

УДК 621.3.07

А.В. Григорьев

ВАРИАНТ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ, ПОТОКОМ И ТОКОМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В предлагаемой работе приводится вариант управления состоянием асинхронного электропривода, обладающий быстродействием вариантов разрывного управления и возможностью жесткого ограничения амплитуды тока статора на заданном уровне. При этом обеспечивается синусоидальное распределение поля статора в воздушном зазоре и синусоидальные токи фаз электродвигателя.

Задача управления технологическими переменными промышленной установки в большинстве случаев может быть решена средствами регулируемого электропривода.

Основными критериями, предъявляемыми к электроприводам, являются: выполнение технологических функций (поддержание заданной частоты вращения и крутящего момента), достижение минимума потерь электроэнергии при работе установки (максимальный КПД), высокая надежность.

Наилучшие показатели позволяет получить регулируемый электропривод переменного тока. Основными методами регулирования координат электропривода переменного тока являются: методы управления с ориентацией по векторам потоков статора или ротора, системы прямого управления моментом.

В структуру систем управления с ориентацией по векторам потоков входят основные контуры регулирования электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора или ротора, а также промежуточные контуры регулирования токов фаз статора [1, 2, 4, 5].

Промежуточные контуры регулирования и линейные регуляторы амплитуды потока и элек-

тромагнитного момента приводят к снижению быстродействия системы управления и перерегулированию. Достоинствами системы управления является высокая точность регулирования величин электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора или ротора, а также возможность ограничения амплитуды тока статора.

В другом способе управления («Прямое управление моментом», ПУМ) электромагнитный момент и амплитуда вектора потока статора регулируются непосредственно напряжением инвертора [2, 3, 5, 6]. Поэтому, способ прямого управления моментом обладает меньшей инерционностью, чем варианты управления с ориентацией по векторам потоков. Но при прямом управлении моментом амплитуда тока статора не ограничивается, поэтому в переходных режимах, особенно при пуске, ток статора может превышать номинальное значение.

Как мы указывали выше, здесь мы предлагаем вариант управления, обладающий быстродействием варианта ПУМ и возможностью жесткого ограничения амплитуды тока статора.

Вариант управления заключается в том, что на основе значений фазных токов (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) и напряжений (U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}) статора определяют значение составляющих вектора потокосцепления статора ($\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$) и значение электромагнитного момента (M), а затем на основе заданных значений этих величин (Ψ_{sz}, M_z) и заданной предельной величины тока статора (I_{sz}) формируют управляющие сигналы инвертором напряжения (U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}) по выражениям, приведенным ниже.

$$U_{sa} = \begin{cases} I_{sm} > I_{sz}, \begin{cases} U_{smax}, i_{sa}(I_{sz} - I_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax}, i_{sa}(I_{sz} - I_{sm}) < 0, \end{cases} \\ I_{sm} < I_{sz}, \begin{cases} U_{smax}, (\Psi_{sc} - \Psi_{sb})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sa}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax}, (\Psi_{sc} - \Psi_{sb})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sa}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) < 0, \end{cases} \end{cases}$$

$$U_{sb} = \begin{cases} I_{sm} > I_{sz}, \begin{cases} U_{smax}, i_{sb}(I_{sz} - I_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax}, i_{sb}(I_{sz} - I_{sm}) < 0, \end{cases} \\ I_{sm} < I_{sz}, \begin{cases} U_{smax}, (\Psi_{sa} - \Psi_{sc})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sb}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax}, (\Psi_{sa} - \Psi_{sc})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sb}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) < 0, \end{cases} \end{cases}$$

$$U_{sc} = \begin{cases} I_{sm} > I_{sz}, & \begin{cases} U_{smax} \cdot i_{sc}(I_{sz} - I_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax} \cdot i_{sc}(I_{sz} - I_{sm}) < 0, \end{cases} \\ I_{sm} < I_{sz}, & \begin{cases} U_{smax} \cdot (\Psi_{sb} - \Psi_{sa})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sc}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) \geq 0, \\ -U_{smax} \cdot (\Psi_{sb} - \Psi_{sa})(M_z - M) + k_z \frac{M_n}{\Psi_n} \Psi_{sc}(\Psi_{sz} - \Psi_{sm}) < 0. \end{cases} \end{cases}$$

Здесь k_z - коэффициент значимости управления потокосцеплением; U_{smax} - максимальное значение фазного напряжения статора; M_n, Ψ_n - номинальные значения электромагнитного момента и потокосцепления статора; I_{sm}, Ψ_{sm} - амплитуды тока и потокосцепления статора.

Если коэффициент значимости равен 0, то управление производится только величиной электромагнитного момента, если $k_z \rightarrow \infty$, то управление производится только величиной потокосцепления статора. Структурная схема варианта управления показана на рис. 2.

Для исследования варианта управления была реализована вычислительная модель асинхронного электропривода на базе электродвигателя 4А80А4У3. Частота коммутации ключей инвертора принималась на уровне 5 кГц. Заданное значение потокосцепления статора установлено на уровне 0.8 Вб, электромагнитного момента - 5 Нм.

Исследование варианта управления выполнено в следующей последовательности: пуск, работа без нагрузки при различных коэффициентах значимости без ограничения амплитуды тока статора, работа без нагрузки при различных коэффициентах значимости с ограничением амплитуды тока статора, работа под нагрузкой с ограничением амплитуды тока статора.

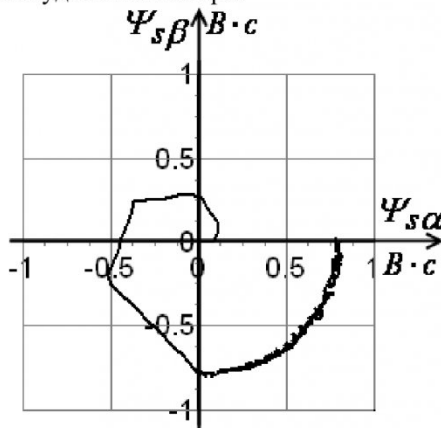


Рис. 1. Годограф вектора потока статора при пуске

При пуске в электродвигателе отсутствует магнитный поток, поэтому мгновенное изменение электромагнитного момента до заданного уровня не возможно. Для реализации пуска необходимо принять меры по намагничиванию машины: предварительное намагничивание машины постоян-

ным током или одновременное управление электромагнитным моментом и магнитным потоком (рис. 1, 3).

На рис. 1 введены обозначения:

$$\begin{aligned} \Psi_{s\alpha} &= \Psi_{sa}, \\ \Psi_{s\beta} &= (\Psi_{sb} - \Psi_{sc}) / \sqrt{3}. \end{aligned}$$

Графики на рис. 1, 3 получены при коэффициенте значимости $k_z = 1$. Графики при других значениях коэффициента значимости показаны на рис. 4 - 6.

На этих рисунках видно, что увеличение коэффициента значимости приводит к увеличению точности регулирования амплитуды вектора потока статора и к уменьшению точности регулирования величины электромагнитного момента. При пуске увеличение коэффициента значимости приводит к предварительному намагничиванию машины постоянным током до достижения потоком некоторой величины, которая при коэффициенте значимости $k_z = 30$ равна заданному значению потока.

На рис. 3 также видно, что при пуске происходит значительное увеличение амплитуды тока статора. Для ограничения всплеска тока в систему управления введено ограничение в виде предельного значения тока статора (I_z).

На рис. 7 мы можем видеть, что ограничение тока статора приводит к ограничению значений электромагнитного момента на этапе пуска из-за того, что машина размагничена. Затем, когда машина намагничена, значение электромагнитного момента устанавливается на заданном уровне (5 Нм). При управлении технологическими параметрами, например, частотой вращения вала электродвигателя, во внутренние контуры системы управления может задаваться любое значение электромагнитного момента. Если не вводить ограничение амплитуды тока статора, то ток статора может превышать допустимое значение. В этом случае жесткое ограничение тока позволяет не допустить перегрева электрической машины и элементов электрического преобразователя.

Если ввести другой коэффициент значимости и произвести запуск с тем же условием, что и на рис. 7, то получим более благоприятный вид переходного процесса при пуске (см. рис. 8). На рис. 8 видно, что заданное значение электромагнитного момента при увеличении коэффициента значимо-

сти достигается быстрее, чем при меньших коэффициентах.

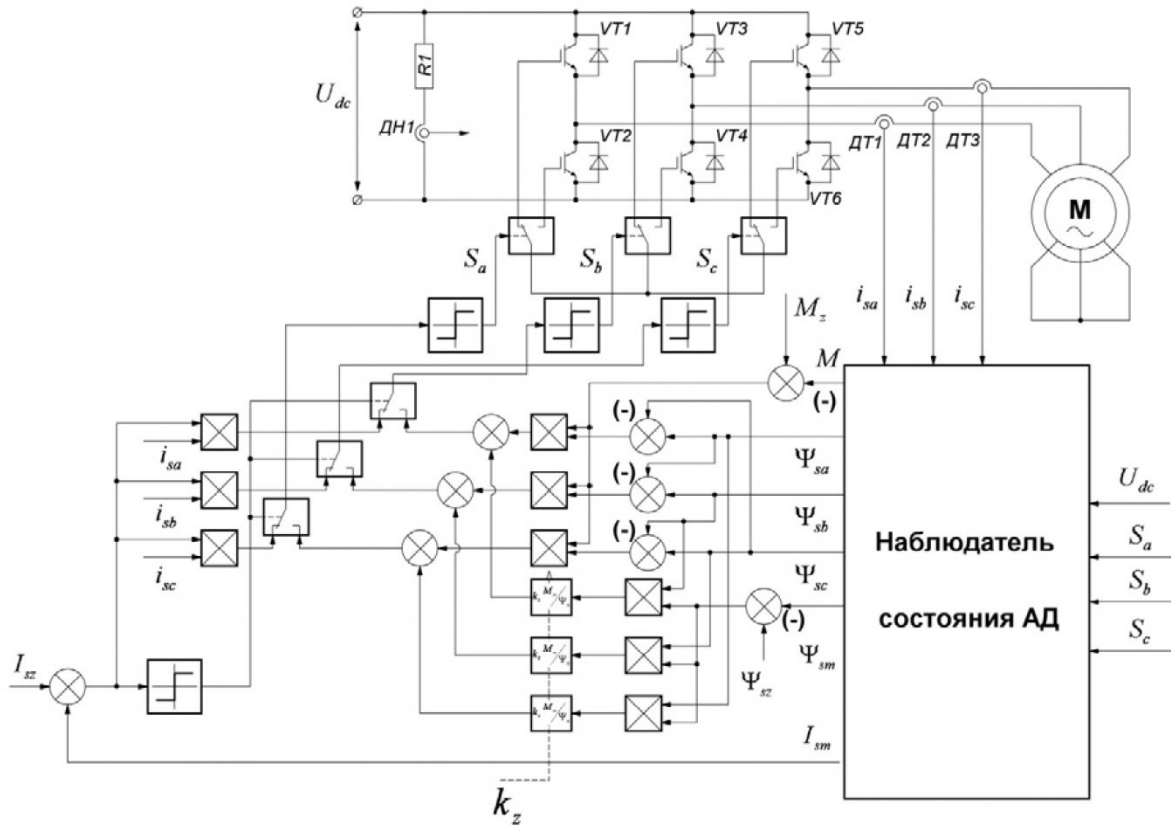


Рис. 2. Структурная схема предложенного варианта управления

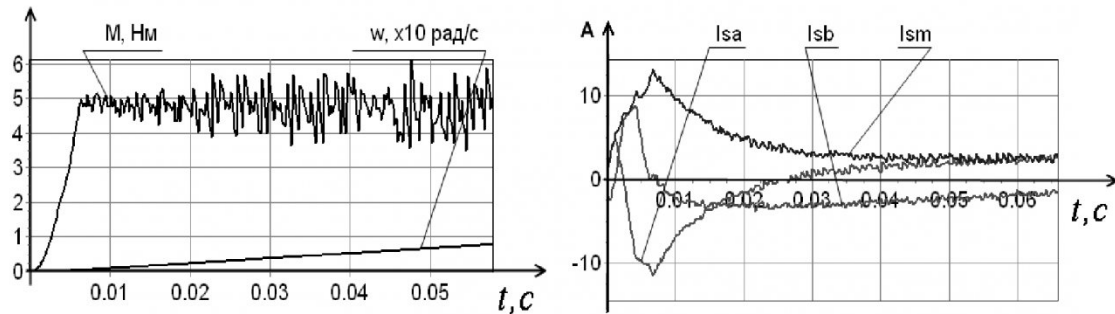


Рис. 3. Пуск при одновременном управлении электромагнитным моментом и амплитудой вектора потокосцепления статора

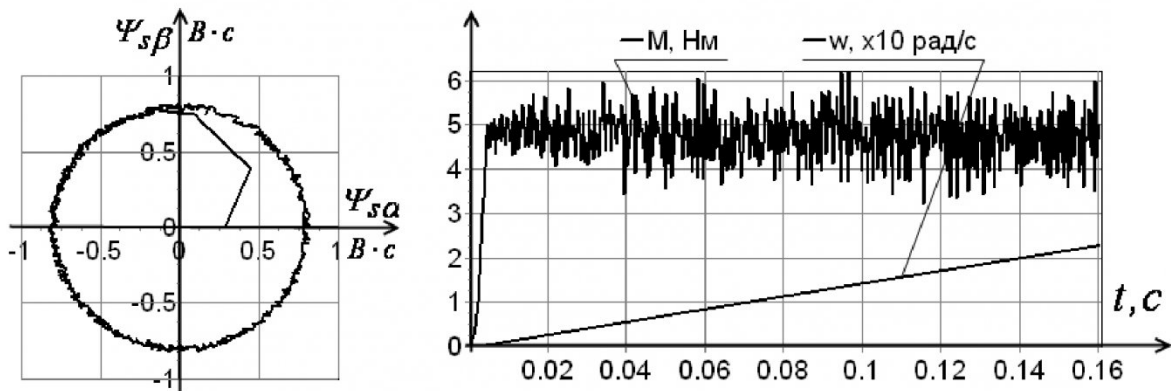


Рис. 4. Графики при коэффициенте значимости $k_z = 3$

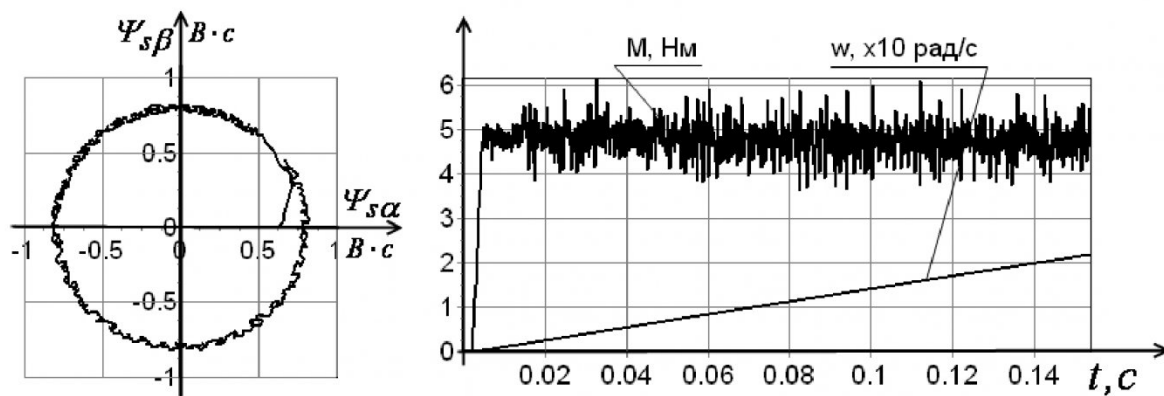


Рис. 5. Графики при коэффициенте значимости $k_z = 10$

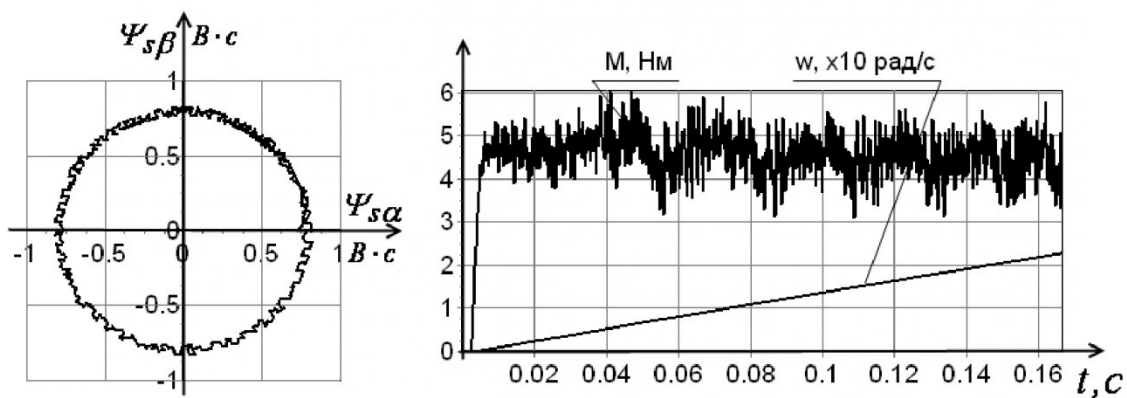


Рис. 6. Графики при коэффициенте значимости $k_z = 30$

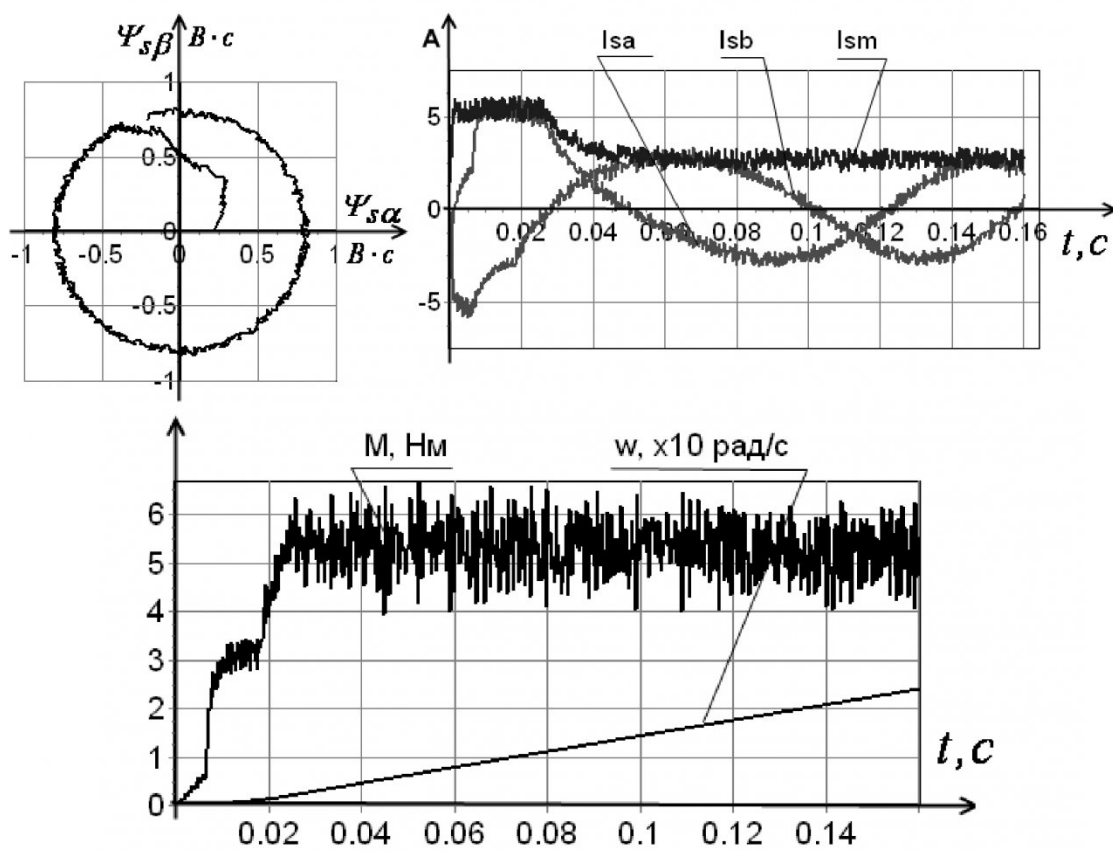


Рис. 7. Графики при ограничении тока статора на уровне $1.5I_n = 5.6 \text{ А}$ при коэффициенте значимости $k_z = 3$

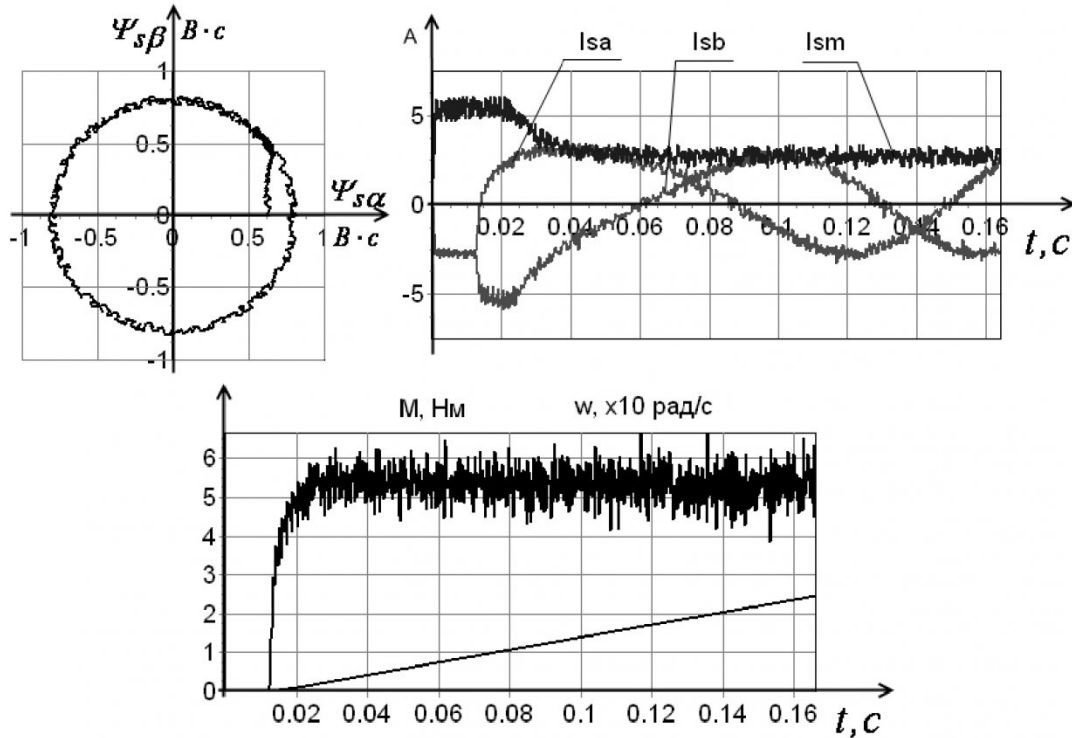


Рис. 8. Пуск при коэффициенте значимости $k_z = 10$ и ограничении тока статора значением $1.5I_n = 5.6$

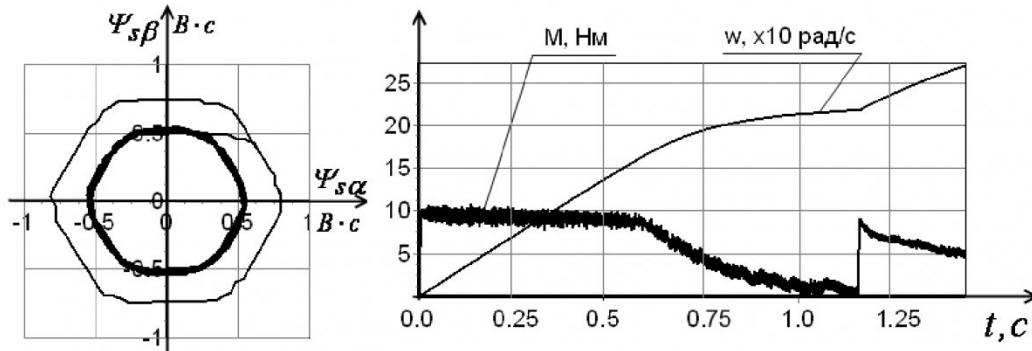


Рис. 9. Изменение предельной частоты вращения при ослаблении поля статора

Это обусловлено тем, что по мере пуска при большем коэффициенте значимости происходит более быстрое намагничивание стали машины. Тем не менее, разгон ротора машины до частоты 10 рад/с на рис. 7 происходит также быстро, как на рис. 8. Пуск с коэффициентом значимости 10 при ограничении тока статора допустимым значением $1.5I_n$ сравним с режимом запуска с предварительным намагничиванием постоянным током при условии поддержания постоянной амплитуды тока (рис. 8).

Формируемый электромагнитный момент и амплитуда вектора потока статора непосредственно не зависят от нагрузки на валу электродвигателя. Косвенно на характеристики варианта управления влияет частота вращения ротора (возмущающее воздействие).

В случае отсутствия нагрузки ($M_c = 0 \text{ Нм}$) на

валу электродвигателя ротор будет разгоняться до предельной возможной частоты вращения. Значение предельной частоты вращения ограничено предельным значением напряжения статора и амплитудой результирующего вектора потока статора. Работа электродвигателя выше предельной частоты вращения возможна, но при уменьшении амплитуды результирующего вектора потокосцепления статора (рис. 9). На рис. 9 видно, что ослабление поля приводит к соответствующему увеличению амплитуды тока статора и к увеличению предельной частоты вращения. Отсюда следует еще одно свойство предлагаемого варианта управления - невозможность ослабления поля ниже заданного значения.

На рис. 10 представлены графики, полученные при подаче резкоизменяющейся нагрузки на вал электродвигателя. Очевидно, что формируе-

мые значения электромагнитного момента и потока статора не зависят от нагрузки. Тем не менее, средние значения регулируемых величин равны заданным во всем диапазоне изменения частоты вращения.

Достоинства представленного варианта управления:

- низкая сложность алгоритма управления;
- ток в рабочем диапазоне частот вращения ротора изменяется синусоидально, что создает благоприятные условия электромагнитной совместимости преобразователя;

- быстроедействие предложенного варианта регулирования электромагнитного момента и потока статора превышает быстроедействие вариантов управления с ориентацией по векторам потоков;

- алгоритм управления использует значения переменных, идентификация которых не составляет проблем (составляющие вектора потокоцепления статора);

- амплитуда тока статора ограничивается предельным значением, обеспечивая нормальные условия работы двигателя при пуске и в переходных режимах.

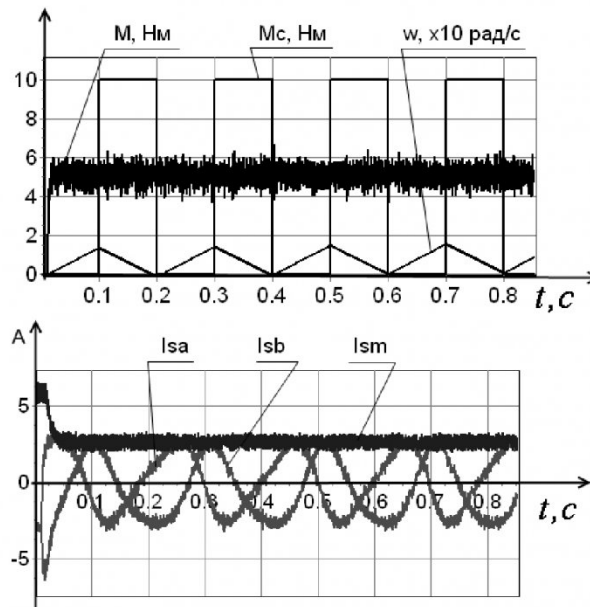


Рис. 10. Реакция системы управления при резком изменении нагрузки на валу электродвигателя

Предложенный вариант управления можно использовать в электроприводах машин, работающих с переменной и резкоизменяющейся нагрузкой (например, в электроприводах горных машин), электроприводах турбомеханизмов, а также в электроприводах подъемных и транспорт-

ных машин. Использование представленного варианта управления в асинхронном электроприводе позволяет снизить потребление электроэнергии, повысить надежность и сберечь ресурс электропривода в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Academia, 2006. – 265 с.
3. Sellami S., Belkacem S., Naciri F. Performance analysis of field-oriented control and direct torque control for sensorless induction motor drives // Asian journal of information technology, №6(2), 2007. – P. 215-221.
4. High-speed field-oriented control. – Master thesis / Group PED4-1037. – 2009. P. 80.
5. Bocker J., Mathapati S. State of the art of induction motor control // IEEE Transactions on industry applications, №1, 2007. – P. 1459-1464.
6. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Transactions on industry applications. Vol. 1A-22. №5, 1986. – P. 820-827.

□ Автор статьи:

Григорьев
Александр Васильевич,
канд.техн.наук, ст. преп.
каф.электропривода и
автоматизации КузГТУ.