

УДК 621.31.83.52

*Б. И. Фираго, С. В. Александровский*

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

UDC 621.31.83.52

*B. I. Firago, S. V. Aleksandrovsky*

## DYNAMIC BRAKING OF A SYNCHRONOUS MOTOR UNDER SCALAR FREQUENCY CONTROL

### **Аннотация**

Рассмотрен режим динамического торможения синхронного двигателя с постоянными магнитами при скалярном частотном управлении. Разработана структурная схема электропривода при динамическом торможении. Показано, что режим динамического торможения синхронного двигателя с постоянными магнитами является частным случаем работы вентильного двигателя с датчиком положения ротора при отключении обмотки статора от сети. Получены уравнения механических характеристики и метод расчета тормозных сопротивлений применительно к использованию динамического торможения в электроприводах грузоподъемных механизмов.

### **Ключевые слова:**

динамическое торможение, синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическая модель.

### **Abstract**

The dynamic braking of a permanent-magnet synchronous motor (PMSM) under scalar frequency control has been studied. A dynamic model block-diagram for the dynamic braking of electrical drive has been developed. It is shown that the dynamic braking of PMSM is a specific case for operating conditions of an electronically commutated PMSM with a rotor position sensor when a stator winding is disconnected from the power supply. The speed-torque characteristic equations have been obtained, as well as a technique for calculating braking resistance applied to dynamic braking in electrical drives of hoisting mechanisms.

### **Keywords:**

dynamic braking, permanent-magnet synchronous motor, mathematical model.

Раньше синхронные двигатели (СД) с электромагнитным возбуждением применялись в нерегулируемых электроприводах при мощностях выше 100 кВт и напряжении 3...10 кВ. В настоящее время при использовании постоянных магнитов для возбуждения синхронные двигатели широко применяются как вентильные двигатели с датчиком положения ротора (ДПР) при векторном управлении и при скалярном частотном управлении с независимым заданием частоты в диапазоне мощно-

стей от единиц киловатт до 300 кВт в различных промышленных и транспортных установках.

При скалярном частотном управлении ДПР не применяется. Поскольку постоянные магниты обеспечивают постоянный магнитный поток взаимодукции в СД, то достаточно применить пропорциональный закон частотного управления – напряжение, подаваемое на обмотку статора СД, изменяется пропорционально частоте, чтобы получить неизменный по величине макси-

мальный момент СД [1]. Это выгодно отличает СД от асинхронного двигателя, где при скалярном частотном управлении пропорциональный закон  $U/f = \text{const}$  не позволяет иметь постоянный максимальный (критический) момент двигателя. Кроме того, механическая характеристика СД является астатической по своей природе.

В регулируемом электроприводе важное значение имеют тормозные режимы. Основным тормозным режимом синхронного частотно-регулируемого электропривода является частотное торможение с возвратом энергии торможения в звено постоянного тока преобразователя частоты (ПЧ). Далее эта энергия может рассеиваться в тормозных сопротивлениях при односторонней передаче активной энергии из сети с помощью диодных выпрямителей или возвращаться в питающую сеть с помощью тиристорных или транзисторных рекуператоров [2].

Рекуперация энергии торможения в сеть предпочтительна, но она должна экономически быть обоснована. Современные рекуператоры энергии увеличивают стоимость преобразователя частоты более чем в 2 раза. Помимо этого, если рекуператор ставится на общую сеть постоянного тока, питающую несколько автономных инверторов напряжения (АИН), то по условиям надежности рекомендуется ставить резервный рекуператор, что также увеличивает стоимость преобразовательной установки. Кроме того, в ответственных установках требуется ставить аварийное резистивное торможение. Поэтому в каждом случае необходимо проводить довольно кропотливые технико-экономические расчеты по обоснованию вида электрического торможения электропривода.

Если преобладают тормозные режимы работы, например, как в некоторых грузовых канатных дорогах, то сразу более очевидным становится тормозной режим с рекуперацией в сеть энергии торможения. В других случаях

это менее очевидно.

Также следует иметь в виду, что качество рекуперлируемой электроэнергии зависит от вида (сложности) рекуператора. Тиристорный рекуператор простой, но качество рекуперлируемой энергии невысокое, т. к. сдвиг первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения сети зависит от угла открывания тиристорных.

Самым сложным является транзисторный рекуператор с ШИМ, обеспечивающий синусоидальную кривую тока и возможность ее сдвига относительно первой гармоники напряжения, т. е. с возможностью регулирования величины и знака реактивной энергии, и его применение должно иметь достаточное обоснование.

В настоящее время синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) применяются в электроприводах грузоподъемных механизмов, где необходимо иметь тормозной момент при нулевой частоте питающего двигателя напряжения, что соответствует динамическому торможению с независимым возбуждением. Трехфазная обмотка статора СД отключается от источника напряжения и замыкается на тормозные сопротивления (рис. 1).

Угловая частота  $\omega_1$  тока, протекающего по обмоткам статора, будет равна электрической угловой скорости  $\omega_{эл}$  ротора, т. е.

$$\omega_1 = \omega_{эл} = p_n \omega, \quad (1)$$

где  $\omega$  – механическая угловая скорость ротора;  $p_n$  – число пар полюсов.

Этот режим полностью соответствует режиму работы СДПМ при управлении от ДПР с угловой частотой  $\omega_1 = \omega_{эл}$  при отключении статора от источника напряжения, а также такому режиму работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), при котором обмотка якоря отключается от сети постоянного тока и замыкается на тормозное сопротивление [2, 3].

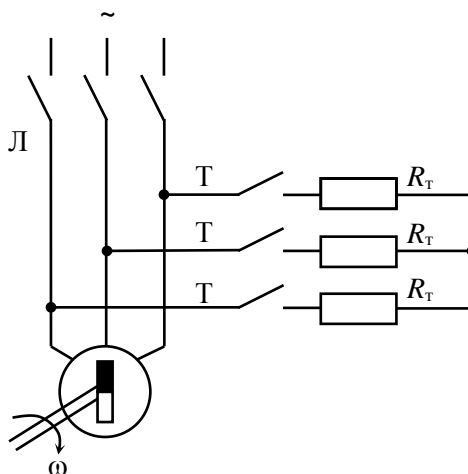


Рис. 1. Подключение СДПМ при использовании режима динамического торможения: Л – линейный контактор; Т – тормозной контактор; R<sub>т</sub> – тормозное сопротивление

Поскольку динамическое торможение синхронного двигателя с постоянными магнитами является частным случаем работы вентильного СДПМ при управлении от ДПР, целесообразно рассмотреть основные положения этого управления, а также на их основании получить необходимые соотношения для режима динамического торможения.

Трехфазный СДПМ получает напряжение от преобразователя частоты, управляемого с помощью ДПР, в функции угла положения ротора двигателя  $\omega_{эл}$  с угловой частотой  $\omega_1$ , равной электрической угловой скорости ротора  $\omega_{эл} = p_n \omega$ .

Первые гармоники напряжения на выходе ПЧ образуют трехфазную симметричную систему

$$\left. \begin{aligned} u_{1a} &= U_{1m} \sin(\omega_{эл}t); \\ u_{1b} &= U_{1m} \sin\left(\omega_{эл}t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_{1c} &= U_{1m} \sin\left(\omega_{эл}t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $U_{1m}$  – амплитудное значение первой гармоники фазного напряжения СДПМ.

Преобразование трехфазного напряжения (2) в двухфазное  $[u_{1\alpha} \ u_{1\beta}]^T$  осу-

ществляется по правилам фазных преобразований переменных [2] по выражению

$$\begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}u_{1a} \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(u_{1b} - u_{1c}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Подстановка (2) в (3) позволяет найти составляющие вектора двухфазного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= U_{m\alpha} \sin(\omega_{эл}t); \\ u_{1\beta} &= U_{m\alpha} \cos(\omega_{эл}t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $U_{m\alpha}$  – амплитудное значение первой гармоники фазного напряжения эквивалентного двухфазного СДПМ,

$$U_{m\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}}U_{1m} = \sqrt{3}U_1; \quad (5)$$

$U_1$  – действующее значение фазного напряжения,  $U_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}$ .

С целью получения структурных схем и создания системы управления СДПМ двухфазный вектор напряжения  $[u_{1\alpha} \ u_{1\beta}]^T$  преобразуется к осям  $d$ - $q$ , связанным с вращающимся ротором [3, 4]:

$$\begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{эл} & \sin \varphi_{эл} \\ -\sin \varphi_{эл} & \cos \varphi_{эл} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{эл} \\ \cos \varphi_{эл} \end{bmatrix} \cdot U_{m\alpha} = U_{m\alpha} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\varphi_{эл} = \omega_{эл}t$ .

Как видно, в осях  $d$ - $q$  СДПМ имеет

$$\left. \begin{aligned} u_{1d} &= 0; & i_{1d} &= 0; \\ u_{1q} &= \sqrt{3}U_1; & i_1 &= \sqrt{i_{1d}^2 + i_{1q}^2} = i_{1q} = \sqrt{3}i_{\phi}, \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $i_{\phi}$  – действующее значение фазного тока статора трехфазного СДПМ.

В результате в осях  $d$ - $q$  получаем следующую математическую модель СДПМ [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} U_{л} &= \sqrt{3}U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + E_{л}; \\ E_{л} &= p_{п} \Psi_{1d} \omega = c \omega; \\ M &= p_{п} \Psi_{1d} i_1 = c i_1; \\ c &= p_{п} \Psi_{1d} = p_{п} \Psi_m, \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $U_{л}$  – действующее значение линейного напряжения трехфазного СДПМ;  $E_{л}$  – действующее значение линейной ЭДС двигателя;  $\Psi_{1d}$  – действующее значение потокосцепления по оси  $d$ , равное действующему значению потокосцепления взаимной индукции  $\Psi_m$  по оси  $d$ ;  $i_1$  – действующее значение тока по оси  $q$ ;  $R_1$  – активное сопротивление фазы статора;  $L_1$  – индуктивность фазы статора;  $c$  – коэффициент СДПМ [2–4],

$$c = \frac{U_{л.ном}}{\omega_{0ном}} = \frac{M_{э.ном}}{I_{1ном}}; \quad (9)$$

$U_{л.ном}$  – действующее значение номинального линейного напряжения трехфазного СДПМ;  $\omega_{0ном}$  – номинальная угловая синхронная скорость СДПМ;  $M_{э.ном}$  – номинальный электромагнитный момент двигателя;  $I_{1ном}$  – действующее значение номинального тока по оси  $q$ .

Приведенная математическая модель (8) СДПМ в осях  $d$ - $q$  соответствует математической модели ДПТ НВ в осях  $\alpha$ - $\beta$  [2], где напряжение якоря  $U_{я}$  – это линейное напряжение

$U_{л} = \sqrt{3}U_1$  трехфазного СДПМ, а ток якоря  $i_{я}$  – это действующее значение тока СДПМ по оси  $q$ , при этом магнитный поток взаимной индукции  $\Phi$  – это действующее значение потокосцепления взаимной индукции по оси  $d$ , которое в  $\sqrt{3}$  раз больше действующего значения фазного потокосцепления  $\Psi_1$  трехфазного СДПМ.

При известном коэффициенте  $c$  можно определить действующее значение потокосцепления взаимной индукции по оси  $d$ :

$$\Psi_m = \Psi_{1d} = \frac{c}{p_{п}}. \quad (10)$$

Амплитудное значение потокосцепления по оси  $d$  с учетом синусоидальности кривой потокосцепления определяем следующим образом:

$$\Psi_{1d,m} = \sqrt{2} \Psi_{1d}. \quad (11)$$

Для получения структурной схемы СДПМ представим математическую модель (8) в виде

$$\left. \begin{aligned} U_{л} - E_{л} &= R_1 \left( i_1 + T_1 \frac{di_1}{dt} \right); \\ M &= c i_1, \end{aligned} \right\} (12)$$

где

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} \quad (13)$$

есть электромагнитная постоянная времени СДПМ.

Разделим левую и правую части уравнения электрического равновесия (8) на  $c$ :

$$\frac{U_{л}}{c} - \frac{E_{л}}{c} = \frac{R_1}{c} \left( i_1 + T_1 \frac{di_1}{dt} \right). \quad (14)$$

Обозначим:  $\omega_0$  – угловая скорость идеального холостого хода СДПМ,

$\omega_0 = \frac{U_{\text{л}}}{c}$ ;  $\omega$  – угловая скорость ротора СДПМ,  $\omega = \frac{E_{\text{л}}}{c}$ .

В результате получаем уравнение

$$\omega_0 - \omega = \frac{R_1}{c} \left( i_1 + T_1 \frac{di_1}{dt} \right). \quad (15)$$

Подставляя в (15)

$$i_1 = \frac{M}{c},$$

находим

$$\omega_0 - \omega = \frac{R_1}{c^2} \left( M + T_1 \frac{dM}{dt} \right). \quad (16)$$

Обозначим

$$\beta = \frac{c^2}{R_1} \quad (17)$$

как модуль жесткости механической характеристики СДПМ и запишем затем (16) с учетом (17) в операторной форме:

$$\beta [\omega_0(p) - \omega(p)] = (1 + T_1 p) M(p). \quad (18)$$

Этому операторному уравнению соответствует структурная схема СДПМ, приведенная на рис. 2.

В режиме динамического торможения СДПМ статор отключается от сети, тогда

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{л}}}{c} = 0$$

и операторное уравнение (18) принимает вид

$$\frac{\beta}{1 + T_1 p} \omega(p) = -M(p). \quad (19)$$

Этому уравнению соответствует структурная схема СДПМ в режиме динамического торможения на рис. 3.

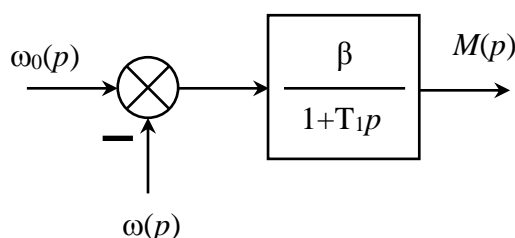


Рис. 2. Структурная схема вентильного СДПМ

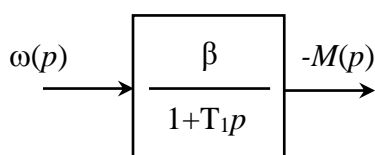


Рис. 3. Структурная схема СДПМ в режиме динамического торможения

Угловая скорость ротора  $\omega$  определяется из уравнения движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (20)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя;  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_c$  – статический момент, обусловленный нагрузкой.

Операторная форма уравнения движения имеет следующий вид:

$$\omega(p) = \frac{M(p) - M_c(p)}{Jp}, \quad (21)$$

которому соответствует структурная схема на рис. 4.

Динамическое торможение СДПМ будет определяться совместным действием электромагнитного момента двигателя и статического момента нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} -M(p) &= \frac{\beta\omega(p)}{1 + T_1p}; \\ \omega(p) &= \frac{M(p) - M_c(p)}{Jp}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Операторным уравнениям (22) соответствует структурная схема динамического торможения электропривода с СДПМ на рис. 5.

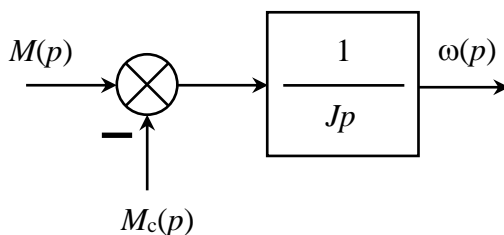


Рис. 4. Структурная схема, соответствующая основному уравнению движения электропривода

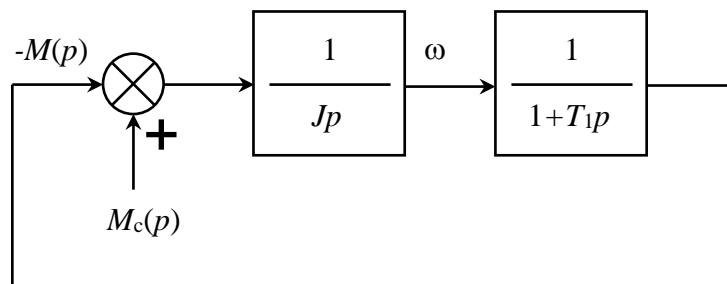


Рис. 5. Структурная схема динамического торможения электропривода с СДПМ

При этом следует учитывать, что при динамическом торможении активное сопротивление  $R_1$  обмотки статора состоит из собственного сопротивления обмотки статора  $R_{1,0}$  и тормозного сопротивления  $R_T$ , подключаемого к каждой фазе статора, т. е.

$$R_1 = R_{1,0} + R_T. \quad (23)$$

При этих условиях модуль жесткости механической характеристики рассчитывается как

$$\beta = \frac{c^2}{R_1} = \frac{c^2}{R_{1,0} + R_T}. \quad (24)$$

Механические характеристики СДПМ получаются из математической модели (22) для установившегося режима работы, когда  $p = \frac{d}{dt} = 0$ :

$$M = M_c = -\beta\omega, \quad (25)$$

откуда

$$\omega = -\frac{M_c}{\beta}, \quad (26)$$

причем модуль жесткости  $\beta$  механических характеристик определяется фор-

мулой (24), из которой видно, что с увеличением тормозного сопротивления  $R_T$  увеличивается наклон механических характеристик к оси абсцисс (рис. 6).

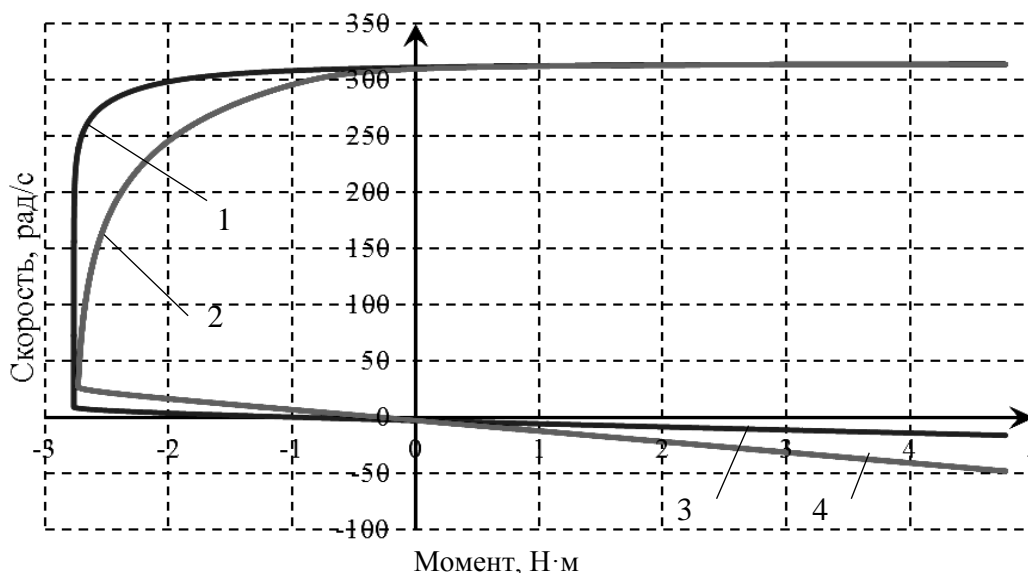


Рис. 6. Тормозные характеристики СДПМ: 1 – характеристика частотного торможения от  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{кон}$  при  $R_T = 0$ ; 2 – характеристика частотного торможения от  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{кон}$  при  $R_T = 3R_1$ ; 3 – механическая характеристика динамического торможения при  $R_T = 0$ ; 4 – механическая характеристика динамического торможения при  $R_T = 3R_1$

В грузоподъемных механизмах, работающих с постоянным активным статическим моментом  $M_c$ , динамическое торможение применяется для опускания грузов с малой скоростью, обычно принимают  $\omega_{оп} \leq (0,1 \dots 0,15)\omega_{ном}$ .

В этом случае при заданной скорости опускания груза  $\omega_{оп}$ , которая определяется технологическими условиями, необходимо рассчитать величину тормозного сопротивления  $R_T$ , включаемого в каждую фазу обмотки статора (см. рис. 1). На основании уравнений (24) и (26) находим величину этого сопротивления при заданном статическом моменте  $M_c$ :

$$R_T = \frac{c^2 \omega_{оп}}{M_c} - R_{1,0}. \quad (27)$$

Обычно принимают  $M_c = M_{с.ном}$ .

Коэффициент  $c$  можно рассчитать по (9).

### Заключение

На основе теории обобщенной электрической машины дано физико-математическое объяснение идентичности режимов динамического торможения для двигателя постоянного тока независимого возбуждения и синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Показано, что динамическое торможение СДПМ является частным случаем при управлении преобразователем частоты, питающим синхронный двигатель, в функции угла поворота ротора с угловой частотой, равной электрической угловой скорости ротора.

Получены структурные схемы электропривода с СДПМ при динамическом торможении и уравнения механических характеристик, которые можно применить для конкретных механизмов, работающих с постоянным статическим моментом, например, для получения

низких скоростей в электроприводе при                    подъемных механизмов.  
опускании грузов с помощью грузо-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фираго, Б. И.** Исследование переходных процессов в частотно-регулируемом синхронном электроприводе / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 59, № 6. – С. 507–518.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
4. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск : Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.

*Статья сдана в редакцию 4 октября 2018 года*

**Бронислав Иосифович Фираго**, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. E-mail: eapu@bntu.by

**Сергей Владимирович Александровский**, ст. преподаватель, Белорусский национальный технический университет.

**Bronislav Iosifovich Firago**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: eapu@bntu.by

**Sergey Vladimirovich Aleksandrovsky**, senior lecturer, Belarusian National Technical University.