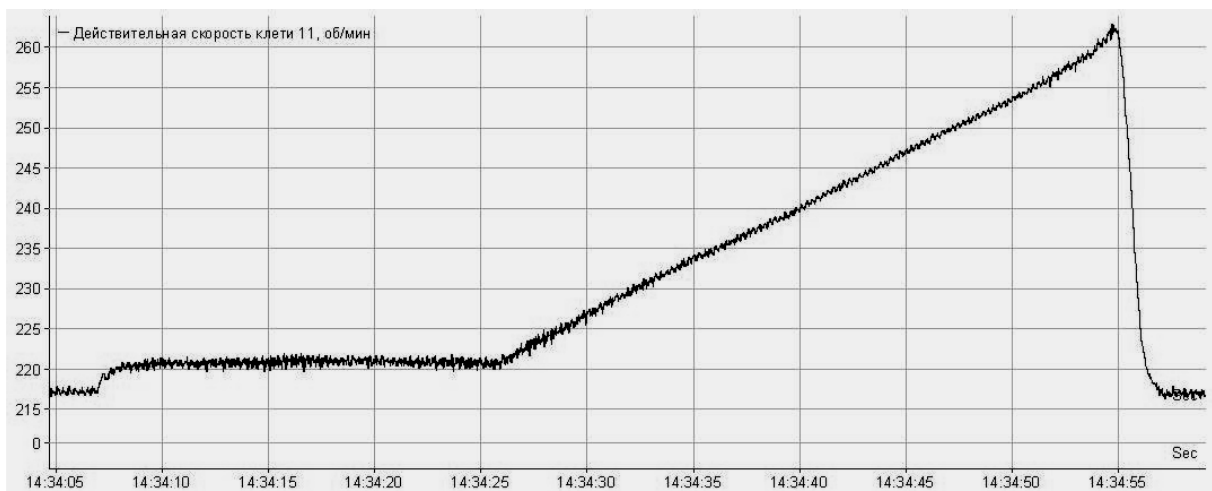


Рис. 2 – Экспериментально полученная зависимость тока якоря двигателя клетки №11 ЛПЦ-4 во времени

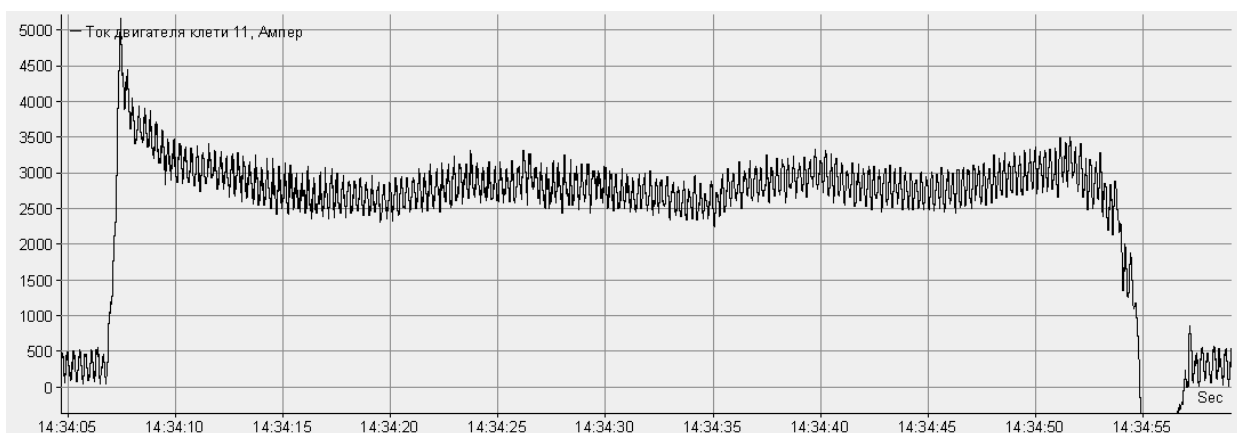


Рис. 3 – Экспериментально полученная зависимость тока якоря двигателя клетки №11 ЛПЦ-4 во времени

Данные графики позволяют воспользоваться ранее полученными математическими моделями и исследовать режимы работы резкопеременных нагрузок в условиях действующего объекта.

Разработанная математическая модель и программное обеспечение позволяют анализировать эксплуатационные режимы систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом влияния выпрямительной двигательной нагрузки.

Результаты расчетов позволят исследовать устойчивость синхронных генераторов при нормальных, послеаварийных и аварийных режимах работы, оценить качество напряжения и разработать мероприятия, направленные на повышение качества и надежности электроснабжения потребителей.