

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

А.А. Багаев, С.В. Перепелица

Производительность, качество и удельные затраты энергии рабочих машин в сельском хозяйстве определяются параметрами самих рабочих машин и параметрами режимов их работы.

Параметры рабочих машин определяются на этапе их проектирования и изготовления. Параметры режимов работы многообразны и могут изменяться в широких пределах в процессе функционирования машины. Так режимы работы дробилок и дезинтеграторов всех типов в высокой степени зависят от величины их загрузки, от вида измельчаемого материала, степени его влажности, способа загрузки, расхода в единицу времени и некоторых других параметров.

Но все же основным фактором, определяющим параметры режима функционирования рабочей машины, является степень ее загрузки.

Главный привод машины, чаще всего, является нерегулируемым. Привод же загрузочного устройства – для управления подачей обрабатываемого материала должен быть регулируемым. Пределы регулирования скорости привода загрузочного устройства устанавливаются исходя из требований предъявляемых к технологическому процессу.

Для управления подачей обрабатываемого материала целесообразно применять регулируемый асинхронный электропривод.

В современном электроприводе он является наиболее быстро и динамично развивающимся направлением. Развитие именно этого направления связано, прежде всего, с высокими эксплуатационными свойствами асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

До недавнего времени, регулируемый асинхронный электропривод в нашей стране широко не применялся. Это было связано с отставанием отечественного производства от мирового уровня и отсутствием у потенциального потребителя достаточного количества информации.

По данным экспертов от 25 % до 50 % всех технологических агрегатов нуждаются в регулируемом электроприводе, а установлен он, в настоящее время, лишь на 5 % из них.

В связи с тем, что для измельчителей имеется необходимость в регулировании скорости привода загрузочного устройства важно определить возможность наиболее эффективного управления асинхронным двигателем этого привода.

Влияние изменений напряжения и частоты тока, подводимого к статору на электро-механические свойства асинхронного двигателя можно определить из выражения:

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 \Phi_{\mu \max}, \text{ приняв } E_1 = U_1.$$

Отсюда следует, что при неизменной частоте ( $f_1 = \text{const}$ ) изменения напряжения приводят к соответствующим изменениям магнитного потока двигателя.

Так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя насыщена, то повышение напряжения сверх номинального приводит, при прочих равных условиях, к быстрому возрастанию тока намагничивания  $I_{\mu}$ . У двигателя нормального исполнения ток холостого хода:

$$I_0 = I_{\mu 0} = (0.25 \div 0.35) I_{1 \text{ ном.}},$$

поэтому повышение напряжения на 20 ÷ 30 % может увеличивать ток холостого хода до значений, превышающих номинальный ток  $I_{1 \text{ ном.}}$ , и двигатель может нагреваться этим током сверх допустимой температуры даже при отсутствии полезной нагрузки на валу. При тех же условиях снижение напряжения вызывает снижение магнитного потока.

Следовательно, напряжение, приложенное к обмоткам статора асинхронного двигателя, при  $f = \text{const}$  может рассматриваться как управляющее воздействие, определяющее поток двигателя. Форма механических характеристик при  $f_1 = \text{const}$  и  $U_1 = \text{var}$  определяется соотношениями:

$$S_k = \pm R'_{2\Sigma} / \sqrt{(R_1^2 + X_k^2)};$$

$$M_k = 3U_1^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})],$$

из которых следует, что скольжение  $S_k$  при этом остается неизменным, а критический момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Изменения частоты тока  $f_1$  приводят к пропорциональному изменению величины  $\omega_0 = 2\pi f_1/p_{11}$ , но одновременно, при  $U_1 = \text{const}$  вызывают обратно пропорциональные изменения потока двигателя  $\Phi_\mu$ . Так как в номинальном режиме машина насыщена, при  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  допустимо только увеличение частоты  $f_1 \geq f_{1\text{ном}}$ , что вызывает соответствующее уменьшение потока  $\Phi_\mu$ . Увеличение  $f_1$  приводит к уменьшению критического момента из-за увеличения  $\omega_0$  и повышения реактансов рассеяния:  $x = x_k(f_{1\text{ном}}) \cdot k$ , где  $k = f_1/f_{1\text{ном}}$ . Критическое скольжение при этом тоже уменьшается, а скорость идеального холостого хода увеличивается.

При необходимости уменьшения частоты  $f_1 < f_{1\text{ном}}$ . Для снижения скорости  $\omega_0 < \omega_{\text{ном}}$  необходимо дополнительно изменять напряжение питания  $U_1$  таким образом, чтобы поток поддерживался примерно постоянным.

Соответственно наиболее эффективные возможности управления асинхронным двигателем обеспечиваются использованием в качестве управляющего воздействия в канале регулирования скорости – частоты  $f_1$ , а в канале регулирования магнитного потока – напряжения  $U_1$ .

Достижения последних лет в области разработки мощных транзисторов и тиристорных, управляемых системами, позволили создать и наладить промышленное производство малогабаритных преобразователей частоты.

Они обладают наименьшим числом ступеней преобразования энергии – содержат ступень преобразования переменного тока в постоянный и ступень инвертирования.

Применение преобразователей частоты несет в себе следующие положительные моменты:

- благодаря автоматическому энерго-сберегающему режиму экономится до 40% электроэнергии;

- срок службы электродвигателей увеличивается в три раза вследствие плавного пуска и отсутствия больших пусковых токов, что сохраняет обмотку двигателей, не создает избыточную нагрузку на подшипники и защищает двигатель от аварийных режимов.

Все это влечет за собой снижение эксплуатационных затрат, а следовательно – снижение себестоимости продукции.

Основными достоинствами современных преобразователей частоты являются:

- возможность подключения трехфазного двигателя к однофазной питающей сети;

- совместимость со всеми типами двигателей российского и зарубежного производства;

- оптимальная настройка под конкретное направление использования и вид нагрузки;

- простое управление для всего спектра мощностей;

- автоматический повторный запуск при сбое в сети;

- способность преобразователя устойчиво работать в силовых цепях с плохим качеством питающего напряжения (провалы, пропадание питающего напряжения);

- защита двигателя от низкого напряжения, перенапряжения, перегрузки по току, короткого замыкания, замыкания на землю, перегрева двигателя, обрыва фаз, неквалифицированного вмешательства в настройки;

- высокая перегрузочная способность (200% от номинального тока в течение 3 с и 150% от номинального тока в течение 60 с.).

Преобразователи частоты могут обладать свойствами источника тока или источника напряжения, т.е. либо формируют в фазах двигателя токи, которые не зависят от режима работы, а определяются только сигналом задания, либо создают напряжение, которое при изменении тока нагрузки остается постоянным.

Тиристорные преобразователи имеют следующую структурную схему:

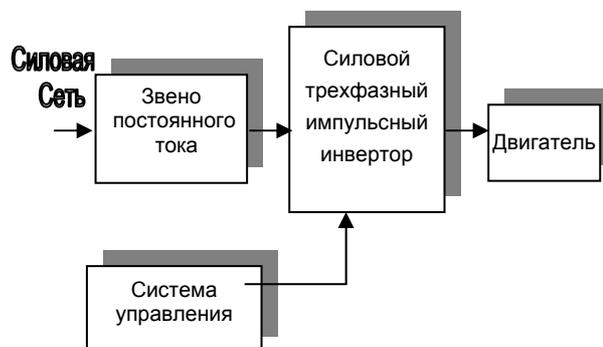


Рисунок 1 – Структурная схема вентильных преобразователей частоты

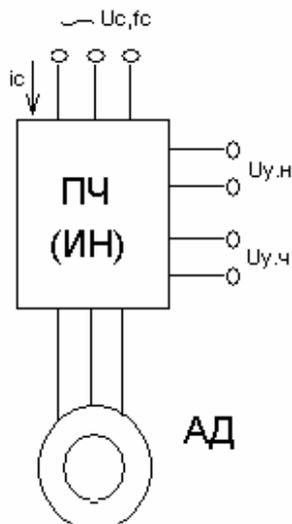
Звено постоянного тока преобразует переменное напряжение силовой сети в выпрямленное напряжение постоянного тока.

Силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка двигателя подсоединяется через соответствующий ключ к положительному и отрицательному полюсу звена постоянного тока. Инвертор преобразует выпрямленное напряжение постоянного

тока в трехфазное переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды, управляющее двигателем. В качестве силовых элементов используются мощные силовые IGBT транзисторы (модули).

Система управления осуществляет управление силовым инвертором.

Вентильный преобразователь, обладающий свойствами источника напряжения, имеет вход управления частотой  $U_{y.ч}$  и вход управления напряжением  $U_{y.н}$ .



$$U_{max} = k_{y.н} U_{y.н}$$

$$f_1 = k_{y.ч} U_{y.ч}$$

Рисунок 2 – Схема асинхронного электропривода с преобразователем частоты, имеющим свойства источника напряжения

Динамические процессы преобразования энергии в асинхронном двигателе при питании его от источника с неизменным напряжением, т.е. от источника напряжения описываются системой уравнений решенных относительно производной потокосцепления:

$$d\psi_{1x}/dt = U_{1x} - R_1 L_2 / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{1x} + R_1 L_{12} / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{2x} + \omega_{0эл.} \psi_{1y};$$

$$d\psi_{1y}/dt = U_{1y} - R_1 L_2 / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{1y} + R_1 L_{12} / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{2y} + \omega_{0эл.} \psi_{1x};$$

$$d\psi_{2x}/dt = -R_2' L_1 / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{2x} + R_2' L_{12} / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{1x} + (\omega_{0эл.} - \omega_{эл.}) \psi_{2y};$$

$$d\psi_{2y}/dt = -R_2' L_1 / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{2y} + R_2' L_{12} / (L_1 L_2 - L_{12}^2) \psi_{1y} + (\omega_{0эл.} - \omega_{эл.}) \psi_{2x};$$

$$M = P_n L_{12} / L_1 L_2 - L_{12}^2 (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}).$$

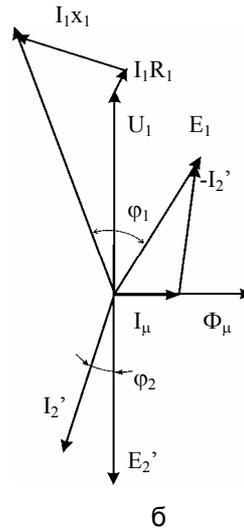
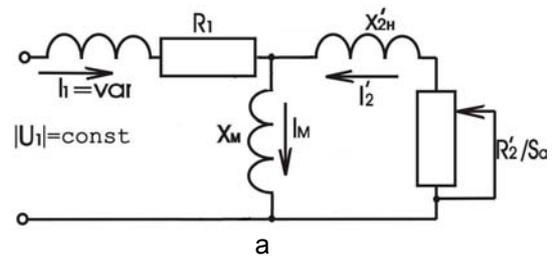


Рисунок 3 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при питании от источника напряжения

Рассмотрев линеаризованное уравнение механической характеристики  $M = f(s)$  для рабочего участка  $s_a < s_k$ :

$$(1 + 2T_э p + T_э p + T_э^2 p^2) M = 2M_k (1 + T_э p) / s_k (\omega_0 - \omega)$$

$/\omega_{0,ном.}$ , которое для окрестностей точки:  
 $M^0 = 0, s_a^0 = 0$  имеет вид:

$$(1 + T_э p) M = \beta (\omega_0 - \omega),$$

где  $\beta = 2M_k / \omega_{0,ном} s_k$  – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики.

Передаточная функция динамической жесткости выглядит следующим образом:

$$\beta_{дин.}(p) = M(p) / \omega(p) = -\beta / (1 + T_э p).$$

Сравнивая данные выражения с аналогичными, но выведенными для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, можно сделать заключение, что в пределах рабочего участка асинхронный двигатель, питающийся от источника напряжения, имеет свойства, аналогичные динамическим свойствам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Так как критическое скольжение двигателей лежит в пределах  $s_{кр.} = 0,05 - 0,5$ , причем меньшие значения соответствуют мощным двигателям, электромагнитная постоянная двигателя при питании от источника напряжения невелика:

$$Tэ = 1 / \omega_{0эл. ном} s_k = (0,06 \div 0,006) \text{ с.}$$

Частота на выходе преобразователя, обладающего свойствами источника тока, определяется входом управления амплитудой  $U_{у.т.}$ , частотой тока  $U_{у.ч.}$  и входом управления фазой тока  $U_{у.ф.}$  (рис. 4).

В отличие от питания от источника напряжения, при питании от источника тока можно изменить частоту, не изменяя сигнала задания тока. Однако и в этом случае для обеспечения определенных условий протекания процессов электрохимического преобразования энергии, задание тока в схеме (рис. 4) изменяют в функции задания частоты по тем или иным законам частотного управления.

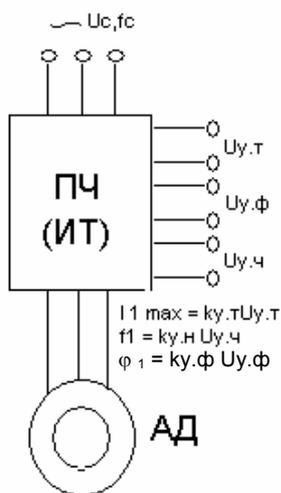


Рисунок 4 – Схема преобразователя частоты, имеющего свойства источника тока

При этом, уравнение механических характеристик выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} i_{1x} &= 0; i_{1y} = I_{1max} - \text{const}; \\ 0 &= i_{2x}' R_2' + d\psi_{2x}/dt - (\omega_{0эл.} - \omega_{эл.}) \psi_{2y}; \\ 0 &= i_{2y}' R_2' + d\psi_{2y}/dt + (\omega_{0эл.} - \omega_{эл.}) \psi_{2x}; \\ M &= P_n L_{12} I_{1max} i_{2x}'. \end{aligned}$$

Соответственно, потокоцепления:

$$\begin{aligned} d\psi_{2x} &= L_{12} i_{1x} + L_2 i_{2x}' = L_{12} i_{2x}'; \\ d\psi_{2y} &= L_{12} i_{1y} + L_2 i_{2y}' = L_{12} I_{1max} + L_{12} i_{2y}'; \end{aligned}$$

Для двухфазной системы уравнение

Класса:

$$M = 2 M_{k1} / [(1 + T_{э1p}) (S_{k1}/S_a (1 + T_{э1p})) + S_a/S_{k1}],$$

где  $M_{k1}$  – критический момент для схемы питания от источника тока.

Для двухфазной модели:

$$M_{k1} = I_{1ном}^2 X_{мн}^2 / [2\omega_{0 ном} (X_{мн} + X_{2н}')];$$

Для трехфазной машины:

$$M_{k1} = 3/2 [I_1^2 X_{мн}^2 / (\omega_{0 ном} (X_{мн} + X_{2н}')]);$$

При питании от источника тока принимаем  $|i_1| = \text{const}$ ,  $E_2' = i_2' R_2' / S_a + j i_2' X_{2н}'$ .

Величина  $S_a = (\omega_0 - \omega) / \omega_{0н}$  – абсолютное скольжение – равно отношению разности скорости ротора и скорости поля при частоте  $f_r$  к скорости поля при  $f = 50$  Гц.

Схема замещения и векторные диаграммы при питании от источника тока, если пренебречь  $\mu$ , приведены на рис. 5.

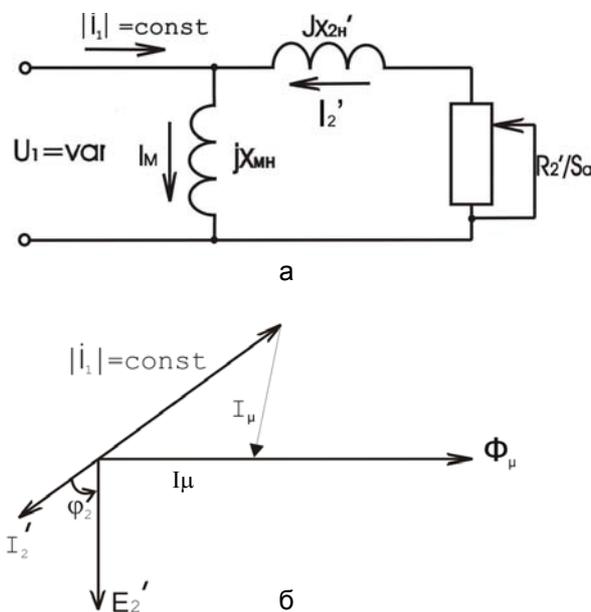


Рисунок 5 – Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при питании от источника тока

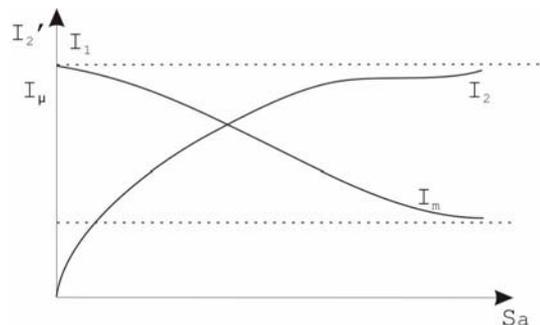


Рисунок 6 – Зависимости  $I_2'$  и  $I_\mu$  для режима питания асинхронного двигателя от источника тока

Согласно схеме замещения (рис. 5):

$$i_2' = I_1 (x_{\mu 2}' / \sqrt{[(R_2' / S_a)^2 + (x_{\mu n} + x_{2n}')^2]});$$

$$I_{\mu} = I_1 / \sqrt{[(R_2' / S_a)^2 + x_{2n}'^2]} / \sqrt{[(R_2' / S_a)^2 + (x_{\mu n} + x_{2n}')^2]}.$$

При неизменном токе  $I_1$  токи  $i_2'$  и  $I_{\mu}$  изменяются в зависимости от  $S_a$  (рис. 6).

Зависимости показывают, что с увеличением скольжения ток ротора  $i_2'$  возрастает, стремясь к предельному значению  $= I_1$ .

Одновременно с этим намагничивающий ток, который при  $S_0 = 0$  равен току  $I_1$ , с увеличением тока ротора непрерывно уменьшается, стремясь к значению  $I_{\mu \text{ рез.}} = 0$ .

Из этого можно сделать вывод, что отличительной особенностью режима питания от источника тока является изменение тока намагничивания ротора  $I_{\mu}$  в широких пределах при изменении скольжения  $S_a$ .

Аналогично – в широких пределах – изменяется и магнитный поток машины  $\Phi_{\mu}$ .

Данная закономерность является важным отличием режима питания от источника тока.

Уравнение механической характеристики для динамических процессов при питании двигателя от источника тока выглядит следующим образом:

$$M = 2M_{к1} / (1 + T_{э1}p) [s_{к1} / s_a (1 + T_{э1}p)] + s_a / s_{к1}.$$

Сравнив его с уравнением, соответствующим питанию двигателя от источника напряжения:

$$M = 2M_{к1} / (1 + T_{эp}) [s_{к1} / s_a (1 + T_{эp})] + s_a / s_{к1},$$

можно определить, что они совпадают по форме и отличаются лишь выражениями критического момента и электромагнитной постоянной времени.

$$T_{э} = 1 / \omega_{0\text{эл.ном.}Sk} = (x_{\mu n} + x'_{2n}) / (\omega_{0\text{эл.ном.}} R_2');$$

$$T_{э1} = 1 / \omega_{0\text{эл.ном.}Sk1} = (x_{1n} + x'_{2n}) / (\omega_{0\text{эл.ном.}} R_2').,$$

где  $T_{э} \ll T_{э1}$ .

Таким образом, влияние электромагнитной инерции в режиме питания от источника тока гораздо выше, чем при питании от источника напряжения.

Это является существенным недостатком преобразователей частоты, обладающих свойствами источника тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
2. Зонов А.М. Методика продаж преобразователей частоты. – Новосибирск. – 2001.
3. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Высшая школа, 1989. – 127 с.