

Токоограничение в двухзонных системах частотного управления асинхронными электроприводами

Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз
Научно-инженерный центр (НИЦ)
ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы»,
Екатеринбург, Россия

С.И. Шилин
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

Current limiting in double range frequency control systems of induction motor drives

R.T. Shreiner, V.K. Krivoviyaz
Engineering Research Center
«Automated Systems and Complexes» Ltd.,
Yekaterinburg, Russian Federation

S.I. Shilin
Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N.Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

Рассмотрена задача ограничения токов в двухзонных системах скалярного частотного управления асинхронными электроприводами. На основе системного подхода определен перечень дополнительных элементов для структуры скалярного управления, обеспечивающих астатическое ограничение тока статора электродвигателя. Рассмотрены характеристики этих элементов и условия их встраивания в структуру системы управления. Приведены результаты математического моделирования динамики электропривода, показывающие возможность высококачественного астатического ограничения тока в системе скалярного управления при реакциях на управляющие и возмущающие воздействия.

A problem of current limiting in double range frequency control systems of induction motor drives is considered in the article. Enumeration of additional elements for scalar control system is defined on basis of systems approach. It provides astatic current limiting of a motor. Specifications and incorporation conditions into control system structure of these elements are considered. Mathematical simulation results of electric drive dynamic are given. It shows fine astatic current limiting in scalar system control when both control and disturbance response.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, частотное управление, ограничение тока.

Keywords: induction motor drive, variable-frequency control, current limiting.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность систем токоограничения играет важную роль в обеспечении надежности электроприводов, парировании недопустимых нагрузок и обеспече-

нии прогнозируемых показателей их статических и динамических режимов в реализации технологических процессов. В системах электроприводов переменного тока задача токоограничения заключается в ограничении на допустимых уровнях токов, периодически изменяющихся во времени как в переходных, так и в установившихся режимах. Сложность и эффективность решения этой задачи существенно зависит от базового принципа регулирования и управления переменными состояниями – векторного либо скалярного, положенного в основу построения системы электропривода [1, 2].

В структурах векторного частотного управления, обладающих наибольшими возможностями контроля и управления электромагнитным состоянием двигателя, имеются локальные системы автоматического регулирования токов двигателя. Их наличие и использование при их построении принципов преобразования координат создают благоприятные условия высококачественного астатического регулирования и ограничения токов двигателей. В структурах скалярного управления, не имеющих данных локальных САР и обладающих меньшими возможностями контроля и управления, задача эффективного ограничения тока приобретает более сложный, по существу, системный характер. Для достижения желаемых результатов здесь объективно требуется введение в структуру дополнительных элементов, в том числе из атрибутов векторного управления. Анализ возможных вариантов решения этой системной задачи в скалярных системах частотного управления приводит к выводу о целесообразности

сти использования известного принципа отсечки, сыгравшего важную позитивную роль на предшествующих этапах развития электроприводов постоянного и переменного тока. Статья посвящена рассмотрению данных вопросов применительно к задаче ограничения тока в двухзонных системах скалярного частотного управления электроприводами переменного тока с ШИМ.

I. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА

В общем случае для формирования рабочих режимов частотно-регулируемых электроприводов система ограничения токов должна обеспечить:

- ◆ частотный пуск, торможение и реверсирование электропривода с поддержанием пускового и тормозного токов на предельно допустимых уровнях исходя из допустимой перегрузочной способности силового преобразователя частоты и двигателя;
- ◆ астатическое регулирование токов в режимах токоограничения;
- ◆ эффективное ограничение токов при реакциях электропривода на управляющие и возмущающие воздействия, включая полную остановку двигателя при значительном увеличении момента нагрузки на валу;
- ◆ коррекцию внешних задающих воздействий в соответствии с фактическим состоянием электромеханической системы.

Для удовлетворения данных требований в скалярной системе целесообразно предусмотреть:

- 1) Устройство формирования специфического скалярного сигнала обратной связи, отражающего фактические значения ограничиваемых токов и направление потока электромеханического преобразования энергии, осуществляемого электродвигателем.
- 2) Устройство астатического регулирования в режимах ограничения токов, периодически изменяющихся во времени.
- 3) Устройство коррекции режимов управления, обеспечивающее астатическое регулирование токов при полном и ослабленном магнитном поле двигателя.
- 4) Устройство коррекции внешних задающих воздействий в соответствии с возможностями и фактическим состоянием электромеханической системы.

На рис. 1 приведена функциональная схема двухзонной системы скалярного частотного управления асинхронным электроприводом, снабженная перечисленными выше устройствами. Рассмотрим особенности построения такой системы.

В силовой части электропривода используется трехфазный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель M , подключенный к инверторному полупроводниковому преобразователю частоты с ШИМ. Автономный инвертор напряжения АИН снабжен блоком управления УАИ, реализующим режим синусоидальной широтно-импульсной модуляции выходного напряжения инвертора. Для повышения точности обработки управляющих воздействий в условиях колебаний входного напряжения инвертора, изменений тока нагрузки и влияния «мертвого времени» в блок УАИ вво-

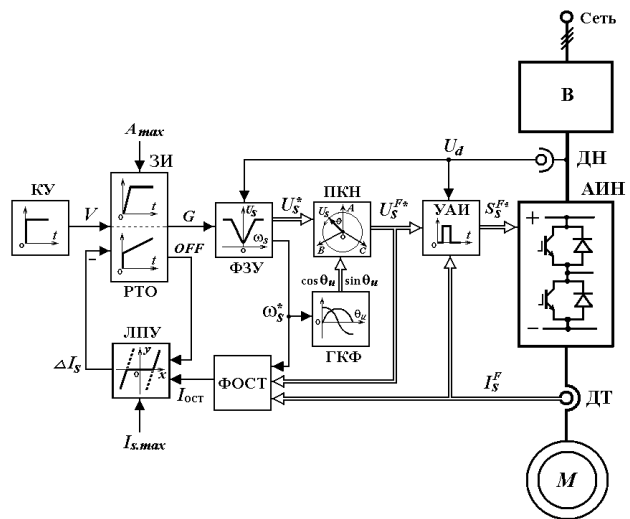


Рис. 1. Функциональная схема скалярной системы управления с быстродействующей системой ограничения тока

дится информация о величинах напряжения в звене постоянного тока U_d и фазных токов статора I_s^F .

Управляемыми переменными скалярной системы являются амплитуда U_s и частота ω_s , основной гармоники напряжения питания двигателя. Для формирования заданий по этим переменным на уровне фазных величин в данном случае используются элементы векторного управления – генератор гармонических координатных функций ГКФ и преобразователь координат ПКН вектора напряжений статора U_s^* , заданного во вращающейся системе координат.

Закон частотного управления в скалярных структурах задается в виде определенного взаимного соответствия амплитуды и частоты напряжения статора. Это соответствие обеспечивается формирователем закона управления ФЗУ путем определения заданных значений U_s^* и ω_s^* как скалярных функций генерального задающего воздействия G . Закон частотного управления в рассматриваемой системе предусматривает двухзонное регулирование скорости с ослаблением магнитного поля. Для определения допустимого значения напряжения статора в зоне регулирования скорости ослаблением магнитного поля в ФЗУ вводится информация о текущем значении U_d . Для повышения плавности переходных процессов предусмотрен датчик интенсивности ЗИ в канале формирования генерального воздействия G , что ограничивает максимально допустимый темп его изменения во времени на уровне A_{max} .

Помимо названных выше элементов скалярной системы, в структуру управления вводятся дополнительные элементы, предназначенные для ограничения тока.

II. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ

Трехфазный двигатель переменного тока потребляет от источника питания ток, каждый из фазных компонент которого подлежит контролю и ограничению. По-

этому в качестве сигнала обратной связи в системе ограничения токов статора целесообразно использовать специфический скалярный сигнал, содержащий обобщенную информацию о системе фазных токов. Как известно из теории электрических машин, такую информацию содержит модуль изображающего вектора токов статора [3]. Фазные токи статора определяются соотношением величин напряжений источника питания и противо-ЭДС двигателя. В связи с этим важно отметить, что направление должной реакции системы ограничения тока зависит от режима работы двигателя – *двигательного* либо *тормозного*. В частности, для ограничения (уменьшения) тока в двигательном режиме необходимо по сигналу регулятора отсечки снижать напряжение источника питания, в то время как при работе двигателя в режиме генераторного торможения – увеличивать напряжение источника. Поэтому для замкнутой системы регулирования тока необходим специфический сигнал обратной связи, содержащий информацию и о величине модуля изображающего вектора фазных токов, и о режиме работы двигателя. В рассматриваемой системе такой сигнал обратной связи по току формируется блоком ФОСТ в соответствии с выражением

$$I_{отс} = N_p N_\omega \sqrt{\frac{2}{3} \sum_j i_{s,j}^2}; \quad j = a, b, c.$$

Здесь $N_p = \text{sign} \left(\sum_j u_{s,j}^* i_{s,j} \right)$; $N_\omega = \text{sign} \omega_s^*$.

Знак сигнала обратной связи отражает направление электромагнитного момента, а абсолютное значение – величину модуля изображающего вектора, предопределяющего амплитудные значения фазных токов статора.

III. АСТАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА

В традиционной схеме отсечки с нелинейным элементом в цепи обратной связи по току контур регулирования тока замыкается лишь в случае превышения сигналом обратной связи определенного порогового значения (уставки отсечки) $I_{s,max}$. Это обстоятельство не позволяет вводить в закон регулирования интегральную составляющую для обеспечения астатизма САР тока в режиме отсечки. В рассматриваемой системе для повышения точности регулирования в контур тока введено логическое переключающее устройство с элементом памяти (ЛПУ). Функциональное назначение ЛПУ состоит в замыкании либо размыкании контура регулирования тока в зависимости от ряда факторов.

Схема устройства приведена на рис. 2. На входы ЛПУ поступают сигналы обратной связи $I_{отс}$ и заданного ограничения (отсечки) по току $I_{s,max}$. Рассогласование между ними либо передается на выход, либо блокируется в зависимости от состояния ЛПУ.

Выходной сигнал ΔI_s поступает на вход пропорционально-интегрального регулятора тока отсечки РТО. Как и в традиционной схеме отсечки, контур тока с ЛПУ

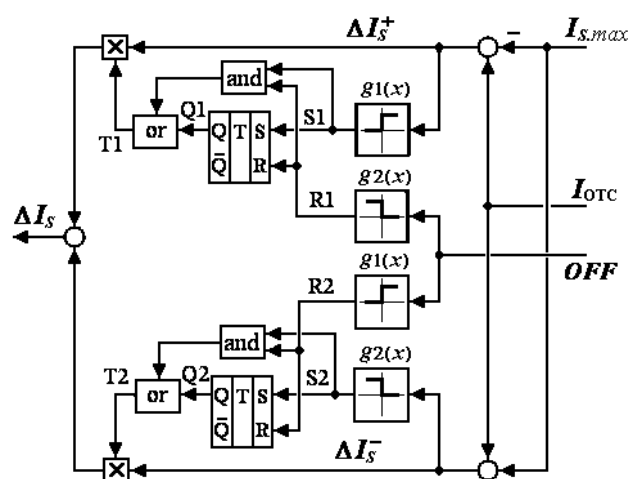


Рис. 2. Схема логического переключающего устройства с элементом памяти

замыкается по условию превышения сигналом обратной связи значения уставки отсечки $I_{s,max}$. Однако после этого замкнутое состояние контура поддерживается элементом памяти ЛПУ независимо от величины и знака ошибки по току ΔI_s . Размыкание контура тока с помощью ЛПУ производится по другому условию, в данном случае по факту достижения нулевого рассогласования между заданным и фактическим значениями G . Разомкнутое состояние контура отсечки также поддерживается элементом памяти ЛПУ вплоть до следующего замыкания контура.

Исключение нелинейности из контура позволяет вводить в закон регулирования тока вместе с пропорциональной и интегральную составляющую. В результате обеспечивается астатическое регулирование тока.

IV. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА ОТСЕЧКИ И ФОРМИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ЗАДАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Регулятор тока отсечки представляет собой последовательное корректирующее устройство, синтез которого произведен на основе анализа структурной схемы двигателя как объекта регулирования тока [3]. Регулятор встраивается в схему формирования генерального задающего воздействия, приведенную на рис. 3. Как видно, функция интегратора ПИ-регулятора тока отсечки реализуется с использованием интегрирующего элемента в канале формирования генерального задающего воздействия G скалярной САР. На входе регулятора тока отсечки включен апериодический фильтр с передаточной функцией

$$\Phi(p) = (T_\mu p + 1)^{-1},$$

где T_μ – малая некомпенсируемая постоянная времени фильтра, ограничивающего полосу пропускания контура регулирования тока в режиме отсечки.

Параметры ПИ-регулятора тока $K_{РТ,П}$ и $K_{РТ,И}$ определяются по условию настройки контура на технический оптимум.

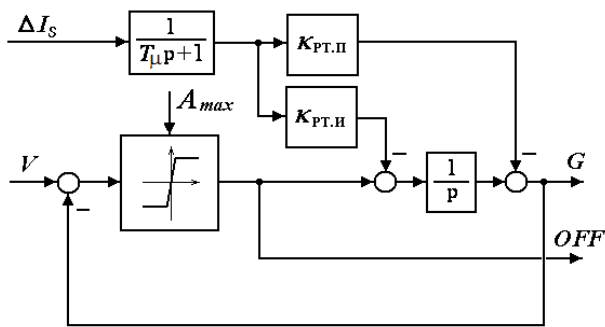


Рис. 3. Формирование генерального задающего воздействия в скалярной САР

В тех режимах, когда ЛПУ блокирует подачу сигнала рассогласования на вход регулятора, формирование генерального задающего воздействия G осуществляется по классической схеме задатчика интенсивности первого порядка [4] с ограничением темпа на максимально допустимом уровне A_{max} .

V. ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКОНА ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СКАЛЯРНОЙ САР

В скалярных системах закон частотного управления реализуется в виде определенной зависимости между амплитудой и частотой напряжения, подводимого к электродвигателю. На рис. 4 приведена структурная схема блока формирования, дополненная элементами коррекции закона управления электродвигателем в режиме ослабления магнитного поля.

Задание по частоте ω_s^* однозначно определяется величиной генерального воздействия G . Задание по амплитуде U_s^* формируется с учетом выражения

$$U_s^* = \sqrt{u_{sx}^{*2} + u_{sy}^{*2}},$$

где $u_{sx}^* = U_{s.min} = \text{const}$ – обеспечивает коррекцию закона пропорционального частотного управления для поддержания перегрузочной способности двигателя в области малых частот [5];

$u_{sy}^* = K_\phi \omega_s^*$ – описывает пропорциональный закон задания амплитуды и частоты напряжения статора

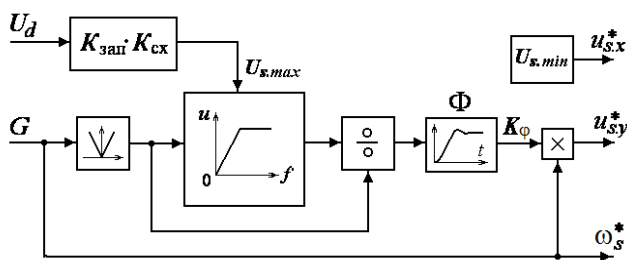


Рис. 4. Структурная схема формирователя закона частотного управления в системе с отсечкой по току

в мультипликативной форме с использованием переменного коэффициента K_ϕ . Для его вычисления предварительно определяется максимально допустимое значение модуля вектора напряжения статора $U_{s.доп}$ с учетом текущего значения входного напряжения инвертора U_d :

$$U_{s.max} = K_{зап} K_{сх} U_d,$$

где $K_{зап} < 1$ – коэффициент запаса; $K_{сх}$ – коэффициент передачи АИН по напряжению при максимально допустимом индексе синусоидальной ШИМ (для трехфазной мостовой схемы АИН и предмодуляции задания сигналом третьей гармоникой [3] величина $K_{сх} = 1/\sqrt{3}$).

Тогда закон двухзонного частотного управления с ограничением напряжения в зоне ослабления поля описывается следующим образом:

$$U = \begin{cases} k_{u/f} |G| & \text{при } k_{u/f} |G| \leq U_{s.max}, \\ U_{s.max} & \text{при } k_{u/f} |G| > U_{s.max}, \end{cases}$$

где $k_{u/f}$ – коэффициент, определяющий соотношение амплитуды и частоты напряжения в первой (нижней) зоне частотного регулирования скорости.

Для двухзонной системы с ослаблением поля справедливо следующее выражение переменного коэффициента, предопределяющего соотношение амплитуды и частоты напряжения статора:

$$K_{\phi 1} = U/|G|.$$

Полученное выражение используется для вычисления коэффициента K_ϕ , определяющего соотношение амплитуды и частоты напряжения статора при двухзонном регулировании скорости. Результаты моделирования показали необходимость разделения быстрых и медленных составляющих процессов регулирования в зоне ослабления поля. С этой целью (см. рис. 4) в канал формирования K_ϕ вводится фильтр нижних частот Φ , ограничивающий полосу пропускания медленных составляющих процесса.

VI. ПРОЦЕССЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В СКАЛЯРНОЙ САР С ОТСЕЧКОЙ ПО ТОКУ

Полученные методом математического моделирования процессы регулирования в скалярной САР с отсечкой по току, приведены на рис. 5 и 6. Используются параметры асинхронного двигателя мощностью 320 кВт. Результаты представлены в относительных единицах в базе значений переменных состояния в номинальном режиме [6].

Рис. 5 характеризует реакцию электропривода на импульс внешнего управляющего воздействия $V(t)$. Условия эксперимента следующие. На первоначальном интервале времени $t = 0 \dots 0,5$ с формируется реакция на включение составляющей u_{sx} при нулевой частоте, что обеспечивает предварительное намагничивание двигателя.

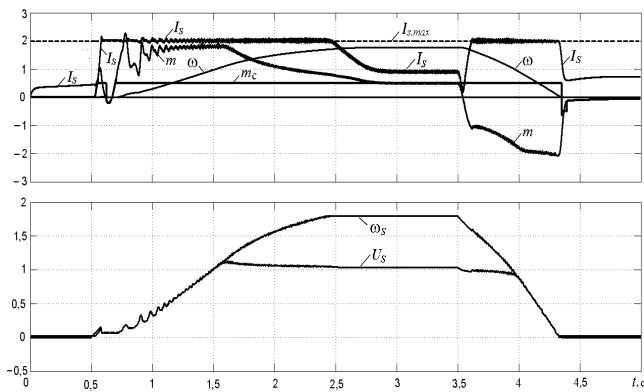


Рис. 5. Реакция электропривода на импульс управляющего воздействия

В момент времени $t = 0,5$ с на управляющий вход системы подается импульс внешнего воздействия $V(t)$, что вызывает разгон двигателя при постоянной нагрузке на валу ($m_c = 0,5$) и далее работу во второй зоне регулирования скорости при частоте, превышающей номинальное значение на 90 %. Как видно, в первой и во второй зонах скоростей система токоограничения поддерживает ток статора на заданном уровне отсечки ($I_s = I_{s,max}$). В первой зоне скоростей обеспечивается пропорциональное увеличение частоты и амплитуды напряжения статора. Во второй зоне увеличение напряжения прекращается, что вызывает постепенное уменьшение электромагнитного момента. Прекращение импульса $V(t)$ при $t = 3,5$ с инициирует процесс рекуперативного частотного торможения с ограничением тока статора на прежнем заданном уровне отсечки $I_{s,max}$. Энергия торможения утилизируется в схеме выпрямителя.

Рис. 6 иллюстрирует особенности процессов, вызванных изменениями нагрузки на валу двигателя.

После предварительного намагничивания и разгона на холостом ходу ($m_c = 0,1$) на интервале времени $t = 2,0 \dots 2,7$ с формируется реакция электропривода на увеличение нагрузки на валу до значения $m_c = 0,75$, не вызывающего срабатывания отсечки по току. Далее происходит значительное увеличение реактивной нагрузки ($m_c = 3$), вызывающее срабатывание отсечки по току и полную остановку двигателя при прежнем зна-

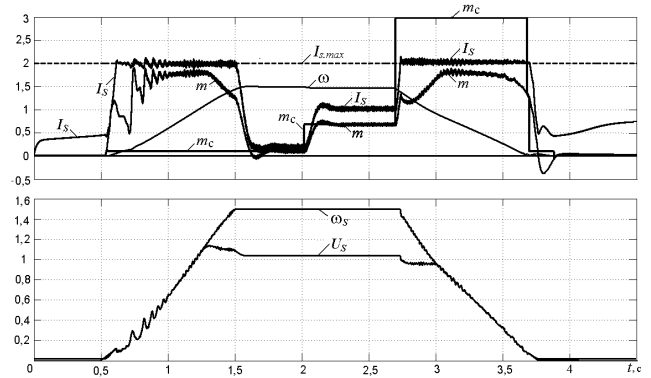


Рис. 6. Процессы регулирования в скалярной САР с отсечкой по току при изменениях управляющего и возмущающего воздействий

чении внешнего управляющего воздействия $V(t)$. Как видно, и в этой ситуации ток статора ограничивается на заданном уровне отсечки $I_{s,max}$. Затем внешнее управляющее воздействие снимается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность изложенных выше принципов ограничения тока получила экспериментальное подтверждение на физических макетах и в испытаниях опытных образцов электроприводов с микропроцессорным управлением.

Библиографический список

1. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие по курсу «Типовые решения и техника современного электропривода». М.: Изд-во МЭИ, 2004. 80 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
3. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 654 с.
4. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2008. 279 с.
5. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1966. 144 с.
6. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед ун-та, 2008. 361 с.