

СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ЧАСТОТНОМ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

И.Г. Однокопылов¹, Ю.Н. Дементьев¹, Ю.В. Крохта¹,
Ари Абдулла Р. Рахим¹, Л.С. Удут¹, А.Д. Умурзакова^{1, 2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия,

² Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, Республика Казахстан

Актуальность исследований обусловлена широким применением частотно-управляемого асинхронного электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) в наиболее востребованных в промышленности системах регулируемого электропривода общепромышленных механизмов.

Целью исследований является анализ расчетных предельных статических характеристик, соответствующих либо номинальному значению напряжения АД, либо максимальному значению выходного напряжения инвертора преобразователя частоты (ПЧ) при заданном значении напряжения питающей сети для различных систем управления трехфазным инвертором, позволяющих оценить возможность получения требуемых скоростей при заданном моменте статической нагрузки в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе с векторным управлением.

Новизна исследований состоит в использовании предельной статической характеристики, формируемой функциональным преобразователем задания потокосцепления ротора разомкнутой по скорости системы ПЧ – АД при максимальном напряжении инвертора для выбора скорости начала ослабления потока АД в зависимости от его электромагнитного момента для достижения рабочего режима электропривода.

Методы исследования, описанные в статье, основаны на использовании теории электропривода, электрических машин, методов математического и имитационного моделирования с помощью современных программных пакетов и компьютерных средств.

В результате исследований установлено, что при недостаточном выходном напряжении инвертора ПЧ в асинхронном электроприводе с частотным векторным управлением формирование требуемых значений потока АД и его момента обеспечивается уменьшением его угловой скорости за счет уменьшения выходной частоты ПЧ. Причем начальную скорость ослабления потока АД следует выбирать в зависимости от фактического значения электромагнитного момента АД, используя для этого предельную статическую характеристику разомкнутой по скорости системы ПЧ – АД. Доказано, что в системах векторного частотного управления асинхронным электроприводом с выбором скорости начала ослабления потока АД в зависимости от электромагнитного момента АД имеется возможность поддержания оптимального значения потокосцепления АД в установившихся режимах его работы, позволяющая обеспечить больший момент при номинальном токе АД в установившемся режиме. Для уменьшения тока, потребляемого АД, и исключения его теплового перегрева при больших нагрузках следует задавать номинальное значение потокосцепления, а при малых нагрузках уменьшать значение задания потокосцепления.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотное управление, векторное управление, трехфазный инвертор, предельные характеристики.

Введение

В системах регулируемого электропривода, применяющихся в настоящее время в промышленности и работающих в основном в продолжительных статических режимах с постоянным либо медленно изменяющимся моментом нагрузки, наибольшее распространение получил электропривод переменного тока на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, потребляющий более половины всей вырабатываемой электроэнергии [1].

Широкое применение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД) в наиболее востребованных в промышленности системах ре-

гулируемого электропривода (ЭП) можно объяснить его высокой надежностью, обусловленной отсутствием щеточно-коллекторного узла и постоянных магнитов, простотой конструкции, малыми габаритами и моментом инерции ротора, отсутствием коммутационных ограничений по скорости и току и т. д. Наибольшее распространение в практике построения систем автоматического управления (САУ) частотно-управляемого асинхронного электропривода, реализующих заданные статические показатели, на раннем этапе получил простейший пропорциональный закон управления амплитудой напряжения статора АД в функции

его частоты [2]. Однако в [3] доказано, что при таком законе управления невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики ЭП в широком диапазоне изменений частоты вращения и нагрузки вследствие влияния активного сопротивления и индуктивности рассеяния статора АД.

В этой связи в дальнейшем был разработан более перспективный принцип частотного векторного управления асинхронным ЭП [4–7], позволяющий рассматривать АД как двухканальный объект (аналог двигателя постоянного тока с независимым возбуждением) в координатной системе, ориентированной по вектору потокосцеплений ротора. Векторное частотное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором позволяет обеспечить независимое управление модулем вектора потокосцепления ротора и электромагнитным моментом. Благодаря этому в системах векторного управления появляется возможность реализовать двухзонное регулирование частоты вращения по аналогии с электроприводом постоянного тока.

В настоящее время особый интерес для исследования представляют предельные статические характеристики АД, соответствующие либо номинальному значению напряжения двигателя, либо максимальному значению выходного напряжения инвертора преобразователя частоты (ПЧ) при заданном значении напряжения питающей сети для различных систем управления трехфазным инвертором [8], позволяющие оценить возможность получения требуемых скоростей в зависимости от момента нагрузки в частотно-регулируемом электроприводе с векторным управлением.

Целью статьи является анализ расчетных предельных статических характеристик двигателя $\omega(M_{эм})$ и $\omega(I_{1ф})$ в разомкнутой по координате q системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ – АД) при заданном значении потокосцепления ротора, а также в замкнутой системе асинхронного электропривода (АЭП) с частотным векторным управлением с управляемым потоком.

Векторный метод частотного управления АД

Векторные системы частотного управления асинхронными двигателями реализуются на основе структурной схемы двухфазного двигателя во вращающейся системе координат d, q [5, 9–11]. В замкнутой системе векторного управления составляющая напряжения U_{1d} поддерживает постоянство потокосцепления ротора $\Psi_{2d} = \text{const}$, а составляющая напряжения U_{1q} обеспечивает равенство электромагнитного момента двигателя статическому моменту на валу $M_{эм} = M_c + \Delta M_{сдв}$ в установившемся режиме работы.

Система автоматического управления асинхронного электропривода с частотным векторным

управлением представляет собой две независимые, но взаимосвязанные системы регулирования: систему поддержания заданного значения потокосцепления ротора посредством тока I_d и систему поддержания заданного значения скорости посредством момента (тока I_q) двигателя. Система регулирования потокосцепления двигателя является вспомогательной и решает собственные задачи системы управления привода. Система регулирования скорости является главной в системе управления электропривода и обеспечивает соответствие его характеристик предъявляемым к нему требованиям. Естественно, что статические режимы работы электропривода как в разомкнутой, так и в замкнутой системе могут рассматриваться только при следующем допущении: система регулирования потока обеспечивает постоянство заданного значения потокосцепления ротора [5, 6, 12].

Если при неизменном напряжении питания асинхронного двигателя $U_{1ф} = \text{const}$ предположить, что система регулирования по координате d поддерживает постоянство потокосцепления $\Psi_{2d}(I_{1d}) = \text{const}$, то выполнение условия $M_{эм}(I_{1q}) = M_{эмзад}$ будет зависеть не только от значения составляющей напряжения по координате q

$$U_{1q} = \sqrt{(\sqrt{2} \cdot U_{1ф})^2 - U_{1d}^2},$$

но и, в первую очередь, от значения угловой скорости вращения АД.

Таким образом, если при неизменном напряжении АД принять потокосцепление равным $\Psi_{2d} = \Psi_{2dзад}$, то можно рассчитать статические характеристики двигателя $\omega(M_{эм})$ и $\omega(I_{1ф})$ в разомкнутой по координате q системе ПЧ – АД при заданном значении потокосцепления ротора.

Структурная схема АД в двухфазной вращающейся системе координат d, q для статического режима работы в асинхронном электроприводе по системе ПЧ – АД при частотном векторном управлении приведена на рис. 1.

Система уравнений, описывающая структурную схему рис. 1, может быть представлена в следующем виде:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q};$$

$$I_{1q} = \left(U_{1q} - \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \omega_{дв} - \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \cdot \Psi_{2d} \cdot \omega_{эл} \right) \cdot \frac{1}{R_{1э}};$$

$$I_{1d} = \left(U_{1d} + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \cdot \Psi_{2d} + \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q} \cdot \omega_{эл} \right) \cdot \frac{1}{R_{1э}};$$

$$\Psi_{2d} = I_{1d} \cdot L_m;$$

$$\omega_{эл} = z_p \cdot \omega_{дв} + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}}.$$

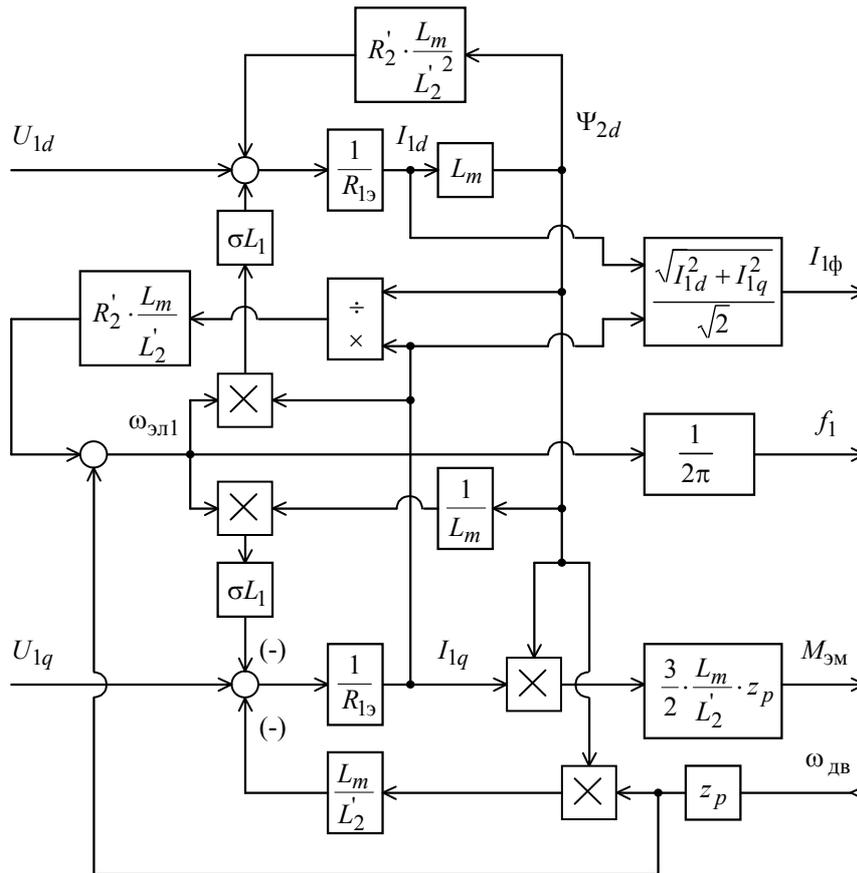


Рис. 1. Структурная схема АД в двухфазной вращающейся системе координат d, q для статического режима работы при векторном управлении

Как известно, при векторном управлении изменяется как модуль, так и пространственное положение вектора тока статора [10–13, 16]. Изменения вектора тока происходят таким образом, что проекция вектора тока статора \bar{I}_1 АД на ось d , ориентированную по вектору потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_2$, остается неизменной и ее можно определить для первой зоны регулирования скорости вращения АД ($f_1 \leq f_{1н}$) при потокосцеплении $\Psi_{2d} = \Psi_{2н} = \text{const}$ следующим образом

$$I_{1d} = \frac{\Psi_{2н}}{L_m} = \text{const}. \quad (1)$$

Составляющая I_{1q} вектора тока статора \bar{I}_1 , значение которой определяет момент двигателя, в установившемся режиме может быть найдена из следующего выражения

$$I_{1q} = \frac{M_{эм}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m'}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2н}}. \quad (2)$$

Для обеспечения условий (1) и (2) необходимо поддерживать значения напряжений U_{1d} и U_{1q} в соответствии с равенствами:

$$U_{1d} = R_{13} \cdot I_{1d} - R_2' \cdot \frac{L_m'}{L_2'^2} \cdot \Psi_{2н} - \frac{\sigma \cdot L_1 \cdot R_2' \cdot L_m'}{L_2' \cdot \Psi_{2н}} \cdot I_{1q}^2 - \sigma \cdot L_1 \cdot z_p \cdot I_{1q} \cdot \omega_{дв}; \quad (3)$$

$$U_{1q} = \left(R_{13} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_2'} \cdot R_2' \right) \cdot I_{1q} + \left(\frac{L_m'}{L_2'} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right) \cdot z_p \cdot \Psi_{2н} \cdot \omega_{дв}. \quad (4)$$

Действующее значение фазного напряжения двигателя $U_{1\phi}$ и его составляющие в двухфазной вращающейся системе координат d, q связаны следующим соотношением

$$\left(\sqrt{2} \cdot U_{1\phi} \right)^2 = U_{1d}^2 + U_{1q}^2. \quad (5)$$

Приведенные уравнения (1)–(5) позволяют рассчитать статическую механическую $\omega_{дв}(M_{эм})$ и электромеханическую $\omega_{дв}(I_{1\phi})$ характеристику, а также зависимость угловой скорости от частоты питающей сети $\omega_{дв}(f_1)$ для АД в разомкнутой по координате q системе ПЧ – АД при неизменном значении напряжения питания двигателя $U_{1\phi} = \text{const}$.

Кроме того, уравнения (1)–(5) позволяют определить требуемое максимальное значение напряжения $U_{и.макс}$, обеспечивающее работу двигателя при заданных значениях максимальной скорости электропривода и максимального момента статической нагрузки.

Практический интерес представляет расчет предельных характеристик двигателя, соответствующих либо максимально допустимому значению напряжения двигателя $U_{1фн}$, либо максимальному значению выходного напряжения преобразователя $U_{иф.макс}$ при заданном значении напряжения питающей сети. В первом из этих случаев предполагается, что напряжение питающей сети может быть выбрано по допустимому значению $U_{1ф.макс}$, во втором случае – напряжение сети задано и в свою очередь определяет максимальное значение выходного напряжения преобразователя $U_{иф.макс}$.

Системы управления трехфазных инверторов ПЧ

В настоящее время системы управления трехфазных инверторов ПЧ реализуются с простой синусоидальной ШИМ, с синусоидальной ШИМ и третьей гармоникой в управляющих сигналах, а также с векторной ШИМ. Системы с векторной ШИМ управляются синусоидальными сигналами и имеют характеристики, аналогичные синусоидальной ШИМ с наложением третьей гармоники [8].

В электроприводах с частотным векторным управлением система автоматического управления электропривода прежде всего формирует и под-

держивает постоянным заданный (в первой зоне номинальный) поток АД, а затем формирует требуемый момент [13–17]. При недостаточном напряжении инвертора формирование требуемых значений потока АД и главным образом момента возможно изменением ЭДС вращения, т. е. за счет уменьшения угловой скорости АД, что в системе ПЧ – АД достигается уменьшением частоты выходного напряжения инвертора:

$$f_1 = \frac{\omega_{эл1}}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(z_p \cdot \omega_{дв} + R'_2 \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}} \right), \text{ Гц.}$$

Таким образом, при векторном управлении основополагающим фактором при формировании потока и требуемого момента АД является выходное напряжение инвертора, значение которого можно определить по его регулировочной характеристике (рис. 2) и которое ограничено на уровне $U_{иф} = U_{иф.макс}$.

Как видно из рис. 2, ограничение напряжения инвертора сказывается только в верхней части диапазона регулирования скорости и практически не влияет на работу системы управления ПЧ в его нижней части. На рис. 3 для асинхронного электродвигателя АВ250S6 приведены естественная механическая характеристика 1 ($f_1 = 50$ Гц и $U_1 = U_{1фн} = 220$ В) и предельные механические характеристики 2, 3 и 4 разомкнутой системы ПЧ – АД соответственно для следующих трех случаев реализации системы управления трехфазным инвертором:

– $U_c = 400$ В, синусоидальная ШИМ с наложенной третьей гармоникой и $k = 1,1547$ ($U_{иф.макс} = 220$ В);

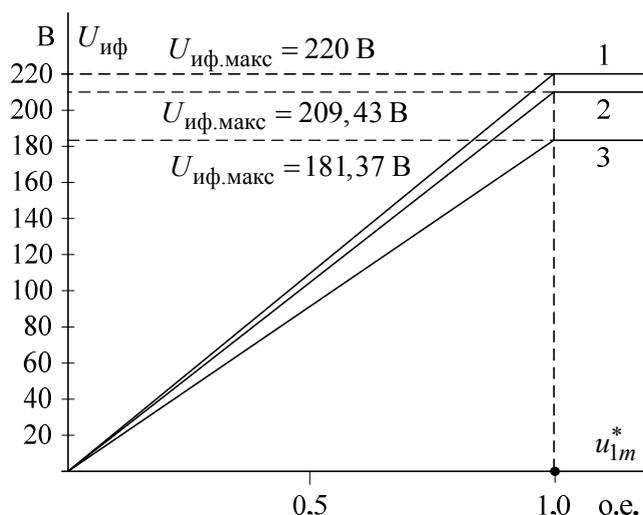


Рис. 2. Регулировочные характеристики инвертора напряжения: 1 и 2 – синусоидальная ШИМ с третьей гармоникой соответственно при $U_c = 400$ В и $U_c = 380$ В; 3 – простая синусоидальная ШИМ и $U_c = 380$ В

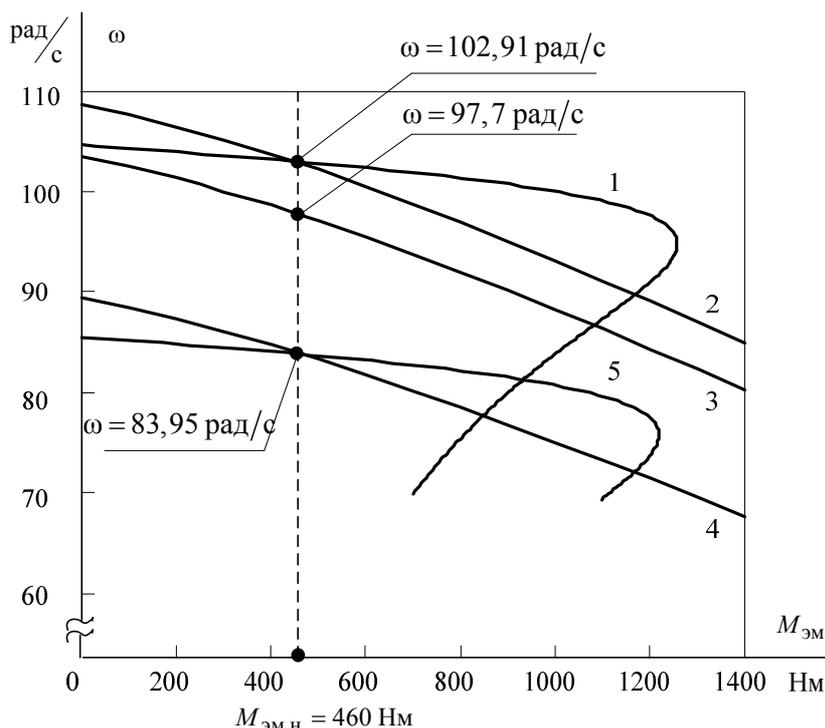


Рис. 3. Статические механические характеристики электродвигателя AB250S6: 1 – естественная характеристика при $f_{1н} = 50$ Гц и $U_{1фн} = 220$ В; 2, 3 и 4 – предельные характеристики разомкнутой системы ПЧ – АД при векторном управлении соответственно при $U_{1фмакс} = 220$ В, $U_{1фмакс} = 209,3$ В и $U_{1фмакс} = 181,37$ В; 5 – искусственная характеристика при $U_{1ф} = 181,37$ В и $f_1 = 41,22$ Гц

– $U_c = 380$ В, синусоидальная ШИМ с наложенной третьей гармоникой и $k = 1,1547$ ($U_{ифмакс} = 209,43$ В);

– $U_c = 380$ В, простая синусоидальная ШИМ ($U_{ифмакс} = 181,37$ В). Характеристика 5 представляет собой статическую механическую характеристику двигателя, рассчитанную при $U_{1ф} = 181,37$ В и

$$f_1 = 50 \cdot \frac{181,37}{220} = 41,22 \text{ Гц.}$$

Следует заметить, что в приведенных расчетах величин напряжений инвертора не учтено падение напряжения в цепи инвертора и оно принято равным $U_{1фмакс} = U_{ифмакс}$.

Анализ характеристик, представленных на рис. 3, показывает, что при питании ПЧ от сети с номинальным напряжением $U_c = 380$ В ограничение выходного напряжения инвертора приводит к существенному уменьшению диапазона регулирования скорости вращения АД в верхней части зоны регулирования при номинальном моменте нагрузки до значения скорости

$$\omega_{эпмакс} < \omega_{двн} \cdot \frac{U_{ифмакс}}{U_{1фн}}, \text{ рад/с,}$$

и уменьшению перегрузочной способности электропривода на высоких скоростях.

На рис. 4 приведены статические механические характеристики замкнутой системы электропривода с частотным векторным управлением асинхронным двигателем AB250S6, полученные при следующих условиях: $U_{1фмакс} = 209,43$ В, максимальный допустимый ток $I_{эпмакс} = 170$ А, соответствующий максимальному электромагнитному моменту двигателя $M_{эммакс} = 945$ Н·м.

Как видно из рис. 4, предельная характеристика 2 разомкнутой системы ограничивает максимальную скорость АЭП в первой зоне регулирования в зависимости от момента нагрузки. Например, при моменте $M_{эмн} = 460$ Н·м угловая скорость в точке 2 (т. 2) ограничена значением $\omega_2 = 97,7$ рад/с, а при максимальном моменте двигателя $M_{эммакс} = 945$ Н·м, – значением скорости в точке 1 (т. 1) $\omega_2 = 89$ рад/с.

Зная параметры АД и задавая значениями момента нагрузки и угловой скорости вращения двигателя, например $M = M_{эмн}$ и $\omega = \omega_{двн}$, по выражениям (1)–(5) можно определить требуемые

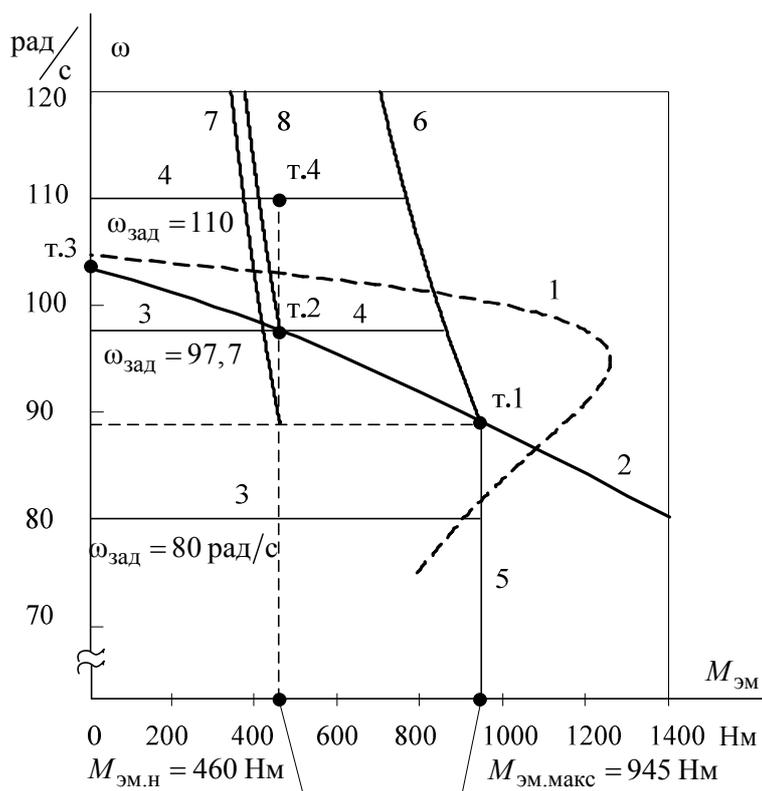


Рис. 4. Статические механические характеристики асинхронного электропривода с частотным векторным управлением: 1 – естественная характеристика двигателя AB250S6; 2 – предельная характеристика разомкнутой системы при $U_{1\text{ф макс}} = 209,43 \text{ В}$; 3, 4 – предельные характеристики замкнутой системы в первой и второй зонах; 5, 6 – характеристики кратковременно допустимой работы; 7, 8 – характеристики длительно допустимой работы

значения напряжений U_{1d} и U_{1q} для работы АД в заданной точке, а затем напряжения инвертора, звена постоянного тока и питающей сети по следующим выражениям:

$$U_{\text{иф макс}} = 1,05 \cdot \frac{\sqrt{U_{1d}^2 + U_{1q}^2}}{\sqrt{2}};$$

$$U_d = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф макс}}; U_c = \frac{U_d}{1,35},$$

где коэффициент 1,05 учитывает падение напряжение в цепи инвертора.

Для асинхронного двигателя AB250S6 выполнение указанных выше значений нагрузки и скорости может быть обеспечено инвертором с синусоидальной ШИМ с наложенной третьей гармоникой и $k = 1,1547$ только при напряжении инвертора $U_{\text{иф макс}} > U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$, что возможно при питании ПЧ от сети с напряжением $U_c > 420 \text{ В}$ [18].

Требуемую максимальную угловую скорость асинхронного двигателя при частотном векторном управлении в электроприводе можно получить если:

– питать ПЧ от сети с напряжением $U_c \geq 420 \text{ В}$, ограничив максимальное значение напряжения

инвертора на уровне $U_{\text{иф макс}} = 1,05 \cdot U_{1\text{фн}}$, поддерживая значение коэффициента k в соответствии с выражением

$$k = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot U_{1\text{фн}}}{U_d} \cdot 1,1547 \leq 1,1547; \quad (6)$$

– увеличить амплитуду управляющих сигналов $u_{1m}^* > 1$ при напряжении сети $U_c < 420 \text{ В}$, позволяющую повысить примерно на 10 % максимальное значение выходного напряжения инвертора, но приводящую к существенному возрастанию в выходном сигнале инвертора (аналогично инвертору с π -коммутацией) высших нечетных (старше третьей) гармоник (пятой вплоть до 20 %, седьмой – до 14,3 %);

– при напряжении сети $U_c < 420 \text{ В}$ выбрать двигатель с запасом по мощности и работать с постоянно ослабленным потоком или, что более целесообразно, реализовать двухзонное регулирование скорости с ослаблением потока только во второй зоне при скорости выше основной в соответствии с выражением

$$\Psi_{2d \text{ зад}} = \Psi_{2н} \cdot \frac{\omega_{\text{нач}}}{\omega}, \text{ при условии } \omega \geq \omega_{\text{нач}},$$

где $\omega_{нач}$ – выбранное значение начальной скорости ослабления поля. Здесь под основной скоростью понимаются значения скорости, соответствующие предельной характеристике разомкнутой системы при фактических значениях момента нагрузки.

Из условия максимального быстродействия ослабление поля следует начинать при начальной скорости в точке (т. 1) $\omega_{нач} = \omega_1$ (см. рис. 4). Однако в этом случае в установившихся режимах работы АД будет иметь существенно ослабленный поток возбуждения. Так, например, при работе АД в точке (т. 2) с моментом $M_{эм} = 460 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и угловой скоростью $\omega_2 = 97,7 \text{ рад/с}$ установившееся значение потокосцепления будет равно

$$\Psi_{2d} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \Psi_{2н} = 0,9 \cdot \Psi_{2н}$$

при требуемом значении

$$\Psi_{2d} = \frac{\omega_2}{\omega_2} \cdot \Psi_{2н} = \Psi_{2н}$$

Аналогично при работе АД в точке (т. 4) с угловой скоростью $\omega_4 = 110 \text{ рад/с}$ установившееся значение потокосцепления будет равно

$$\Psi_{2d} = \frac{\omega_1}{\omega_4} \cdot \Psi_{2н} = 0,73 \cdot \Psi_{2н}$$

при требуемом значении:

$$\Psi_{2d} = \frac{\omega_2}{\omega_4} \cdot \Psi_{2н} = 0,89 \cdot \Psi_{2н}$$

Из вышеизложенного следует, что значение начальной скорости ослабления поля необходимо выбирать по фактическому значению электромагнитного момента двигателя и изменять ее в соот-

ветствии с изменениями момента. Таким образом, начальная скорость ослабления потока АД является функцией электромагнитного момента

$$\omega_{нач} = f(M_{эм}, U_{1ф макс})$$

и представляет собой предельную характеристику при фактическом значении напряжения $U_{1ф макс}$, например характеристика 2 на рис. 3 при $U_{1ф макс} = 220 \text{ В}$.

При изменениях напряжения сети и нагрузки АД (потребляемого двигателем тока) значение начальной скорости ослабления потока АД дополнительно будет зависеть от фактического напряжения на звене постоянного тока U_d и определяется следующей зависимостью

$$\omega_{нач} = f(M_{эм}, U_{иф макс} = 1,05 \cdot U_{1фн}) \times \frac{U_d}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot U_{1фн}},$$

где $U_d \leq 420 \text{ В}$.

Структурная схема блока формирования задания на входе контура регулирования потокосцепления ротора в системе векторного частотного управления двухзонного асинхронного электропривода приведена на рис. 5.

Функциональный преобразователь ФП формирует предельную характеристику разомкнутой системы АЭП при максимальном напряжении инвертора $U_{иф макс} = 1,05 \cdot U_{1фн}$:

$$\omega_{нач}^* = f(M_{эм}, U_{иф макс} = 1,05 \cdot U_{1фн}). \quad (7)$$

Для обеспечения работоспособности устройства управления потокосцеплением необходимо выполнить следующие условия:

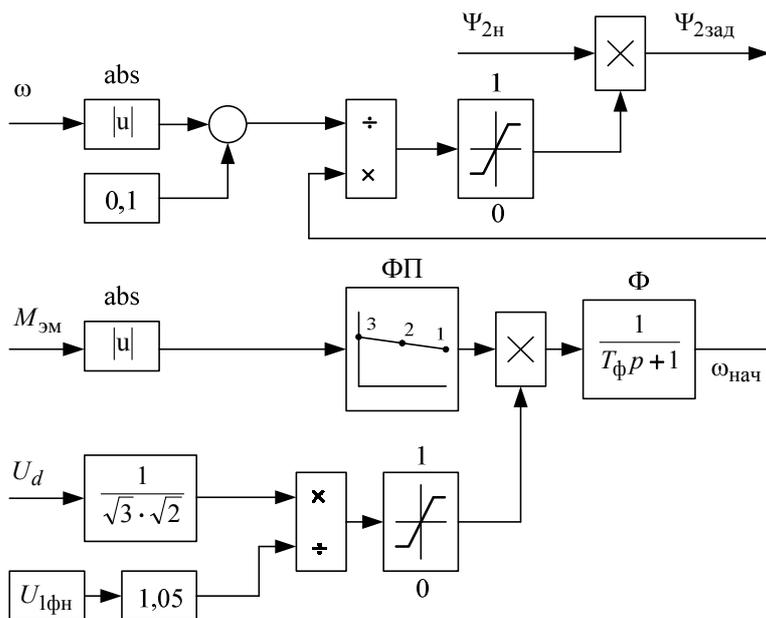


Рис. 5. Структурная схема блока формирования задания потокосцепления ротора на входе контура регулирования

Электромеханические системы

– при задании характеристики (7) функционального преобразователя должно выполняться условие $\omega_{\text{нач}}^* < \omega_{\text{нач}}$ при общем значении момента;

– в канале регулирования потокосцепления необходим инерционный фильтр Φ с постоянной времени T_Φ .

Подбором постоянной времени фильтра T_Φ может быть получен желаемый характер переходных процессов во второй зоне регулирования скорости. Выбором меньших значений начальной скорости ослабления поля $\omega_{\text{нач}}^*$ на характеристике

функционального преобразователя в области малых моментов можно добиться работы АД в области малых нагрузок с ослабленным потоком и минимальным значением потребляемого тока.

На рис. 6 представлены зависимости потребляемого асинхронным двигателем АВ250S6 тока при работе с заданной скоростью $\omega_{\text{зад}} = 0,9 \cdot \omega_{\text{ном}}$ и следующих значениях задания потокосцепления ротора:

характеристика 1 – $\Psi_{2\text{зад}} = \Psi_{2\text{н}}$,

характеристика 2 – $\Psi_{2\text{зад}} = 0,8 \cdot \Psi_{2\text{н}}$,

характеристика 3 – $\Psi_{2\text{зад}} = 0,6 \cdot \Psi_{2\text{н}}$.

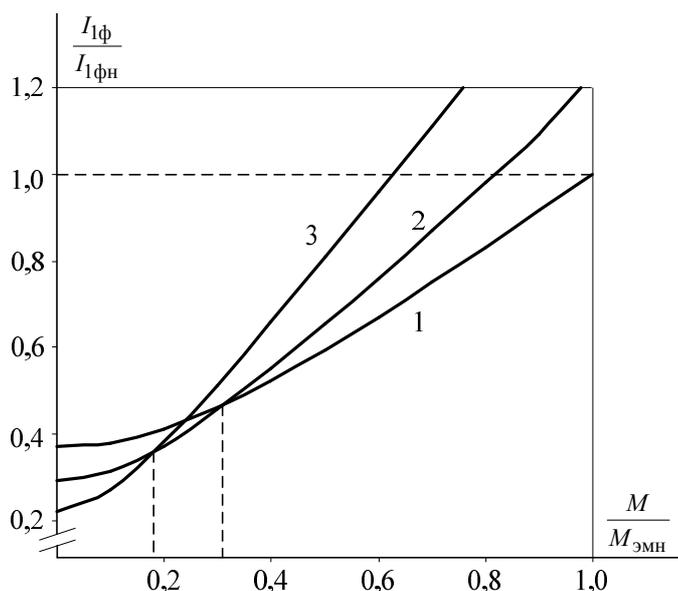


Рис. 6. Зависимости тока, потребляемого АД, от момента нагрузки при:
1 – $\Psi_2 = \Psi_{2\text{н}}$; 2 – $\Psi_2 = 0,8 \cdot \Psi_{2\text{н}}$; 3 – $\Psi_2 = 0,6 \cdot \Psi_{2\text{н}}$

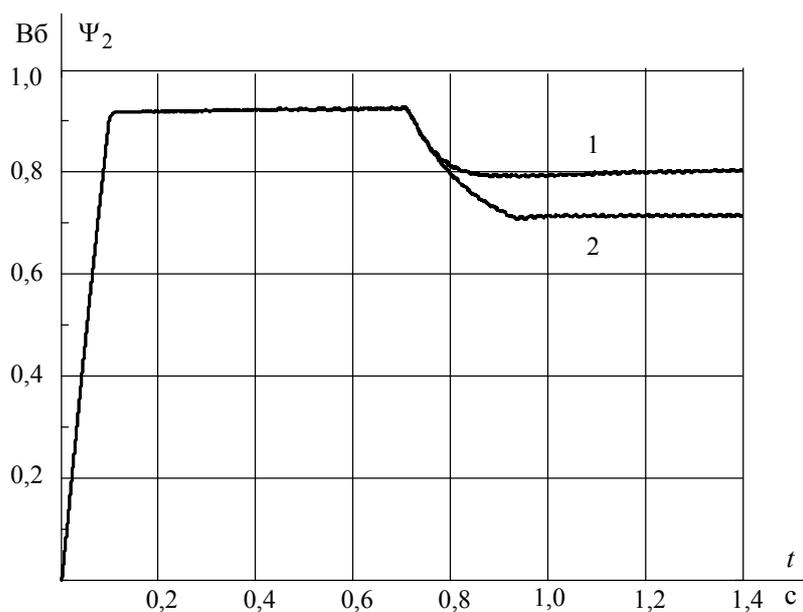


Рис. 7. Графики изменения потокосцепления $\Psi_2(t)$ при отработке задания $\omega_{\text{зад}} = 110$ рад/с в двухзонном электроприводе: 1 – $\omega_{\text{нач}} = f(M_{\text{эм}})$; 2 – $\omega_{\text{нач}} = \text{const}$

Для уменьшения тока, потребляемого АД, и исключения его теплового перегрева при больших нагрузках следует задавать номинальное значение потокосцепления. При малых нагрузках, наоборот, целесообразно уменьшать значение задания потокосцепления.

На рис. 7 приведены графики изменения потокосцепления при отработке задания $\omega_{\text{зад}} = 110$ рад/с в двухзонном частотно-управляемом электроприводе.

Системы АЭП с постоянным значением скорости начала ослабления поля $\omega_{\text{нач}} = \omega_1$ характеризуются несколько большим быстродействием во второй зоне регулирования, однако поток двигателя в установившемся режиме оказывается излишне ослабленным (характеристика 2 на рис. 7). Основным достоинством систем с выбором скорости начала ослабления поля в зависимости от электромагнитного момента двигателя $\omega_{\text{нач}} = f(M_{\text{эм}})$ является обеспечение оптимального значения потокосцепления в установившихся режимах работы электропривода (характеристика 1 на рис. 7). Это уменьшает потребляемый двигателем ток от инвертора и позволяет обеспечить больший момент при номинальном токе двигателя в установившемся режиме (характеристика 8 на рис. 4).

Динамические характеристики, представленные в [18] АЭП с частотно-векторным управлением, подтверждают более высокую эффективность работы АЭП с управляемым потоком АД. Причем АЭП с постоянным значением скорости начала ослабления потока АД $\omega_{\text{нач}} = \omega_1$ характеризуются несколько большим быстродействием во второй зоне регулирования.

Выводы

1. Установлено, что при недостаточном выходном напряжении инвертора ПЧ формирование требуемых значений потока АД и его момента в асинхронном электроприводе с частотным векторным управлением обеспечивается уменьшением его угловой скорости за счет уменьшения выходной частоты f_1 преобразователя частоты.

2. Выявлено, что при недостаточном напряжении сети целесообразным для системы ПЧ – АД является реализация двухзонного регулирования скорости АД для обеспечения условия $\omega_{\text{эп макс}} \geq \omega_{\text{двн}}$, причем начальную скорость ослабления потока АД следует выбирать в зависимости от фактического значения электромагнитного момента АД, используя для этого предельную статическую характеристику разомкнутой по скорости системы ПЧ – АД.

3. Доказано, что основным достоинством систем управления АЭП с выбором скорости начала ослабления потока АД в зависимости от электромагнитного момента двигателя $\omega_{\text{нач}} = f(M_{\text{эм}})$ яв-

ляется возможность поддержания оптимального значения потокосцепления в установившихся режимах работы АЭП, позволяющая обеспечить больший момент при номинальном токе АД в установившемся режиме.

4. Для уменьшения тока, потребляемого АД, и исключения его теплового перегрева при больших нагрузках следует задавать номинальное значение потокосцепления, а при малых нагрузках уменьшать значение задания потокосцепления.

Литература

1. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

2. Garces, L.J. Parameter adaptation for the speed-controlled static ac drive with a squirrel-cage induction motor / L.J. Garces // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1980. – Vol. IA-16. – P. 173–178. DOI: 10.1109/TIA.1980.4503768

3. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

4. Виноградов, А.Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 7–17.

5. Blaschke, F. Das Prinzip der feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen / F. Blaschke // Siemens Zeitschrift. – 1971. – Bd. 45, H. 10. – S. 757–760.

6. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.И. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1987. – 136 с.

7. Novotny, D.W. Vector control and dynamics of AC drives / D.W. Novotny, T.A. Lipo. – Oxford: Clarendon Press, 1996. – 440 p.

8. Система управления с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией трехфазного инвертора при частотном скалярном управлении асинхронным двигателем. / Ю.Н. Дементьев, К.Н. Негодин, Н.В. Кояин, Л.С. Удут. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4. – С. 49–54.

9. Копырин, В. С. Математическое моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода в режиме рекуперации энергии торможения в питающую сеть / В.С. Копырин, А.А. Ткачук // Электротехника. – 2006. – № 1. – С. 37–44. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-4-49-54

10. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

11. Электропривод с устройством косвенного контроля выходных координат асинхронного двигателя / Ю.Н. Дементьев, В.И. Гончаров, К.Н. Не-

годин, А.Д. Умурзакова. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 99–106. DOI: 10.14529/power170411

12. Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers / M. Malinowski, M.P. Kazmierkowski, S. Hansen et al. // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37, no. 4. – P. 1019–1026. DOI: 10.1109/28.936392

13. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus // IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 2006. – Vol. 53, no. 5. – P. 1398–1409. DOI: 10.1109/TIE.2006.881997

14. Veszprémi, K. Direct controls in voltage-source converters – generalizations and deep study / K. Veszprémi, I. Schmidt // Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC'2008. Proceedings on CD-ROM. – 2008. – P. 1826–1833. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635527

15. Saeidi, S. A novel algorithm for model predictive control of AC electrical drives / S. Saeidi, R. Kennel // Proc. EDPC. – 2012. – P. 78–84. DOI: 10.1109/EDPC.2012.6425099

16. Direct power control of PWM converters without power source – voltage sensors / Tishihiko Noguchi, Hiroaki Tomiki, Seiji Kondo and Isao Takahashi // IEEE Trans. on Industry Applications. – 1998. – Vol. 34, no. 3. – P. 473–479. DOI: 10.1109/28.673716

17. Veszprémi, K. Optimizing the Dynamic Behavior of Direct Controls of Voltage-source Converters / K. Veszprémi // Electric Power Components and Systems. – 2009. – Vol. 37 (9). – P. 1014–103. DOI: 10.1080/15325000902918883

18. Limiting static and dynamic characteristics of an induction motor under frequency vector control / I. Vajda, Yu.N. Dementyev, K.N. Negodin et al. // Acta Polytechnica Hungarica. – 2017. – Vol. 14, no. 6. – P. 7–27.

Однокопылов Иван Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, Отделение электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; odivan@yandex.ru.

Дементьев Юрий Николаевич, Ph.D, канд. техн. наук, профессор, Отделение электроэнергетики и электротехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; dementev@tpu.ru.

Крокhta Юрий Владимирович, аспирант, Отделение электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; yuriy.krokhta@gmail.com.

Ари Абдулла Р. Рахим, аспирант, Отделение электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; aritomsk@yahoo.com.

Удут Леонид Степанович, магистрант, Отделение электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; azzin0t@mail.ru.

Умурзакова Анара Даукеновна, Ph.D, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Энергетика, металлургия и информационные технологии», Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, Республика Казахстан; старший преподаватель, Отделение электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; granat72@mail.ru.

Поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

STATIC LIMITING CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH FREQUENCY VECTOR CONTROL

I.G. Odnokopylov¹, odivan@yandex.ru,
Yu.N. Dementiev¹, dementev@tpu.ru,
Yu.V. Krokhta¹, yuriy.krokhta@gmail.com,
Ari Abdula R. Rakhim¹, aritomsk@yahoo.com,
L.S. Udut¹, azzinOt@mail.ru,
A.D. Umurzakova^{1, 2}, granat72@mail.ru

¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,

² Innovative University of Eurasia, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

The paper describes the research considered relevant due to the wide-scale usage of frequency controlled asynchronous electric drive based on squirrel-cage induction motor (IM) in the most popular regulated electric drive industrial mechanism systems.

The research aims to analyze estimated limiting static characteristics, which correspond either to IM voltage nominal value or to the maximum value of inverter output voltage of frequency controller (FC) on set supply voltage value for various control systems of three-phase inverter. These characteristics allow estimating the possibility to generate the required velocities on set static load torque in frequency controlled asynchronous electric drive with vector control.

The research novelty involves using the limiting static characteristic formed by functional converter of rotor flux setting in the velocity open loop FC – IM system with maximum inverter voltage to select the velocity of IM flux weakening depending on its electromagnetic torque for reaching electric drive operating mode.

The research methods, used in the paper, are based on employing the electric drive theory, electric machines theory, mathematical and simulation modeling methods with modern software.

The research outcomes establish that with the insufficient output FC inverter voltage in an asynchronous electric drive with frequency vector control, the generation of the required IM flux and torque values is due to the reduction of its angular velocity by reducing the output frequency of the FC. Moreover, the initial rate of IM flux weakening should be selected depending on the actual value of the IM electromagnetic torque, using the limiting static characteristic of the open loop FC-IM system. The paper proves that the vector frequency control systems of an asynchronous electric drive with the velocity selection of the IM flux weakening depending on the IM electromagnetic torque feature a possibility to maintain the optimum IM flux value in steady-state mode, allowing for the higher value of IM torque at the IM rated current. To reduce the current used by IM and to exclude its overheating at high loads, the nominal value of the flux linkage should be set, and for lower loads, the value of the flux linkage specification should be reduced.

Keywords: induction motor, frequency control, vector control, three-phase inverter, limiting characteristics.

References

1. Bulgakov A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency Control of Induction Motors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 216 p.
2. Garces L.J. Parameter Adaptation for the Speed-Controlled Static AC Drive with a Squirrel-Cage Induction Motor. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-16, 1980, pp. 173–178. DOI: 10.1109/TIA.1980.4503768
3. Sandler A.S., Sarbatov R.S. *Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Automatic Frequency Control of Induction Motors]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 328 p.
4. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N. [Adaptive Vector Control System of Electric Drive]. *Electrotehnika* [Electrotechnics]. 2003, no 7, pp. 7–17. (in Russ.)
5. Blaschke F. Das Prinzip der feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen. *Siemens Zeitschrift*, 1971, Bd. 45, H. 10, S. 757–760.
6. Rudakov V.V., Stolyarov I.I., Dartau V.A. *Asinkhronnie elektroprivody s vektornim upravleniem* [Asynchronous Electric Drives with Vector Control]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 2007. 440 p.
7. Novotny D.W., Lipo T.A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. Oxford, Clarendon Press, 1996. 440 p.

8. Dementyev Yu.N., Negodin K.N., Koyain N.V., Udut L.S. [PWM Control System of Three-Phase Inverter with Scalar Frequency Control of Induction Motor] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Higher School Proceedings. Electromechanics], 2016, no. 4, pp. 49–54. (in Russ.)
9. Kopyrin V.S., Tkachuk A.A. [Mathematical Modeling of Frequency Controlled Asynchronous Electric Drive in Break Energy Recuperation Mode to Supply] *Elektrotehnika* [Electrotechnics], 2006, no. 1, pp. 37–44. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2016-4-49-54
10. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivoda peremennogo toka s poluprovodnikovimi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical Modeling of AC Electric Drives with Semi-Conductors Frequency Converters], Ekatiireburg, Ural Department of RAS, 2000. 654 p.
11. Dementyev Yu.N., Goncharov V.I., Negodin K.N., Umurzakova A.D. [Electric Drive with Indirect Control Device of Output Parameters of Induction Motor]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Energy*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 99–106. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170411
12. Malinowski M., Kazmierkowski M.P., Hansen S., Blaabjerg F., Marques G.D. Virtual-Flux-Based Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifiers. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 1019–1026. DOI: 10.1109/28.936392
13. Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A.V. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2006, vol. 53, no. 5, pp.1398–1409. DOI: 10.1109/TIE.2006.881997
14. Veszprémi K., Schmidt I. Direct Controls in Voltage-Source Converters – Generalizations and Deep Study. *Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC'2008. Proceedings on CD-ROM*, 2008, pp. 1826–1833. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635527
15. Saeidi S., Kennel R. A Novel Algorithm for Model Predictive Control of AC Electrical Drives. *Proc. EDPC*, 2012, pp. 78–84. DOI: 10.1109/EDPC.2012.6425099
16. Tishihiko Noguchi, Hiroaki Tomiki, Seiji Kondo and Isao Takahashi. Direct Power Control of PWM Converters without Power Source – Voltage Sensors. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1998, vol.34, no. 3, pp.473–479. DOI: 10.1109/28.673716
17. Veszprémi K. Optimizing the Dynamic Behavior of Direct Controls of Voltage-Source Converters. *Electric Power Components and Systems*, 2009, vol. 37 (9), pp. 1014–1035. DOI: 10.1080/15325000902918883
18. Vajda I., Dementyev Yu.N., Negodin K.N., Kojain N.V., Udut L.S., Chesnokova I.A. Limiting Static and Dynamic Characteristics of an Induction Motor under Frequency Vector Control. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 7–27.

Received 10 September 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Деметьев, Ю.В. Крохта и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 109–120. DOI: 10.14529/power180412

FOR CITATION

Odnokopylov I.G., Dementiev Yu.N., Krokhta Yu.V., Ari Abdula R. Rakhim, Udut L.S., Umurzakova A.D. Static Limiting Characteristics of Induction Motor Drive with Frequency Vector Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180412