

УДК 621.3.012

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-80-86

## Применение Т-образной схемы замещения для расчета статических характеристик и анализа энергетических режимов асинхронного двигателя

Л.Б. Масандилов, Н.М. Кураев

Приведены формулы для расчета статических механической и электромеханических характеристик асинхронного двигателя с использованием Т-образной схемы замещения, а также для зависимостей от скорости тока намагничивания, мощности на зажимах двигателя, угла между фазным напряжением и фазным током статора. С их помощью проанализированы и выделены три энергетических режима работы асинхронного двигателя: двигательный, генераторный рекуперативный и генераторный с одновременным потреблением электроэнергии от сети. Найдены значения скоростей на концах участка механической характеристики асинхронного двигателя, где имеет место генераторный рекуперативный режим.

По результатам расчетов и экспериментов определены особенности рекуперативного режима работы асинхронных двигателей, питающихся от преобразователей частоты. Установлено, что при снижении частоты питающего напряжения область генераторного рекуперативного режима уменьшается. Выявлено, что при частотах питающего напряжения ниже некоторой граничной частоты асинхронный двигатель ни при каких скоростях не отдает электрическую энергию источнику питания. Выведена формула для расчета граничной частоты.

Показаны расчетные статические характеристики асинхронных двигателей мощностью 5,5 кВт при частотах питающего напряжения 50, 25 и 10 Гц и мощностью 250 Вт при частотах питающего напряжения 20 и 13 Гц. Представлены экспериментальные статические характеристики асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт при частотах питающего напряжения 40 Гц и 20 Гц, на которых расположение генераторных режимов соответствует найденным ранее при теоретических исследованиях.

*Ключевые слова:* рекуперация, граничная частота, частотное управление, Т-образная схема замещения, энергетические режимы работы асинхронного двигателя, механическая характеристика.

*Для цитирования:* Масандилов Л.Б., Кураев Н.М. Применение Т-образной схемы замещения для расчета статических характеристик и анализа энергетических режимов асинхронного двигателя // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 80—86. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-80-86.

## Applying a T-Shaped Equivalent Circuit for Calculating the Static Characteristics of an Induction Motor and Analyzing Its Power Operation Modes

L.B. Masandilov, N.M. Kurayev

The article presents formulas for calculating the static mechanical and electromechanical characteristics of an induction motor proceeding from its T-shaped equivalent circuit, and for the magnetization current, power at the motor terminals, and angle between the stator phase voltage and current as functions of the rotor speed. The presented formulas were used for analyzing and identifying three different power operation modes of the induction motor: a motor mode, a recuperative generator mode, and a generator mode with simultaneous power consumption from the network. The performed calculations made it possible to find the motor speeds at the ends of the induction motor's mechanical characteristic part at which the motor operates in the recuperative generator mode.

An analysis of calculation and experimental results was carried out, based on which the specific features of the recuperative mode of an induction motor fed from a frequency converter have been determined. It is shown that the range of parameters corresponding to the recuperative generator mode decreases with decreasing the supply voltage frequency. It has been found that the induction motor becomes unable to generate any amount of power to the supply network below a certain critical supply voltage frequency regardless of its running speed. A formula for the critical frequency has been derived.

The calculated static characteristics for a 5.5 kW induction motor at the power supply frequencies equal to 50, 25, and 10 Hz, and for a 250 W motor at the power supply frequencies equal to 20 and 13 Hz are shown. The article also presents the experimental static characteristics of a 5.5 kW induction motor at the supply voltage frequencies equal to 40 and 20 Hz the location of generator modes in which is consistent with that found from the previous theoretical investigations.

*Key words:* recuperation, boundary frequency, frequency control, T-shaped equivalent circuit, induction motor power operation modes, mechanical characteristic.

*For citation:* Masandilov L.B., Kurayev N.M. Applying a T-Shaped Equivalent Circuit for Calculating the Static Characteristics of an Induction Motor and Analyzing Its Power Operation Modes. MPEI Vestnik. 2018;2:80—86. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-80-86.

При расчетах электропривода с асинхронным двигателем (АД) используют схемы его замещения. Для приближенного учета потерь в стали статора в намагничивающую ветвь схемы замещения последовательно с индуктивным сопротивлением взаимной индукции  $x_0$  вводят активное сопротивление  $R_{12}$ , электрические потери в котором равны потерям в стали. Его наличие существенно затрудняет расчеты, однако мало влияет на их результаты. Следует отметить, что при расчетах переходных процессов в электрических машинах не учитывают потери в стали, а сопротивление  $R_{12}$  обычно не учитывают при расчетах электроприводов. При анализе частотно-управляемых электроприводов сопротивление  $R_{12}$ , определяемое основными потерями в стали, при регулировании частоты меняется, что существенно усложняет расчеты. По мнению специалистов [2, с. 410], если  $R_{12} \ll x_0$ , то значение  $R_{12}$  не играет заметной роли при анализе процессов в машине и в расчетах им можно пренебречь.

На рис. 1 приведена Т-образная схема замещения асинхронной машины без учета магнитных потерь.

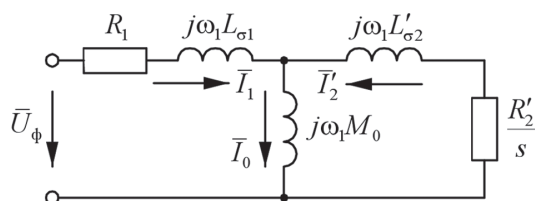


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

### Выводы формул статических характеристик асинхронного двигателя

В соответствии с Т-образной схемой замещения, изображенной на рис. 1, ее комплексное сопротивление представляется следующим образом:

$$Z = R_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} + \frac{j\omega_1 M_0 (R'_2 / s + j\omega_1 L'_{\sigma 2})}{R'_2 / s + j\omega_1 L'_{\sigma 2} + j\omega_1 M_0}, \quad (1)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f$  — круговая частота источника питания.

Запишем суммы полных индуктивностей контуров статора и ротора

$$L_s = M_0 + L_{\sigma 1}, \quad L_r = M_0 + L'_{\sigma 2} \quad (2)$$

и, подставив индуктивности рассеяния  $L_{\sigma 1}, L'_{\sigma 2}$  в (1), получим выражение

$$Z = R_1 + j\omega_1 (L_s - M_0) + \frac{j\omega_1 M_0 [(R'_2 + j\omega_1 s L_r) - j\omega_1 s M_0]}{R'_2 + j\omega_1 s L_r},$$

которое после несложных преобразований приведем к виду

$$Z = L_s \left( \frac{R_1}{L_s} + j\omega_1 \right) + \frac{M_0^2 \omega_1^2 s}{L_r \left( \frac{R'_2}{L_r} + j\omega_1 s \right)}.$$

Найдем ток статора в комплексной форме

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_\phi}{Z} = \frac{\bar{U}_\phi}{\sigma L_s \lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s + j\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)}, \quad (3)$$

где

$$\lambda_s = \frac{R_1}{L_s}; \quad \lambda_r = \frac{R'_2}{L_r}; \quad k_s = \frac{M_0}{L_s}; \quad (4)$$

$$k_r = \frac{M_0}{L_r}; \quad \sigma = 1 - k_s k_r; \quad \lambda'_s = \frac{\lambda_s}{\sigma}; \quad \lambda'_r = \frac{\lambda_r}{\sigma}.$$

Параметры, определяемые (4), назовем  $\lambda$ -параметрами Т-образной схемы замещения.

Для определения тока ротора в комплексной форме для Т-образной схемы рис. 1 запишем систему уравнений

$$\begin{cases} \bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2; \\ j\omega_1 M_0 \bar{I}_0 + \left[ \frac{R'_2}{s} + j\omega_1 (L_r - M_0) \right] \bar{I}'_2 = 0, \end{cases}$$

из которой следует равенство

$$\bar{I}'_2 = -\bar{I}_1 \frac{j\omega_1 s M_0}{R'_2 + j\omega_1 s L_r} = -\bar{I}_1 \frac{M_0}{L_r} \frac{j\omega_1 s}{\lambda_r + j\omega_1 s}.$$

Подставив в него ток статора из (3), получим ток ротора в комплексной форме

$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{U}_\phi}{\sigma L_s \lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s + j\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)} \cdot \frac{-j\omega_1 s k_r}{\lambda_r + j\omega_1 s}. \quad (5)$$

Вычислим ток намагничивания

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 = \frac{\bar{U}_\phi}{\sigma L_s \lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s + j\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)} \cdot (\lambda_r + j\omega_1 s (1 - k_r)). \quad (6)$$

Согласно формулам для токов (3), (5), (6), представленных в комплексной форме, выведем соответствующие действующие значения токов в действительной форме

$$I_1 = \frac{U_\phi}{\sigma L_s} \sqrt{\frac{\lambda_r^2 + (\omega_1 s)^2}{(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + [\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)]^2}}; \quad (7)$$

$$I'_2 = \frac{U_\phi k_r}{\sigma L_s} \frac{\omega_1 |s|}{\sqrt{(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + [\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)]^2}}; \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{U_\phi}{\sigma L_s} \sqrt{\frac{\lambda_r^2 + [\omega_1 s (1 - k_r)]^2}{(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + [\omega_1 (\lambda'_r + s \lambda'_s)]^2}}. \quad (9)$$

Подставив ток ротора из (8) в известную формулу  $M\omega_0 s = 3I_2'^2 R'_2$ , где  $\omega_0 = \omega_1 / p_\tau$  — скорость ротора при идеальном холостом ходе,  $p_\tau$  — число пар полюсов, найдем выражение для электромагнитного момента АД

$$M = \frac{3p_{\tau}U_{\phi}^2(1-\sigma)}{\sigma L_s} \frac{\omega_1 s \lambda'_r}{(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + [\omega_1(\lambda'_r + s \lambda'_s)]^2}, \quad (10)$$

с использованием которого определены критические значения скольжения и момента

$$s_k = \pm \frac{\lambda'_r}{\omega_1} \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \lambda_s'^2}{\omega_1^2 + \lambda_s'^2}}, \quad (11)$$

$$M_k = \frac{1,5p_{\tau}U_{\phi}^2(1-\sigma)}{\sigma L_s \left[ \omega_1 \lambda'_s (1-\sigma) \pm \sqrt{(\omega_1^2 + \lambda_s'^2)(\omega_1^2 + \lambda_s'^2)} \right]}.$$

Выбирая в (11) знаки «+» или «-», можно получить выражения для критических скольжения и момента, относящиеся к экстремальной точке, расположенной соответственно в правой или левой полуплоскостях ( $M, \omega$ ).

Для расчета мощности  $P_1$ , потребляемой АД от источника питания, воспользуемся формулой

$$P_1 = P_{\text{эм}} + P_{\text{эл}},$$

где  $P_{\text{эм}} = M\omega_0$  — электромагнитная мощность АД;

$\Delta P_{\text{эл}} = 3I_1^2 R_1$  — электрические потери в обмотке статора.

Подставив в формулу для  $P_1$  выражения (10) для момента и (7) для тока статора, получим формулу для мощности в виде

$$P_1 = \frac{3U_{\phi}^2}{\sigma L_s} \frac{\lambda'_s(\lambda_r^2 + \omega_1^2 s^2) + \omega_1^2 s \lambda'_r(1-\sigma)}{(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + [\omega_1(\lambda'_r + s \lambda'_s)]^2}. \quad (12)$$

Для определения угла  $\varphi_1$  между фазным напряжением и током статора используем известное выражение для мощности

$$P_1 = 3U_{\phi} I_1 \cos \varphi_1. \quad (13)$$

Подставим в (13) мощность и ток статора согласно (12) и (7)

$$\varphi_1 = \arccos \frac{\lambda'_s(\lambda_r^2 + \omega_1^2 s^2) + \omega_1^2 s \lambda'_r(1-\sigma)}{\sqrt{(\lambda_r^2 + \omega_1^2 s^2) [(\lambda'_s \lambda'_r \sigma - \omega_1^2 s)^2 + \omega_1^2 (\lambda'_r + s \lambda'_s)^2]}}. \quad (14)$$

Проведен уточненный анализ энергетических режимов АД.

### Энергетические режимы асинхронного двигателя

Каждой точке механической характеристики соответствует определенный энергетический режим работы АД. На рис. 2 изображена механическая характеристика АД в координатах ( $s, M$ ) и приведено традиционное обозначение областей энергетических режимов [2 — 6]. В [2, 3] указано, что вся область скольжений  $0 > s > -\infty$  соответствует генераторному режиму с отдачей энергии в сеть (режиму рекуперации), что не вполне корректно.

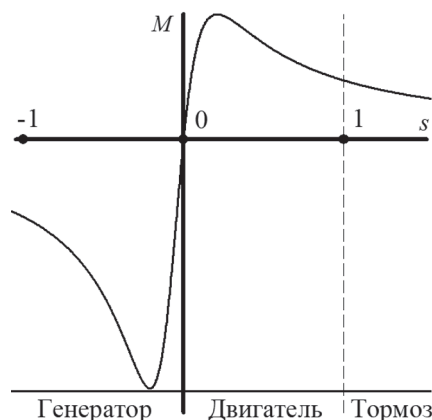


Рис. 2. Традиционное представление энергетических режимов работы АД

Действительно, в [7] выявлено, что в указанной области скольжений, кроме рекуперативного, возможны и другие энергетические режимы.

На рис. 3 изображены механическая характеристика и зависимость мощности от скольжения АД, а также обозначены энергетические режимы.

На рис. 2 область генераторного рекуперативного режима (ГР) располагается при отрицательных скольжениях  $s < 0$ . При  $1 < s < \infty$  обозначена область режимов электромагнитного тормоза [6] или тормоза [4, 5]. Авторы данной статьи полагают, что последние термины недостаточно четкие. Действительно, под словом тормоз понимается устройство для уменьшения скорости или полной остановки машины. Отметим, что режим противовключения, относящийся к режиму тормоза, используется в электроприводах механизма подъема для работы при постоянной скорости в процессе спуска грузов. Введем термин генераторного режима с потреблением электроэнергии от сети (ГПС). В таком режиме к валу АД поступает механическая мощность, преобразующаяся в электрическую. Одновременно с этим из сети в машину также поступает

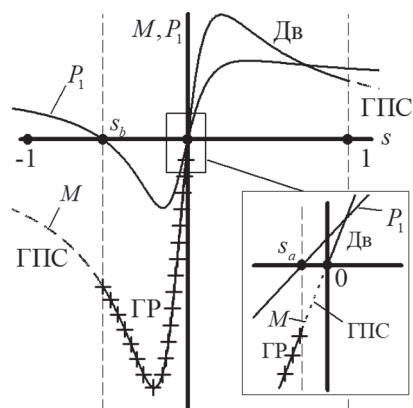


Рис. 3. Энергетические режимы работы АД в осях ( $s, M$ ): Дв — двигательный (—); ГР — генераторный с отдачей энергии в питающую сеть (рекуперативный режим) (-+); ГПС — генераторный с потреблением энергии от сети (- - -)

электрическая мощность, при этом оба потока превращаются в электрические потери в элементах электропривода (резисторах, обмотках и др.), как и в режиме противовключения.

Для выделения особенностей энергетических режимов АД следует проанализировать знаки активной мощности  $P_1$  на зажимах статора АД, соединенного с источником питания. Из (13) следует, что:

- если  $\varphi_1 < 90^\circ$ , то  $P_1 > 0$ , т. е. АД потребляет электрическую мощность от питающей сети, при этом он может работать в двигательном и генераторном (ГПС) режимах, отдавая преобразованную механическую мощность на вал и потребляя ее с вала;

- если  $\varphi_1 > 90^\circ$  то  $P_1 < 0$ , при этом АД отдает электрическую мощность в сеть (работает в рекуперативном генераторном режиме (ГР));

- если  $\varphi_1 = 90^\circ$  то  $P_1 = 0$ ; в данном случае электрическая мощность не берется от сети и не поступает в сеть, т. е. АД работает в режиме автономного генератора, когда поступающая с вала механическая мощность превращается в электрические потери в элементах электропривода (обмотках, резисторах и т. д.).

Для определения скольжений, при которых  $\varphi_1 = 90^\circ$ ,  $P_1 = 0$ , приравняем к нулю числитель дроби в (14) или (12) и решим получившееся уравнение

$$s^2 + s \frac{\lambda_r(1-\sigma)}{\lambda_s} + \left(\frac{\lambda_r}{\omega_1}\right)^2 = 0,$$

найдем границы генераторного рекуперативного и генераторного режимов с одновременным потреблением электроэнергии от источника питания

$$\left. \begin{aligned} s_a &= -\lambda_r \left[ \frac{1-\sigma}{2\lambda_s} - \sqrt{\left(\frac{1-\sigma}{2\lambda_s}\right)^2 - \frac{1}{\omega_1^2}} \right]; \\ s_b &= -\lambda_r \left[ \frac{1-\sigma}{2\lambda_s} + \sqrt{\left(\frac{1-\sigma}{2\lambda_s}\right)^2 - \frac{1}{\omega_1^2}} \right], \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

причем,  $|s_b| > |s_a|$ .

Скольжениям  $s_a, s_b$  соответствуют следующие угловые скорости ротора

$$\omega_a = \omega_0(1 + |s_a|); \quad \omega_b = \omega_0(1 + |s_b|). \quad (16)$$

Они определяют зоны скольжений

$$s_b < s < s_a \quad (17)$$

и соответствующие зоны угловых скоростей

$$\omega_a < \omega < \omega_b, \quad (18)$$

внутри которых АД работает в режиме рекуперативного торможения (генераторном режиме с отдачей электроэнергии в сеть).

На рис. 3 изображена зависимость  $P_1(s)$ , определяемая (12), и обозначены скольжения  $s_a, s_b$ , при которых  $P_1 = 0$ .

Согласно (15), (16), область режима рекуперативного торможения в плоскости  $(M, \omega)$  располагается принципиально выше точки идеального холостого хода  $\omega_0$ .

При условии  $[(1 - \sigma)/2\lambda_s] < (1/\omega_1)$  подкоренные выражения в (15) становятся отрицательными, следовательно, АД в данном случае не может работать в режиме рекуперативного торможения. Принимая подкоренное выражение в (15) равным нулю, найдем граничные значения круговой частоты  $\omega_{1,гр}$  и частоты изменения переменных статора АД  $f_{гр} = \omega_{1,гр}/2\pi$

$$\begin{aligned} \omega_{1,гр} &= \frac{2\lambda_s}{(1-\sigma)} = \frac{2R_1}{(M_0 + L_{\sigma 1})(1-\sigma)} = \\ &= \omega_{1,ном} \frac{2R_1}{(X_0 + X_1)(1-\sigma)}; \quad (19) \\ f_{гр} &= \frac{\lambda_s}{\pi(1-\sigma)} = f_{ном} \frac{2R_1}{(X_0 + X_1)(1-\sigma)}, \end{aligned}$$

ниже которых АД не может отдавать электрическую энергию источнику питания, при этом значения граничного скольжения и граничной угловой скорости определяются как

$$s_{гр} = -\lambda_r \frac{1-\sigma}{2\lambda_s} = -\frac{\lambda_r}{\omega_{1,гр}}; \quad \omega_{гр} = \omega_{1,гр}(1 - s_{гр}). \quad (20)$$

### Результаты расчетов и экспериментов

Для АД мощностью 5,5 кВт и 250 Вт с использованием параметров Т-образной схемы замещения по (10), (12), (14) при разных частотах питающего напряжения рассчитаны механические характеристики  $\omega(M)$  и зависимости  $\omega(P_1)$ ,  $\omega(\varphi_1)$  при 50, 25 и 10 Гц для АД 5,5 кВт и при 20 и 13,2 Гц для АД 250 Вт. Полученные зависимости приведены на рис. 4, 5.

Из рис. 4, а — в следует, что со снижением частоты питающего напряжения участок механической характеристики ( $\omega_a < \omega < \omega_b$ ), соответствующий режиму ГР, становится менее протяженным, а скорость  $\omega_a$ , при которой начинается ГР, отдалается от скорости холостого хода  $\omega_0$  (все зависимости построены в одинаковом масштабе по скорости).

Также, при скорости холостого хода  $\omega_0$  угол  $\varphi_1$  между фазными напряжением и током статора всегда меньше  $90^\circ$  и  $P_1 > 0$ . Поэтому на участке механической характеристики между скоростями  $\omega_0$  и  $\omega_a$  АД работает в режиме ГПС. Таким образом, со снижением частоты питающего напряжения протяженность этого участка увеличивается.

Со снижением мощности АД при низкой частоте питающего напряжения область ГР существенно уменьшается, а область ГПС ( $\omega_0 < \omega < \omega_a$ ) — увеличивается.

Для АД мощностью 250 Вт по (19) выявлена граничная частота (13 Гц), ниже которой генераторный режим с рекуперацией отсутствует, т. е. участок ме-

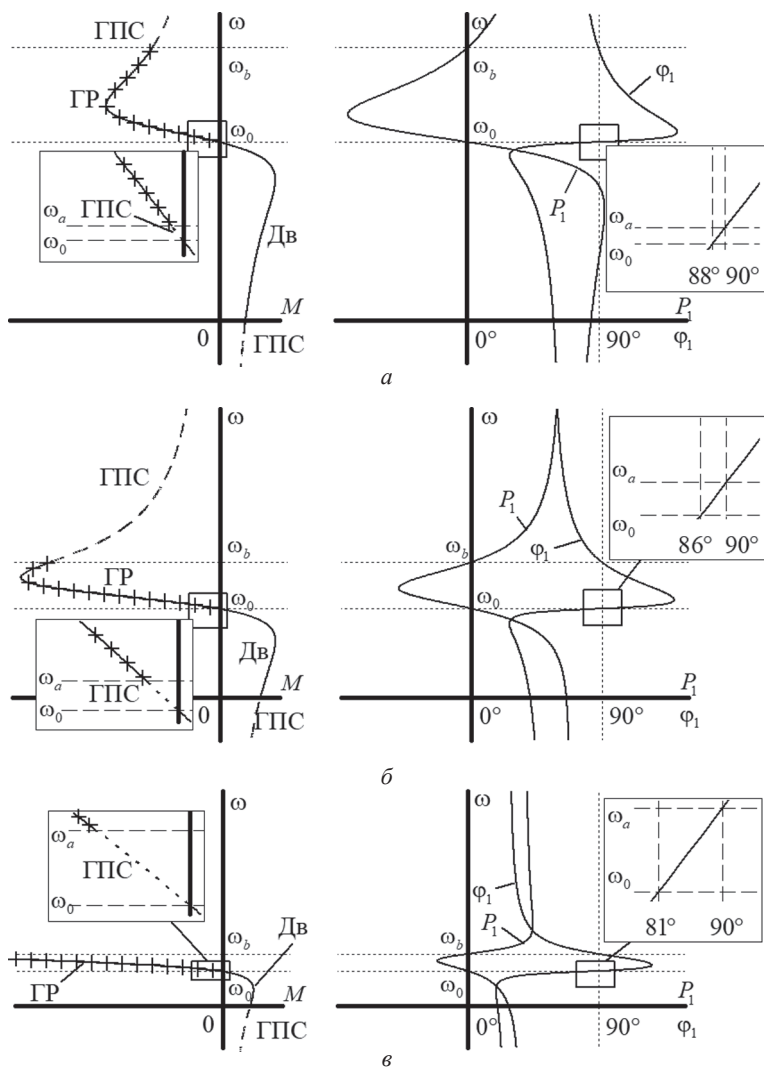


Рис. 4. Энергетические режимы работы АД 5,5 кВт при 50 (а), 25 (б) и 10 Гц (в)

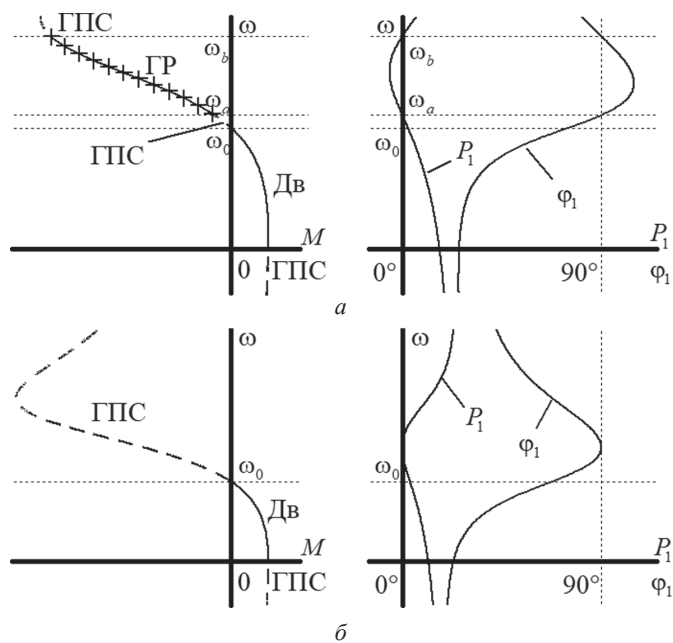


Рис. 5. Энергетические режимы работы АД 250 Вт при 20 (а) и 13 Гц (б)

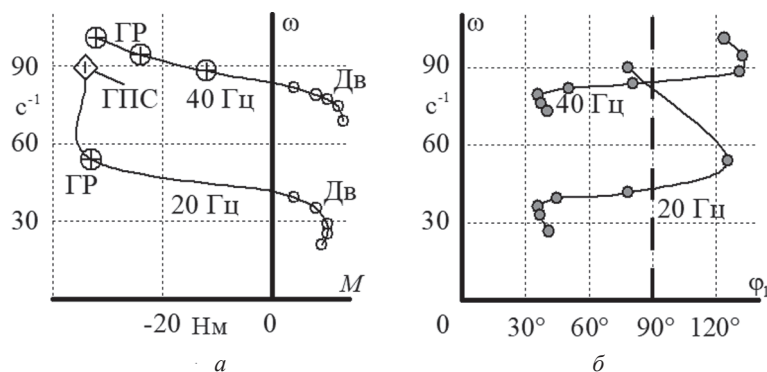


Рис. 6. Экспериментальные механические характеристики (а) и зависимости (б) для АД 5,5 кВт:  
 ○ — двигательный режим работы; ⊕ — режим ГР; ◇ — режим ГПС

механической характеристики при  $\omega > \omega_0$  соответствует режим ГПС. Из зависимостей  $\omega(P_1)$ ,  $\omega(\varphi_1)$  на рис. 5, б видно, что ни при каких скоростях мощность  $P_1$  не принимает отрицательных значений, а угол  $\varphi_1$  не превышает  $90^\circ$ . При скорости  $\omega_{гр}$  (на рисунке не обозначена), определяемой по (20),  $P_1 = 0$ ,  $\varphi_1 = 90^\circ$ .

Следует отметить, что отсутствие режима ГР при относительно большом диапазоне частот у АД небольшой мощности (до 13 Гц для АД 250 Вт), например в частотно-регулируемых электроприводах дверей лифта, позволяет отказаться от использования тормозного резистора.

Для подтверждения описанных энергетических режимов работы АД получены экспериментальные характеристики  $\omega(M)$  и  $\omega(\varphi_1)$  для АД мощностью 5,5 кВт при разных частотах питающего напряжения. На рис. 6 приведены зависимости при 40 и 20 Гц. Момент измеряли с помощью датчика крутящего момента, установленного на валу АД, скорости — с помощью энкодера, а угол  $\varphi_1$  между фазным напряжением и фазным током статора — по соответствующим осциллограммам с датчиков тока и напряжения.

Из рис. 6 следует, что со снижением частоты питающего напряжения участок механической характеристики, соответствующий режиму ГР, становится менее протяженным, а при скоростях, превышающих  $\omega_b$  (на рисунке не обозначена), имеет место режим ГПС (см. экспериментальную точку при скорости 90 с-1 на зависимостях при 20 Гц).

Таким образом, для установившихся режимов АД были выведены формулы механической, электро-механической и других статических характеристик с использованием Т-образной схемы замещения. Пока они не нашли большого распространения в расчетной практике, но вполне могут применяться при различных расчетах асинхронного электропривода, в частности, в системе Mathcad, где необходимы быстрые и точные расчеты.

Выведенные расчетные соотношения зависят от  $\lambda$ -параметров Т-образной схемы замещения АД

( $\lambda_s = R_1/L_s$ ,  $\lambda_r = R_2/L_r$  (4)), которые выражаются через элементы Т-образной схемы замещения и не зависят от частоты, что удобно при анализе частотно-управляемого асинхронного электропривода.

Каждой точке механической характеристики соответствует определенный энергетический режим работы АД. Выявлено, что в плоскости  $M(\omega)$  области энергетических режимов имеют следующие особенности:

- область генераторного рекуперативного режима (ГР) располагается в зоне скоростей  $\omega_a < \omega < \omega_b$  и имеет ограниченные размеры, которые существенно зависят от круговой частоты статора и с ее снижением уменьшаются; ниже определенной граничной частоты она вообще отсутствует;
- области генераторного режима с одновременным потреблением электроэнергии от источника питания (ГПС) располагаются выше области рекуперативного режима (в зоне скоростей  $\omega > \omega_b$ ), в зоне  $-\infty < \omega < \infty$  и в узкой зоне ( $\omega_0 < \omega < \omega_a$ ) между точкой идеального холостого хода и начальной точкой области рекуперативного режима.

**Литература**

1. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. М.: Изд-во Юрайт, 2015.
2. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М.: Академия, 2006.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2010.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
6. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины. М.: Высшая школа, 1988.
7. Машиностроение. Электроприводы. М.: Машиностроение, 2012. Т. IV-2.

---

**References**

---

1. **Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F.** Proektirovanie Elektricheskikh Mashin. M.: Izd-vo Yurayt, 2015. (in Russian).
2. **Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F.** Elektricheskie Mashiny. M.: Akademiya, 2006. (in Russian).
3. **Vol'dek A.I., Popov V.V.** Elektricheskie Mashiny. Mashiny Peremennogo Toka. SPb.: Piter, 2010. (in Russian).
4. **Vol'dek A.I.** Elektricheskie Mashiny. L.: Energiya, 1974. (in Russian).
5. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** Elektricheskie Mashiny. M.: Izd-vo MPEI, 2004. (in Russian).
6. **Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhovich A.E.** Elektricheskie Mashiny. Asinkhronnye Mashiny. M.: Vysshaya Shkola, 1988. (in Russian).
7. **Mashinostroenie.** Elektroprivody. M.: Mashinostroenie, 2012;IV-2. (in Russian).

---

**Сведения об авторах**

---

**Масандилов Лев Борисович** — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: MasandilovLB@mpei.ru

**Кураев Николай Михайлович** — кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: KurayevNM@mpei.ru

---

**Information about authors**

---

**Masandilov Lev B.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: MasandilovLB@mpei.ru

**Kurayev Nikolay M.** — Ph.D. (Techn.), Assistant of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: KurayevNM@mpei.ru

*Статья поступила в редакцию 04.07.2017*