

## УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

**К.П. Акинин**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Предложены схемы нагрузочных устройств на основе бесконтактного двигателя с постоянными магнитами. Представлена математическая модель нагрузочного устройства. Выполнены примеры расчета механических характеристик двигателя в режиме торможения. Библ. 4, рис. 2, табл. 2.*

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель с постоянными магнитами, нагрузочное устройство.

Определение механических характеристик электрических двигателей является важным этапом в процессе разработки и исследования электроприводов.

В работе [3] описан тормоз Прони (при использовании жгута и шкива) как основное средство создания тормозного момента, который уравнивается электромагнитным моментом двигателя и измеряется с помощью динамометра. Такой подход приемлем для исследования электроприводов малой мощности, причем время измерения момента двигателя ограничивается нагревом шкива и износом жгута.

Для исследования механических характеристик широкое распространение получила электромеханическая система, в которой вал испытуемого электродвигателя жестко соединен с нагрузочной коллекторной машиной постоянного тока [2]. Использование такой установки позволяет проводить длительные испытания исследуемого электродвигателя, при этом управление нагрузочной машиной постоянного тока и измерение ее тока и напряжения не вызывают затруднений. Недостатком такого нагрузочного стенда является использование коллекторной машины. Указанные недостатки могут быть устранены путем использования в качестве нагрузочной машины бесконтактного двигателя с постоянными магнитами (БДПМ), работающего в генераторном режиме.

Рассмотрим два варианта схем формирования механических характеристик нагрузочной машины на основе БДПМ. На рис. 1 и 2 показаны две такие схемы, где БД – нагрузочный двигатель – БДПМ; В – трехфазный мостовой выпрямитель; Т – транзистор; ЗТ – задатчик тока; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; ЗС – задатчик сопротивления; СС – схема сравнения; Р – регулятор.

Упомянутый транзистор работает в линейной области и обеспечивает в первом случае регулирование и стабилизацию тока на выходе выпрямителя, во втором – регулирование и стабилизацию активного сопротивления в цепи нагрузки выпрямителя.

Исследуем механические характеристики БДПМ, работающего в генераторном режиме, при разных значениях тока через транзистор и сопротивления транзистора. Расчеты проведем без учета механических потерь и потерь в железе электрической машины.

Расчетная модель электромеханической системы «БДПМ – трехфазный мостовой выпрямитель – транзистор» [1] может быть записана в матричной форме

$$[A] \cdot \frac{d}{dt} [i] = [B]. \quad (1)$$

Для обеспечения устойчивости процесса численного интегрирования дифференциаль-

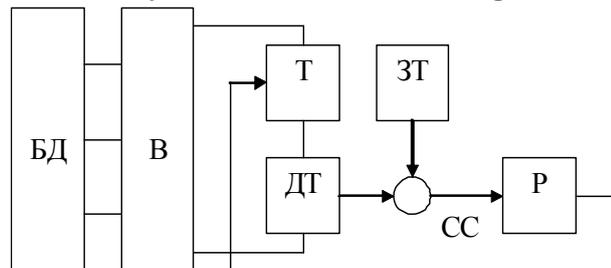


Рис. 1

ных уравнений модели (1) диоды трехфазного выпрямителя необходимо представить ветвями, состоящими из последовательно соединенных активных сопротивлений и индуктивностей [4]. В таком случае определим матрицы для уравнения (1):

$$[A] = \begin{bmatrix} L_A & -L_A - L_{V2} & 0 & L_{V1} & -L_{V2} \\ 2 \cdot L_A & L_A + L_{V3} & -L_{V3} & L_{V1} + L_{V3} & L_{V3} \\ 0 & L_{V2} & 0 & 0 & L_{V2} + L_{V5} \\ -L_{V4} & -L_{V2} & 0 & L_{V1} + L_{V4} & -L_{V2} - L_{V5} \\ -L_{V4} - L_{V6} & L_{V3} & -L_{V3} - L_{V6} & L_{V1} + L_{V3} + L_{V4} + L_{V6} & L_{V3} + L_{V6} \end{bmatrix};$$

$$[i] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_T \\ i_{V1} \\ i_{V5} \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} e_A - e_B - R_A \cdot (i_A - i_B) - R_{V1} \cdot i_{V1} + R_{V2} \cdot i_{V2} \\ e_A - e_C - R_A \cdot (i_A - i_C) - R_{V1} \cdot i_{V1} + R_{V3} \cdot i_{V3} \\ -R_{V2} \cdot i_{V2} - R_T \cdot i_T - R_{V5} \cdot i_{V5} \\ -R_{V1} \cdot i_{V1} + R_{V2} \cdot i_{V2} + R_{V5} \cdot i_{V5} - R_{V4} \cdot i_{V4} \\ -R_{V1} \cdot i_{V1} + R_{V3} \cdot i_{V3} + R_{V6} \cdot i_{V6} - R_{V4} \cdot i_{V4} \end{bmatrix},$$

где  $e_A = (\omega_{\max}/\omega) \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ;  $e_B = (\omega_{\max}/\omega) \cdot E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 2 \cdot \pi/3)$ ;  $e_C = -e_A - e_B$ ;  $i_A, i_B, i_C, e_A, e_B, e_C$  – фазные токи и ЭДС статора;  $\omega_{\max}, \omega$  – максимальная и текущая электрические частоты вращения двигателя;  $E_m$  – амплитуда ЭДС статора при  $\omega_{\max}$ ;  $R_A, L_A$  – активное сопротивление и индуктивность обмотки статора двигателя;  $i_T$  – ток через транзистор;  $R_T$  – активное сопротивление транзистора;  $i_{Vi}, R_{Vi}, L_{Vi}$  – токи через диоды трехфазного выпрямителя, активные сопротивления и индуктивности эквивалентных схем диодов при  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , причем  $L_A/R_A \gg L_{Vi}/R_{Vi}$ . В открытом состоянии сопротивления диодов выпрямителя определяются в соответствии с вольтамперной характеристикой

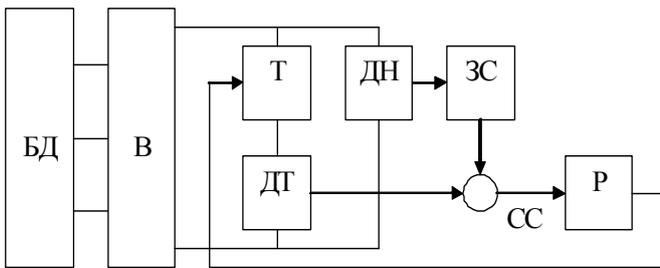


Рис. 2

$R_{V0} = u_V(i_V)/i_V$ . Определим также зависимые токи в ветвях схемы нагрузочного устройства:  $i_C = -i_A - i_B$ ;  $i_{V2} = i_B + i_{V5}$ ;  $i_{V3} = i_T - i_{V1} - i_B - i_{V5}$ ;  $i_{V4} = i_{V1} - i_A$ ;  $i_{V6} = i_T - i_{V1} + i_A - i_{V5}$ .

Для двух вариантов схем (рис. 1 и 2) активное сопротивление транзистора  $R_T$

определяется в соответствии с дифференциальными уравнениями, описывающими работу регулятора и схемы сравнения,  $\frac{dR_T}{dt} = k_R (I_3 - i_T)$  и  $\frac{dR_T}{dt} = k_R \left( \frac{u_d}{R_3} - i_T \right)$ , где  $R_T > 0$ ;  $I_3, R_3$  – величины задания тока через транзистор и активного сопротивления нагрузки выпрямителя;  $u_d$  – выходное напряжение выпрямителя;  $k_R$  – коэффициент передачи регулятора. Операция деления переменной величины  $u_d$  на заданную величину  $R_3$  реализуется в задатчике сопротивления (рис. 2).

Момент БДПМ определяется в соответствии с выражением

$$M = (i_A \cdot e_A + i_B \cdot e_B + i_C \cdot e_C) / \omega. \quad (2)$$

Для примера расчета механических характеристик рассматриваемого нагрузочного устройства используем данные БДПМ с одной парой полюсов и параметрами  $\omega_{\max} = 628 \text{ с}^{-1}$ ,

$E_m = 15 \text{ В}$ ,  $R_A = 0,45 \text{ Ом}$ ,  $L_A = 0,00011 \text{ Гн}$ . Коэффициент передачи регулятора полагаем  $k_R = 10^6$ . Трехфазный мостовой выпрямитель выполнен на основе шести параллельно соединенных пар диодов Шотки диодных сборок 63СТQ100.

Целью численного эксперимента по исследованию механических характеристик нагрузочного устройства является расчет точного значения момента БДПМ в соответствии с выражением (2) и приближенные расчеты момента на основании доступных для измерений параметров нагрузочного двигателя: частоты вращения  $\omega$ ; средних значений выходных напряжения  $U_{\text{Ср}}$  и тока  $I_{\text{Ср}}$  выпрямителя; действующего значения тока фазы статора  $I_A$ ; активного сопротивления фазы статора  $R_A$ , а также расчетного активного сопротивления  $R_V$  диода выпрямителя, определяемого на основании вольт-амперной характеристики диода и измеренного среднего тока  $I_{\text{Ср}}$ .

Таким образом, можно приближенно определить момент двигателя  $M_{\text{П}} = (U_{\text{Ср}} \cdot I_{\text{Ср}} + P_{\text{Эл}}) / \omega$ , где  $P_{\text{Эл}}$  – мощность электрических потерь в активных сопротивлениях статора и диодах выпрямителя, причем возможны два варианта приближенного расчета потерь:

$$P_{\text{Эл}} = 2 \cdot I_{\text{Ср}}^2 \cdot (R_A + R_V); \quad (3)$$

$$P_{\text{Эл}} = 3 \cdot I_A^2 \cdot (R_A + R_V). \quad (4)$$

Точность приближенного расчета момента двигателя может быть оценена с помощью формулы  $\Delta M = 100 \cdot (M - M_{\text{П}}) / M$ .

В табл. 1 и 2 приведены результаты численного эксперимента для двух вариантов схем нагрузочного устройства (рис. 1 и 2), соответствующих режимам задания тока через транзистор и активного сопротивления транзистора, где  $R_{\text{Ср}}$  – среднее значение активного сопротивления транзистора;  $\omega^*$  – относительная величина частоты вращения при базовом значении  $\omega_{\text{max}}$ ;  $\Delta M_1$ ,  $\Delta M_2$  – оценки точности расчета момента нагрузочного двигателя при расчете электрических потерь в соответствии с формулами (3) и (4).

Таблица 1

$I_{\text{Ср}}, \text{ А}$	$\omega^*$ , отн. ед.	$R_{\text{Ср}}, \text{ Ом}$	$M, \text{ Н}\times\text{м}$	$\Delta M_1, \%$	$\Delta M_2, \%$
6,0	1,0	3,09	0,235	-1,1	0,15
6,0	0,5	1,06	0,234	-3,4	0,44
6,0	0,25	0,08	0,229	-13,3	1,78
2,85	0,125	0,0	0,109	-14,7	2,04
3,0	1,0	7,08	0,118	-0,36	0,09
3,0	0,5	2,98	0,118	-0,99	0,21
3,0	0,25	0,94	0,118	-3,49	0,88
2,85	0,125	0,0	0,109	-14,7	2,04
1,5	1,0	15,1	0,0591	-0,12	0,06
1,5	0,5	6,87	0,0591	-0,33	0,14
1,5	0,25	2,75	0,0590	-1,07	0,46
1,5	0,125	0,71	0,0585	-4,18	0,17

Таблиця 2

$R_{cp}$ , Ом	$I_{cp}$ , А	$\omega$ , отн. ед.	$M$ , Н×м	$\Delta M_1$ , %	$\Delta M_2$ , %
3,09	6,0	1,0	0,235	-0,67	0,38
	2,92	0,5	0,115	-0,43	0,54
	1,37	0,25	0,0542	-0,21	0,91
	0,61	0,125	0,0239	-0,09	1,69
7,08	3,0	1,0	0,118	0,04	0,38
	1,46	0,5	0,0577	0,16	0,50
	0,69	0,25	0,0273	0,35	0,84
	0,31	0,125	0,0123	0,16	1,14
15,1	1,5	1,0	0,0592	0,23	0,36
	0,73	0,5	0,0289	0,34	0,48
	0,46	0,25	0,0138	0,36	0,62
	0,16	0,125	0,0065	1,14	0,61

Анализ результатов расчетов показал приемлемость использования приведенных приближенных формул для расчета момента двигателя. Для учета механических потерь и потерь в железе электрической машины необходимо проводить дополнительные исследования, описание которых не являлось целью этой статьи.

Использование БДПМ в качестве нагрузочной машины привлекательно для создания стенда для испытаний электроприводов ввиду преимуществ бесконтактной конструкции ротора. Причем изготовление стенда оказывается наиболее технологичным при использовании идентичных по установочным размерам испытуемого двигателя и нагрузочной машины.

Применение транзистора в цепи нагрузки выпрямителя позволяет реализовать простую в управлении схему электромеханического стенда для испытания электроприводов малой мощности, обеспечивающую бесконтактное изменение момента нагрузки испытуемого двигателя. Причем схема (рис. 1) позволяет сформировать моментные механические характеристики нагрузочной машины для испытания двигателей, функционирующих в режиме стабилизации частоты вращения. При использовании второй схемы (рис. 2) реализуются механические характеристики лучевого типа, что позволяет исследовать двигатели, работающие в режимах стабилизации как частоты вращения, так и момента. Вследствие рассеяния энергии на охладителе транзистора, мощность испытуемых двигателей должна ограничиваться на приемлемом уровне, например, до 100...150 Вт.

1. *Акинин К.П.* Особенности реализации тормозных режимов бесконтактных двигателей в электроприводах малой мощности // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2010. – Вип. 25. – С. 61–64.
2. *Губанов В.В., Торопов В.И.* Пособие к лабораторным работам по теории электропривода: Под. ред. Миллера Е.В. – М.: Высш. шк., 1968. – 58 с.
3. *Кенио Т., Нагамори С.* Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
4. *Плахтына Е.Г.* Математическое моделирование электро-машинно-вентильных систем. – Львов.: Вища шк., 1986. – 164 с.

УДК 621.313.17

**К.П. Акинин**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Пристрої для випробувань електроприводів малої потужності на основі безконтактних двигунів з постійними магнітами**

*Запропоновано схеми навантажувальних пристроїв на основі безконтактного двигуна з постійними магнітами. Наведено математичну модель навантажувального пристрою. Виконано приклад розрахунку механічних характеристик двигуна у режимі гальмування. Бібл. 4, рис. 2, табл. 2.*

**Ключові слова:** безконтактний двигун з постійними магнітами, навантажувальний пристрій.

**К.Р. Akynin**

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Systems for testing of low power electric drives on the basis of permanent magnet brushless motors**

*Test system schemes on the basis of permanent magnet brushless motor are proposed. Mathematical model of the testing schemes is presented. The computation of braking torque motor characteristics is made. References 4, figures 2, table 2.*

**Key words:** permanent magnet brushless motor, test system.

Надійшла 12.09.2013

Received 12.09.2013