

УДК 62-83:681.5

ОСОБЕННОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО И ТОКОВОГО ПУСКА РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

С.Н. КУХАРЕНКО, А.И. РОЖКОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Н.Б.А. ФЕРШИШИ

Гунииский университет Науки и Техники

Введение

Современные силовые полупроводниковые преобразователи с активным управлением позволяют создавать источники электропитания с характеристиками идеальных источников тока или напряжения.

Отсутствие внутренних сопротивлений и инвариантность выходных напряжения или тока к нагрузке только на первый взгляд должны всегда положительно сказываться на электропитании электроприводов постоянного и переменного тока.

Наш опыт работы с системами идеальный источник электропитания – «электро-двигатель» показывает, что это не так.

Цель работы

Исследовать особенности потенциального регулирования и токового управления разомкнутыми электроприводами постоянного и переменного тока на примере их пуска.

Метод решения

Аналитический и численный анализ математических моделей электроприводов, полученных в работе [1], и экспериментальная проверка адекватности результатов.

Аналитическое исследование матмоделей электродвигателей постоянного тока

Аналитическое исследование полученных в [1] матмоделей производилось для установившегося режима после прямого пуска, когда для электродвигателей постоянного тока производные переменных величин должны быть нулевыми.

Так, например, матмодель ДПТ НВ в этом случае преобразуется к виду

$$\begin{cases} \tau_1(e_{ия}^0 - i_b^0 \cdot \omega^0) - \tau_2 \cdot (1 + \rho_1) \cdot i_a^0 = 0, \\ e_{ув}^0 - (1 + \rho_2) \cdot i_e^0 = 0, \\ i_a^0 \cdot i_e^0 - M_{cm}^0 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь и далее все будет записываться в обозначениях статьи [1]. Решая систему уравнений (1), можно получить значение установившейся скорости

$$\omega^0 = (1 + \rho_2) \cdot \left[\frac{e_{ия}^0}{e_{ув}^0} - (1 + \rho_1) \cdot (1 + \rho_2) \cdot \frac{\tau_2 \cdot M_{cm}^0}{\tau_1 \cdot (e_{ув}^0)^2} \right].$$

Отсюда видно, что пуск возможен при условии

$$e_{ия}^0 \geq (1 + \rho_1) \cdot (1 + \rho_2) \cdot \frac{\tau_2 \cdot M_{cm}^0}{\tau_1 \cdot e_{ув}^0}. \quad (2)$$

Это условие выполняется для реальных ($\rho_1 \neq 0, \rho_2 \neq 0$) источников напряжения или тока, а также для идеальных источников напряжения ($\rho_1 = 0, \rho_2 = 0$).

В случае же использования идеальных источников тока ($\rho_1 = \infty, \rho_2 = \infty$) условие пуска (2) невыполнимо, так как при этом $e_{ия}^0 \rightarrow \infty$ и $\omega_{уст}^0 \rightarrow \infty$.

Конкретный анализ матмодели ДПТ НВ для данного случая [1]

$$\frac{d\omega^0}{dt} = \tau_4 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 - M_{cm}^0)$$

показывает, что его решение при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$\omega^0 = \tau_4 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 - M_{cm}^0) \cdot \tau.$$

Видно, что пуск осуществляется по линейному закону, если $i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 > M_{cm}^0$, но для останова необходимо реализовать обратную связь по моменту нагрузки, уменьшающую токи в конце пуска так, чтобы $i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 = M_{cm}^0$. Следовательно, при токовом электропитании ДПТ НВ электропривод должен быть замкнутым.

Результаты анализа матмоделей сведены в таблицу 1, где аббревиатура означает:

ДПТ НВ – двигатель постоянного тока независимого возбуждения;

АД – асинхронный двигатель;

РИН – реальный источник напряжения;

ИИН – идеальный источник напряжения;

РИТ – реальный источник тока;

ИИТ – идеальный источник тока.

Таблица 1

Параметры пуска электродвигателей постоянного тока

№ п/п	Тип ЭД	Тип ИЭП	Установившиеся значения переменных	Условия пуска
1	ДПТ НВ	РИН	$\omega^0 = \frac{(1 + \rho_2) \cdot e_{ия}^0}{e_{ув}^0} - \frac{(1 + \rho_2)^2 \cdot \tau_2}{\tau_1 \cdot (e_{ув}^0)^2} \times$ $\times (1 + \rho_1) \cdot M_{cm}^0,$ $u_{я}^0 = e_{ия}^0 - \frac{(1 + \rho_2) \cdot \rho_1 \cdot \rho_4}{e_{ув}^0} \cdot M_{cm}^0,$ $i_{я}^0 = i_{ия}^0 = \frac{(1 + \rho_2)}{e_{ув}^0} \cdot M_{cm}^0, \quad u_{г}^0 = \frac{e_{ув}^0}{(1 + \rho_2)},$ $i_{г}^0 = i_{ув}^0 = u_{г}^0.$	$e_{ия}^0 > \frac{(1 + \rho_2) \cdot \tau_2}{\tau_1 \cdot e_{ув}^0} \times$ $\times (1 + \rho_1) \cdot M_{cm}^0.$

Продолжение табл. 1

№ п/п	Тип ЭД	Тип ИЭП	Установившиеся значения переменных	Условия пуска
		ИИН	$\omega^0 = \frac{e_{ия}^0}{e_{ув}^0} - \frac{\tau_2 \cdot M_{см}^0}{\tau_1 \cdot (e_{ув}^0)^2}, u_{я}^0 = e_{ия}^0, u_{г}^0 = e_{ув}^0,$ $i_{я}^0 = i_{ия}^0 = \frac{M_{см}^0}{e_{ув}^0}, i_{г}^0 = i_{ув}^0 = e_{ув}^0$	$e_{ия}^0 > \frac{\tau_2 \cdot M_{см}^0}{\tau_1 \cdot e_{ув}^0}$
		РИТ	Совпадает с РИН при $e_{ия}^0 = \rho_1 \cdot \tau_4 \cdot i_{ия}^0, e_{ув}^0 = \rho_2 \cdot i_{г}^0$	
		ИИТ	$\omega^0 = \tau_4 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 - M_{см}^0) \cdot \tau - \text{var},$ $u_{я}^0 = u_{ия}^0 = \tau_4 \cdot i_{ия}^0 + \tau_4 \cdot i_{ув}^0 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 - M_{см}^0) \cdot \tau - \text{var},$ $i_{я}^0 = i_{ия}^0, u_{г}^0 = u_{ув}^0 = i_{г}^0 = i_{ув}^0$	$i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 > M_{см}^0$ <p>Для установления после пуска $\omega^0 = \text{const}$ необходима обратная связь, задающая $i_{ия}^0 \cdot i_{ув}^0 = M_{см}^0$</p>
2	ДПТ пар. возб.	РИН	$\omega^0 = \frac{e_{ия}^0}{i_{в}^0} - \frac{\tau_2 \cdot M_{см}^0}{\tau_1 \cdot (i_{в}^0)^2} \cdot (1 + \rho_1) + \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \alpha_1 \cdot \rho_1,$ $u_{я}^0 = u_{ия}^0 = e_{ия}^0 - \frac{\rho_1 \cdot \tau_4 \cdot M_{см}^0}{i_{г}^0}, i_{я}^0 = \frac{M_{см}^0}{i_{г}^0},$	$e_{ия}^0 \geq \frac{2}{\alpha_2} \times$ $\times \sqrt{\frac{\rho_3 \cdot (1 + \rho_3)}{\alpha_1}} \times$ $\times \sqrt{M_{см}^0},$
			$u_{г}^0 = \alpha_2 \cdot u_{я}^0, i_{ия}^0 = i_{я}^0 + \alpha_1 \cdot i_{в}^0,$ $i_{г}^0 = \frac{\alpha_2 \cdot e_{ия}^0}{2 \cdot (1 + \rho_3)} \cdot (1 \pm \delta),$ $\delta = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \rho_3 \cdot M_{см}^0 \cdot (1 + \rho_3)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2^2 \cdot (e_{ия}^0)^2}}$	<p>одновременно</p> $e_{ия}^0 \geq \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot [(1 + \rho_1) \times$ $\times \frac{M_{см}^0}{i_{г}^0} - \alpha_1 \cdot \rho_1 \cdot i_{г}^0]$ <p>Установившаяся скорость может принимать два различных значения</p>
		ИИН	Совпадает с ДПТ НВ при $e_{ия}^0 = e_{ув}^0$	
		РИТ	Совпадает с РИН при $e_{ия}^0 = \rho_1 \cdot \tau_4 \cdot i_{я}^0$	
		ИИТ	$\omega^0 = \frac{\rho_1 \cdot i_{ия}^0 - \rho_3 \cdot i_{я}^0}{\rho_1 \cdot \alpha_2 \cdot (i_{ия}^0 - i_{я}^0)}, u_{я}^0 = \frac{1}{\alpha_2} \cdot u_{г}^0 =$ $= u_{ия}^0 = \frac{1}{\alpha_2} \cdot i_{г}^0, i_{г}^0 = (i_{ия}^0 - i_{я}^0) \cdot \alpha_1 = u_{г}^0,$ $i_{я}^0 = \frac{i_{ия}^0}{2} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \alpha_1 \cdot M_{см}^0}{i_{ия}^0}} \right)$	$i_{ия}^0 > 2 \cdot \sqrt{\alpha_1 \cdot M_{см}^0}$ <p>одновременно</p> $i_{ия}^0 > \frac{\rho_3 \cdot i_{я}^0}{\rho_1}$ <p>Установившаяся скорость может принимать два различных значения</p>

Окончание табл. 1

№ п/п	Тип ЭД	Тип ИЭП	Установившиеся значения переменных	Условия пуска
3	ДПТ посл. возб.	РИН	$\omega^0 = \frac{e_{ия}^0}{\sqrt{M_{ст}^0}} - \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \left(1 + \rho_1 + \frac{\rho_1}{\rho_3}\right),$ $u_{я}^0 = e_{ия}^0 - \rho_1 \cdot \tau_4 \cdot i_{я}^0 - \frac{1}{\alpha_2} \cdot u_{г}^0,$ $i_{я}^0 = i_{ия}^0 = u_{в}^0 = \sqrt{M_{ст}^0}$	$e_{ия}^0 > \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot M_{ст}^0 \times$ $\times \left(1 + \rho_1 + \frac{\rho_1}{\rho_3}\right)$
		ИИН	$\omega^0 = \frac{e_{ия}^0}{\sqrt{M_{ст}^0}} - \frac{\tau_2 \cdot \rho_1}{\rho_3}, u_{я}^0 = e_{ия}^0 - \frac{1}{\alpha_2} \cdot u_{г}^0,$ $i_{я}^0 = i_{ия}^0 = u_{г}^0 = \sqrt{M_{ст}^0}$	$e_{ия}^0 > \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot M_{ст}^0 \times$ $\times \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_3}\right),$ $\frac{\rho_1}{\rho_3} = \frac{R_{г}}{R_{я}}$
		РИТ	Совпадает с РИН при $e_{ия}^0 = \rho_1 \cdot \tau_4 \cdot i_{ия}^0$	
		ИИТ	$\omega^0 = \tau_4 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{я}^0 - M_{ст}^0) \cdot \tau - \text{var},$ $u_{я}^0 = \tau_4 \cdot i_{ия}^0 + \tau_4 \cdot i_{ия}^0 \cdot (i_{ия}^0 \cdot i_{ия}^0 - M_{ст}^0) \times$ $\times \tau - \text{var}, i_{я}^0 = u_{г}^0 = i_{ия}^0, u_{ия}^0 = u_{я}^0 + \frac{1}{\alpha_2} \times$ $\times u_{г}^0 - \text{var}$	$i_{ия}^0 > \sqrt{M_{ст}^0}$ <p>Для установле- ния после пуска $\omega^0 - \text{const}$ необ- ходима обратная связь, задающая</p> $i_{ия}^0 = \sqrt{M_{ст}^0}$

Исследование частотно-токового пуска асинхронного электродвигателя

Математическая модель асинхронного электродвигателя существенно нелинейна [1]

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{rx}^0}{d\tau} = -\tau_2 \cdot \Psi_{rx}^0 + \tau_2 \cdot \sqrt{(1 + k_r^2 \cdot \beta_N^2) \cdot (i_s^0)^2 - k_r^2 \cdot (\omega_1 - \nu_N \cdot \omega^0)^2} \cdot (\Psi_{rx}^0)^2, \\ \frac{d\omega^0}{d\tau} = \left(\frac{1}{\nu_N} \cdot \omega_1 - \omega^0 \right) \cdot (\Psi_{rx}^0)^2 - \tau_2 \cdot M_{ст}^0 \cdot \text{Sign} \omega^0, \end{cases} \quad (3)$$

поэтому точного аналитического решения она не имеет.

Численный анализ показывает, что при прямом частотно-токовом пуске АД от идеального источника тока наблюдается три различных случая: незапуск, запуск с колебаниями потока и скорости около установившегося значения, запуск с выходом «в разнос».

Общеизвестная рекомендация управлять АД с постоянством магнитного потока $\Psi_{rx} - \text{const}$ [2] приводит к преобразованию матмодели (3) к виду

$$\frac{d\omega^0}{dt} = a,$$

что позволяет найти при однонаправленном вращении ($Sign = 1$) точное решение

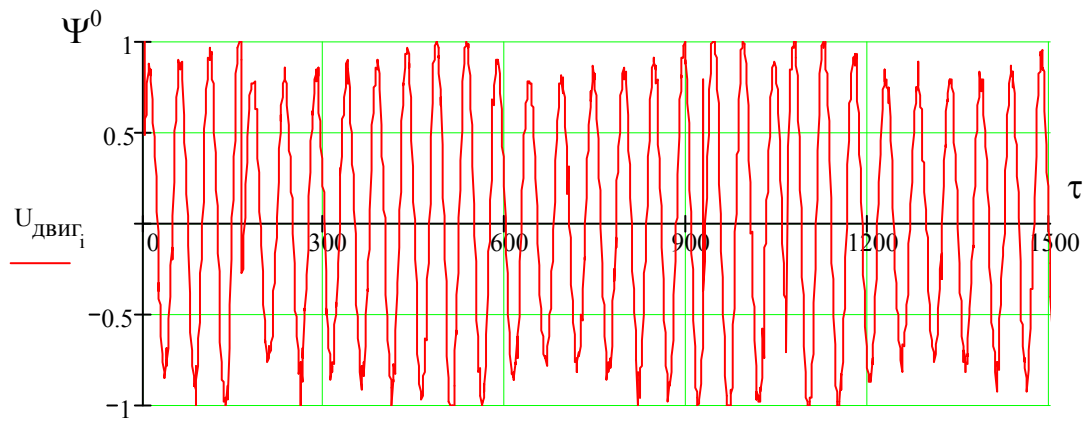
$$\omega^0 = a \cdot r,$$

$$\text{где } a = \frac{\Psi_{rx}^0}{k_r \cdot \nu_N} \cdot \sqrt{(1 + k_r^2 \cdot \beta_N^2) \cdot (i_s^0)^2 - (\Psi_{rx}^0)^2} - \tau_4 \cdot M_{cr}^0.$$

Отсюда видно, что получить установившуюся скорость можно, если в конце пуска с помощью обратной связи по моменту выполнить условие

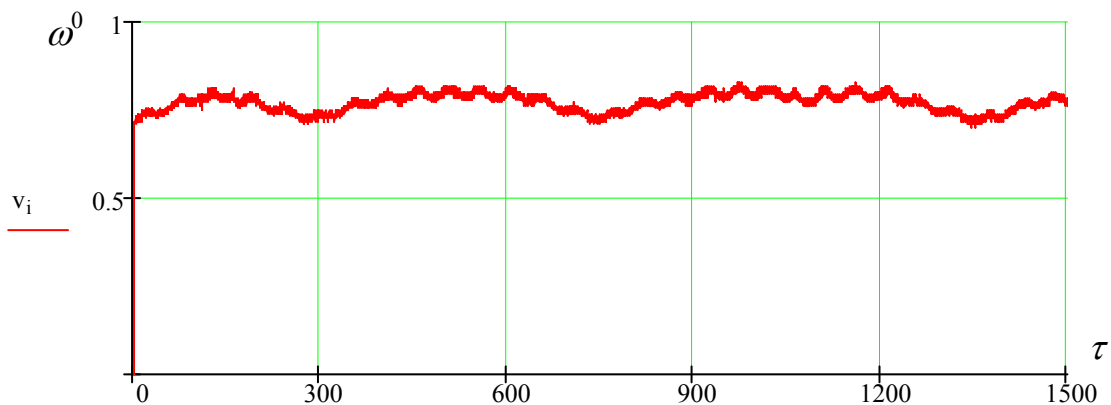
$$M_{cm}^0 = \frac{\Psi_{rx}^0}{k_r \cdot \nu_N \cdot \tau_4} \cdot \sqrt{(1 + k_r^2 \cdot \beta_N^2) \cdot (i_s^0)^2 - (\Psi_{rx}^0)^2}.$$

Экспериментальное исследование прямого частотно-токового пуска АД подтвердило наличие раскачивания скорости, что иллюстрируют временные диаграммы, представленные на рис. 1.



i

a)



i

б)

Рис. 1. Осциллограммы потокосцепления (а) и скорости (б) в конце прямого частотно-токового пуска АД

Заключение

Прямой пуск электроприводов постоянного и переменного тока от реальных и идеальных источников напряжения и реальных источников тока всегда возможен, если выполнены условия пуска.

При пуске двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением от реального и идеального источника тока установившаяся скорость может принимать два различных значения.

Пуск двигателей постоянного тока с независимым или последовательным возбуждением от идеальных источников тока возможен при наличии обратной связи по моменту.

Частотно-токовый пуск АД от идеального источника тока требует стабилизацию потока, дополнительно к обратной связи по моменту.

Полученный результат по ДПТ НВ совпадает, в частности, с известной работой [3].

Литература

1. Кривицкий С.О., Эпштейн К.И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. – М.: Энергия, 1970. – 149 с.
2. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергоиздат, 1981. – 143 с.

Получено 11.10.2002 г.