

УДК 62-83-523

## Ограничение тока в скалярных электроприводах с асинхронными двигателями\*

Л.С. УДУТ<sup>1</sup>, А.Ю. ЧЕРНЫШЕВ<sup>2</sup>, И.А. ЧЕРНЫШЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 634050, РФ, г. Томск, проспект Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент.  
E-mail: [udut@tpu.ru](mailto:udut@tpu.ru).

<sup>2</sup> 634050, РФ, г. Томск, проспект Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент.  
E-mail: [ach@tpu.ru](mailto:ach@tpu.ru).

<sup>3</sup> 634050, РФ, г. Томск, проспект Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент.  
E-mail: [chia@tpu.ru](mailto:chia@tpu.ru).

Актуальность исследований связана с разработкой систем скалярных частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями как с новыми структурами, так и с вновь образованными производственными лабораториями. Благодаря своей относительной простоте скалярные частотно-регулируемые электроприводы являются наиболее применяемыми в тех промышленных механизмах, где не требуется большой диапазон регулирования скорости и высокие качества переходных процессов. Переходные процессы в скалярных электроприводах должны протекать при наложенных на ток и момент ограничениях.

Целью работы является синтез параметров регуляторов ограничения тока и формулирование рекомендаций по их выбору с учетом разрядности аналого-цифровых преобразователей датчиков тока, качества переходных процессов в контуре ограничения тока, квантования сигналов цепи обратной связи по току, а также исследование систем токоограничения в скалярных электроприводах с асинхронными двигателями.

В работе выполнены исследования электроприводов методом имитационного моделирования в программной среде MATLAB (Simulink). Учтены основные особенности силовой цепи преобразователя частоты и системы управления электроприводом. Обосновано, что для повышения достоверности результатов моделирования процессов скалярных электроприводов с асинхронными двигателями модель преобразователя частоты должна учитывать все основные элементы: сеть, выпрямитель, сопротивления проводов и кабелей, емкостный фильтр, инвертор напряжения с ШИМ, а в сигнал управления инвертором необходимо вводить третью гармонику напряжения. Установлено, что наиболее целесообразно токоограничение в скалярных частотно-регулируемых электроприводах следует осуществлять с помощью задержанной отрицательной обратной связи или токовой отсечки в канале регулирования частоты как при управляющих, так и при возмущающих воздействиях. Требуемое качество процессов моделирования подтверждено опытом использования разработанной модели для предварительной настройки асинхронных электроприводов.

---

\* Статья получена 21 февраля 2015 г.

**Ключевые слова:** частота, асинхронный электропривод, скалярное управление, момент, широтно-импульсная модуляция, имитационное моделирование, предельный ток, динамические характеристики, статор

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-120-133

## ВВЕДЕНИЕ

Пуск прямым включением в сеть все еще остается самым распространенным способом пуска асинхронных двигателей (АД) в нерегулируемых электроприводах. Такой пуск происходит при значительных токах статора, превышающих номинальный ток  $I_{1н}$  АД в 6–7 раз. Статические электромеханические и механические характеристики АД имеют разный характер, однако динамический момент АД при пуске прямым включением в сеть при малых угловых скоростях также превышает его номинальный момент  $M_n$  в 6–7 раз, а при реверсе двигателя превышение динамического момента может составлять  $12M_n$ .

Если большие пусковые токи оказывают влияние в основном на питающую сеть и, как следствие, на параллельно работающую нагрузку, особенно на асинхронные двигатели, у которых момент пропорционален квадрату питающего напряжения, то ударные динамические моменты АД оказывают негативное влияние как на сам двигатель, так и на кинематику производственного механизма, значительно уменьшая срок их службы.

Наиболее просто токоограничение осуществляется в регулируемых электроприводах с векторным управлением [1–6], в которых вход в насыщение регулятора скорости приводит к ограничению тока на установленном допустимом уровне.

В частотно-регулируемых асинхронных электроприводах с инвертором напряжения и скалярным управлением пути уменьшения пускового тока статора АД вытекают из уравнения его электромеханической характеристики при скольжении  $s = 1$ :

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0I_2' \sin \varphi_2}, \quad (1)$$

где  $\sin \varphi_2 = \frac{x_{кн}}{\sqrt{\left( (R_1 + R_{1доб}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_{кн}^2}}$ ;  $R_1$  – активное сопротивление обмотки

статора;  $R_{1доб}$  – добавочное активное сопротивление кабеля, проводов, соединяющих обмотки статора асинхронного двигателя и преобразователь частоты;  $R_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;  $X_{кн} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания;  $X_{1\sigmaн}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора при номинальной частоте питающей сети  $f_{1н}$ ;  $X_{2\sigmaн}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при номинальной частоте питающей сети  $f_{1н}$ ;  $X_{\mu н}$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания при номиналь-

ной частоте питающей сети  $f_{1H}$ ;  $\omega_{0j} = \frac{\pi f_{1j}}{p}$  – синхронная угловая скорость;  $p$  – число пар полюсов;  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;  $U_{VD} = 1$  – прямое падение напряжения на диоде выпрямительного моста ПЧ (рис. 1), В;  $U_{VT} \approx 1,5$  – прямое падение напряжения на *IGBT*-транзисторе инвертора напряжения [7], В;  $f_{1*} = f_{1j}/f_{1H}$  – относительная частота напряжения инвертора;  $f_{1j}$  – текущее значение частоты напряжения инвертора;

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{(R_1 + R_{1доб})^2 + (X_{1сн}f_{1*} + X_{1н}f_{1*})^2}} \text{ – ток холостого хода;}$$

$$I_2' = \frac{U_{1j} - 2 \cdot U_{VD} - 2 \cdot U_{VT}}{\pm \sqrt{\left( (R_1 + R_{1доб}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{кн}^2 f_{1*}^2 + \left( \frac{(R_1 + R_{1доб}) R_2'}{s X_{1н} f_{1*}} \right)^2}} \text{ – ток ротора, при-}$$

веденный к обмотке статора асинхронного двигателя в функции скольжения.

Анализ (1) показывает, что ограничение пускового тока АД в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах с инвертором напряжения и скалярным управлением возможно двумя способами:

- уменьшением начального значения напряжения обмоток статора АД с последующим его увеличением по мере разгона двигателя;
- уменьшением начального значения частоты обмоток статора двигателя с последующим ее увеличением по мере разгона двигателя.

Простейшим способом токоограничения в скалярных частотно-регулируемых электроприводах, учитывающих отмеченные способы токоограничения, является формирование частоты управления электроприводом  $f_{1зи}(t)$  от задатчика интенсивности ЗИ (рис. 1) [8, 9].

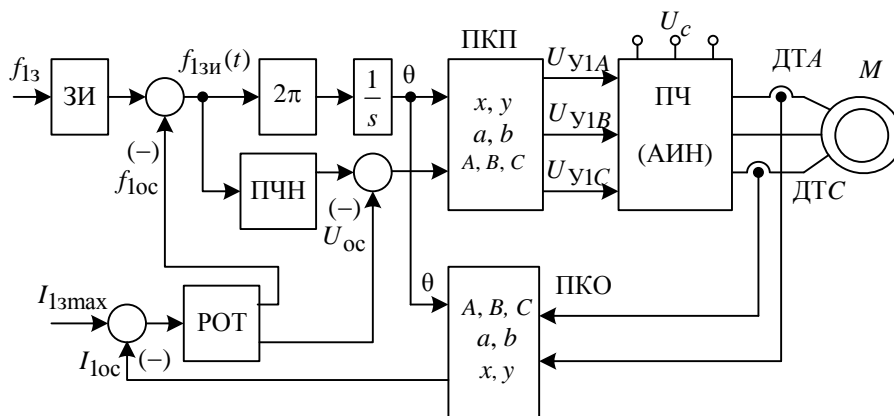


Рис. 1. Функциональная схема скалярного электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

В такой схеме скалярного управления частота и напряжение преобразователя частоты (ПЧ) увеличиваются одновременно по мере разгона АД, причем характер нагрузки на валу двигателя учитывается блоком «преобразователь частоты – напряжение» (ПЧН), формирующим вольт-частотную характеристику ПЧ. На рис. 1 приняты также следующие условные обозначения: асинхронный двигатель  $M$ ; ПКП – прямой координатный преобразователь; ПКО – обратный координатный преобразователь; ДТА, ДТС – датчики тока двигателя; РОТ – регулятор ограничения тока.

Для исследования процессов в скалярном электроприводе в программной среде MATLAB (Simulink) составлена модель асинхронного электропривода, схема силовых цепей которого приведена на рис. 2.

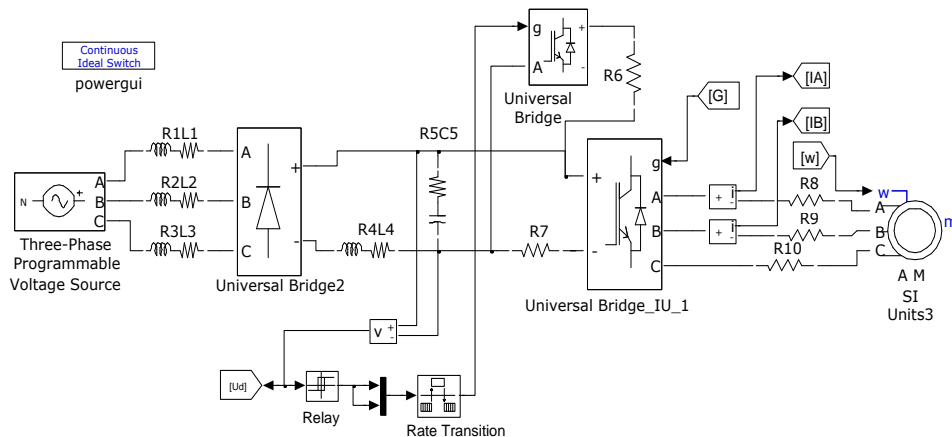


Рис. 2. Схема силовых цепей имитационной модели скалярного асинхронного электропривода

Схема силовых цепей имитационной модели содержит трехфазную сеть переменного тока, неуправляемый выпрямитель, емкостный фильтр  $C5$ , инвертор напряжения на IGBT-транзисторах, асинхронный двигатель. Модель электропривода учитывает активные и индуктивные сопротивления проводов и кабелей необходимые для подключения преобразователя частоты к сети и к двигателю, падения напряжения на полупроводниковых приборах. Для торможения электропривода имеется узел сброса энергии, состоящий из дополнительного ключа (Universal Bridge), выполненного на IGBT-транзисторе, внешнего резистора  $R6$  и схемы управления ключом. Транзистор управляется двухпозиционным реле (Relay), открывается транзистор при превышении напряжения на емкостном фильтре  $C5$  допустимого значения (в данном случае 630 В), закрывается при напряжении 600 В. При открытии транзисторного ключа происходит сброс энергии, запасенной в емкостном фильтре, в резистор  $R6$ , рассеивающий эту энергию.

Переходные процессы тока статора  $I_1 = f(t)$ , электромагнитного момента  $M = f(t)$  и скорости  $\omega = f(t)$  асинхронного двигателя в частотно-регулируемом скалярном электроприводе с  $S$ -образным задатчиком интенсивности ЗИ приведены на рис. 3. Расчет переходных процессов электропривода проведен для асинхронного двигателя типа AB250S6, имеющего следующие технические данные: номинальная мощность  $P_H = 45$  кВт; номинальное фазное напряжение  $U_{1\phi H} = 220$  В; номинальное скольжение  $s_H = 1,6$  %;

номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_H = 0,85$  о.е.; номинальный КПД  $\eta_H = 92\%$ ; номинальный ток статора  $I_{1H} = 87,19$  А; момент инерции двигателя  $J_{дв} = 1,2$  кг·м<sup>2</sup>; момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя  $J_M = 1,63$  кг·м<sup>2</sup>. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя определены в соответствии с методикой, изложенной в [10].

Как следует из графиков переходных процессов, задание на пуск АД подается на электропривод в момент времени  $t = 0,1$  с. Этого времени достаточно для окончания переходных режимов в преобразователе частоты при его включении, в частности для заряда конденсатора  $C5$  емкостного фильтра преобразователя.

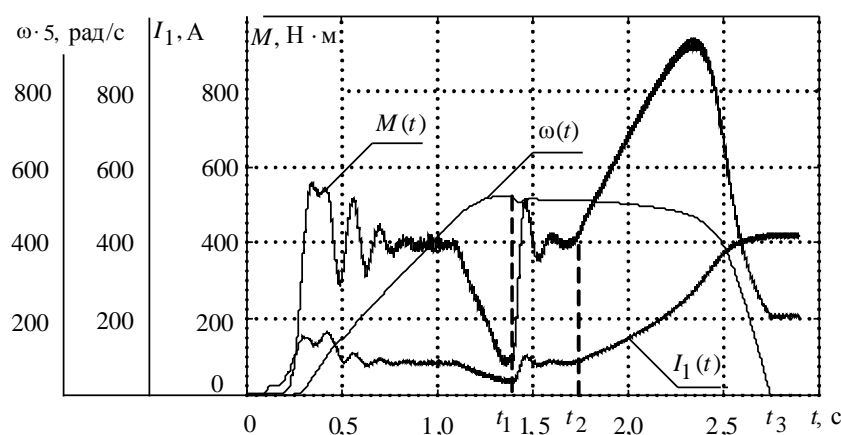


Рис. 3. Пуск асинхронного двигателя в частотно-регулируемом скалярном электроприводе с задатчиком интенсивности

Анализ графиков переходных процессов показывает, что переходный процесс пуска протекает при ограниченных значениях момента  $M$  и тока статора  $I_1$  АД, нарастание скорости  $\omega = f(t)$  определяется темпом изменения сигнала задатчика интенсивности ЗИ. Начальный момент сопротивления на валу двигателя равен  $100$  Н·м. В момент времени  $t_1 = 1,4$  с на валу АД произведен наброс нагрузки до уровня  $M_c = 400$  Н·м. Скорость двигателя уменьшилась в соответствии с жесткостью его механической характеристики. В момент времени  $t_2 = 1,7$  с началось плавное, но неконтролируемое увеличение момента сопротивления на валу АД до полного его останова в момент времени  $t_3$ . При таком изменении нагрузки на валу двигателя его момент достиг значения  $M = 940$  Н·м с последующим уменьшением до пускового момента в соответствии со статической механической характеристикой электропривода. Значение тока, плавно увеличиваясь, ограничилось током короткого замыкания статической электромеханической характеристики на уровне  $I_1 = 411$  А. Такие значения токов в питающей сети нежелательны для параллельно работающей нагрузки. Окончательное выключение электропривода определяется настройкой его времятоковой характеристики, т. е. в аварийном режиме.

# 1. ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА СТАТОРА АД ТОКОВОЙ ОТСЕЧКОЙ

Для ограничения токов статора АД во всех режимах его работы в частотно-регулируемых скалярных электроприводах рекомендуется задержанная отрицательная обратная связь по току, так называемая токовая отсечка. Контур ограничения тока реализуется по схеме, приведенной на рис. 4. Особенностью контура ограничения тока является работа регулятора ограничения тока (РОТ) только при превышении током статора максимально допустимого значения. Выходной сигнал РОТ может воздействовать на уменьшение как выходного напряжения, так и частоты преобразователя.

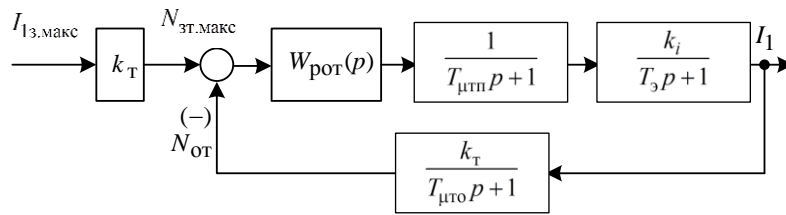


Рис. 4. Структурная схема контура ограничения тока

На рис. 4 приняты следующие условные обозначения физических величин:

$T_{мтп}$  – период несущей частоты ШИМ преобразователя;

$T_{1э}$  – электромагнитная постоянная времени цепи статора;

$T_{мтп} = T_{пк.т} + T_{зу.и}$  – малая постоянная времени в прямом канале контура тока;

$T_{мто} = T_{ос.т} + T_{ф.от}$  – малая постоянная времени цепи обратной связи контура тока;

$T_{пк.т}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура тока, с;

$T_{зу.и}$  – интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора, с;

$T_{ос.т}$  – интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока, с;

$T_{ф.от}$  – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока, с;

$k_T = k_{дт} k_{ос.т}$  – коэффициент обратной связи по току;

$k_{дт} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{АЦП дт}}}{\sigma_T (\sqrt{2} \cdot I_{эп.макс})}$  – коэффициент передачи датчика тока, 1/А;

$\sigma_T$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока;

$n_{АЦП дт}$  – разрядность АЦП датчика тока;

$k_{ос.т}$  – коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока;

$N_{зт.макс}$  – максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока привода  $I_{эп.макс}$ .

### Расчетные параметры настройки контура ограничения тока

Передачная функция ПИ-регулятора ограничения тока

$$W(p)_{\text{рот}} = k_{\text{рот}} \frac{T_{\text{рот}} p + 1}{T_{\text{рот}} p}.$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

– при регулировании по каналу управления напряжением инвертора

$$k_{\text{рот}u} = \frac{T_{1\Omega}}{k_{iu} k_T a_T T_{\text{мтэ}}}; \quad (2)$$

– при регулировании по каналу управления частотой инвертора

$$k_{\text{рот}f} = \frac{T_{1\Omega}}{k_{if} k_T a_T T_{\text{мтэ}}}, \quad (3)$$

где  $k_{if} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} \frac{1}{R_{1\Omega}}$  – коэффициент передачи по каналу частоты, А/Гц;

$k_{iu} = \frac{1}{R_{1\Omega}}$  – коэффициент передачи по каналу напряжения, А/В;  $k_T = \frac{N_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}}$  –

коэффициент обратной связи по току, 1/А;  $T_{\text{мтэ}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_T} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}}$  – экви-

валентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока, с;  $n_T = 1...3$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;  $a_T = 2$  – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО).

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{рот}} = T_{1\Omega}, \text{ с.}$$

При  $n_T = 2$  настройка контура тока близка к типовой настройке на МО. Основным режимом работы контура ограничения тока является реакция на возмущающие воздействия, в результате которых ток двигателя может превысить допустимое значение. Контур обеспечивает нулевую статическую ошибку тока стопорения  $\Delta I_{\text{у.ст}} = 0$ . В переходных режимах при изменении скорости появляется динамическая ошибка по возмущению, величина которой зависит от производной скорости.

### Рекомендации по выбору параметров при настройке контура ограничения тока

1. Разрядность АЦП датчика тока  $n_{\text{АЦП дт}} = 10$  или  $12$ .

2. Коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока  $\sigma_T \geq 1.2$ . Может быть выбрано желаемое максимальное значение измеряемого тока  $(\sigma_T \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}})_{\text{макс}}$ , тогда

$$\sigma_T = \frac{(\sigma_T \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}})_{\text{макс}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}}.$$

3. Значение максимального задания на входе контура тока  $N_{\text{зт.макс}}$  рекомендуется выбирать из следующих условий:

– в относительных единицах

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_T}, \text{ тогда } N_{\text{от.макс}} = 1, k_T = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}}, k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{n_{\text{АЦПдт}}}};$$

– в единицах измерения тока (А)

$$N_{\text{зт.макс}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}, \text{ тогда } k_T = 1, k_{\text{ос.т}} = 1 / k_{\text{дт}};$$

$$N_{\text{зт.макс}} = I_{\text{ЭП.макс}}, \text{ тогда } k_T = \frac{1}{\sqrt{2}}, k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot k_{\text{дт}}}$$

– в дискретах АЦП датчика тока

$$N_{\text{зт.макс}} = k_{\text{дт}} \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}, \text{ тогда } k_T = k_{\text{дт}}, k_{\text{ос.т}} = 1.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока в общем случае определяется по выражению

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{k_T}{k_{\text{дт}}}.$$

4. Интервалы квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока  $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{ПК.т}} = T_{\text{ШИМ}}$ , с.

5. Постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока  $T_{\text{ф.от}} = 0$ .

6. Коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном  $n_T = 2$ .

7. Коэффициент типовой настройки контура тока  $a_T = 2$ .

### Ограничение тока асинхронного двигателя в канале регулирования напряжения

Способ токоограничения путем уменьшения начального напряжения на обмотках статора применяется для пуска асинхронных и синхронных двигателей средней и большой мощности с автотрансформаторами и понижающими трансформаторами в релейно-контакторных электроприводах, а также в электроприводах с тиристорными пусковыми устройствами.



Функциональная схема скалярного электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель с задержанной отрицательной обратной связью в канале регулирования напряжения приведена на рис. 1. Коэффициент усиления РОТ при регулировании по каналу управления напряжением инвертора определяется выражением (2). Для пояснения процесса ограничения пускового тока на рис. 5 приведены статические электромеханические и механические характеристики АД при номинальном и пониженном напряжении на обмотках статора.

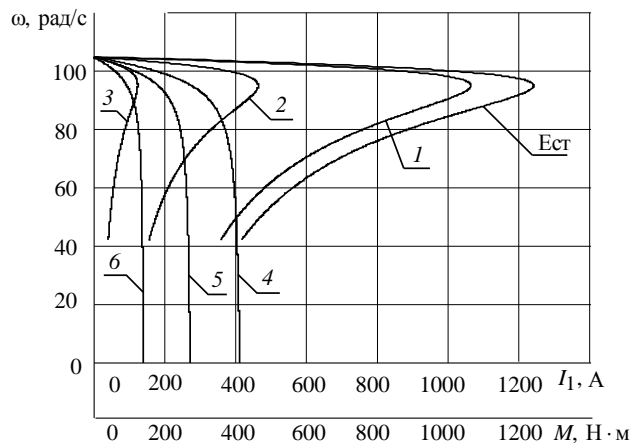


Рис. 5. Статические электромеханические и механические характеристики АД при номинальном и пониженном напряжении на обмотках статора

На рис. 5 приведены механические  $M = f(\omega)$  и электромеханические  $I_1 = f(\omega)$  характеристики АД для следующих напряжений преобразователя частоты: Ест – естественная механическая характеристика,  $U_{1фн} = 220$  В; 1 – механическая характеристика с предельным максимальным напряжением преобразователя частоты ( $U_{1ф4} = 209,3$  В) при введении в сигнал управления инвертором  $U_{y1A}$ ,  $U_{y1B}$ ,  $U_{y1C}$  (рис. 1) третьей гармоники синусоидального напряжения [11–14]; 2 – искусственная механическая характеристика асинхронного двигателя при  $U_{1ф5} = 140$  В; 3 – искусственная механическая характеристика асинхронного двигателя при  $U_{1ф6} = 75$  В; 4, 5, 6 – искусственные электромеханические характеристики асинхронного двигателя соответственно при  $U_{1ф4} = 209,3$  В,  $U_{1ф5} = 140$  В,  $U_{1ф6} = 75$  В.

Анализа статических характеристик показывает, что при пуске с ограничением тока задержанной отрицательной обратной связью в канале регулирования напряжения преобразователя частоты и сравнительно небольшим (меньшим номинального) моментом сопротивления на валу АД электропривод, поддерживая максимально допустимый ток, может создавать пусковой момент, недостаточный для его разгона. Графики переходных процессов пуска АД для рассматриваемого режима работы приведены на рис. 6.

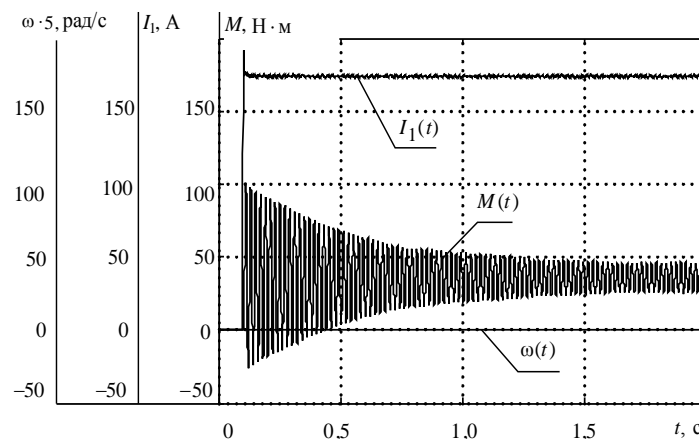


Рис. 6. Графики переходных процессов пуска АД в частотно-регулируемом скалярном электроприводе с задержанной отрицательной обратной связью в канале регулирования напряжения

Анализ графиков переходных процессов пуска АД показывает, что применять канал регулирования напряжения для ограничения тока в частотно-регулируемом скалярном электроприводе неэффективно. Задержанная отрицательная обратная связь по току ограничила ток статора АД на допустимом уровне  $I_{ст} = 174$  А, но одновременное уменьшение пускового момента не позволило произвести пуск электропривода.

### Ограничение тока асинхронного двигателя в канале регулирования частоты

При ограничении тока статора АД по каналу управления частотой инвертора изменяются индуктивные сопротивления  $X_{1\sigma}$ ,  $X'_{2\sigma}$  и  $X_\mu$  схемы замещения АД, его синхронная угловая скорость  $\omega_0$ . Кроме того, скалярный электропривод с частотным регулированием скорости построен таким образом, что одновременно с изменением частоты инвертора напряжения изменяется и его фазное напряжение [9, 15]. Закон изменения фазного напряжения преобразователя в функции от задающей частоты  $f_{13}$  определяется вольт-частотной характеристикой в блоке ПЧН в зависимости от характера нагрузки на валу АД. При пуске двигателя целесообразно одновременно уменьшать и напряжение, и частоту преобразователя, поддерживая тем самым постоянство магнитного потока и момента двигателя.

Графики переходных процессов пуска АД с токовой отсечкой в канале регулирования частоты приведены на рис. 7.

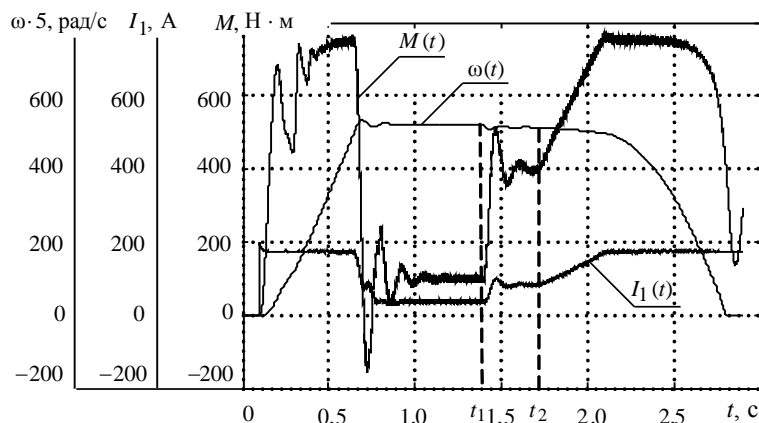


Рис. 7. Пуск асинхронного электропривода с токоограничением в канале регулирования частоты

Анализ графиков (рис. 7) показывает, что переходный процесс пуска АД протекает при ограниченных значениях момента  $M$  и тока статора  $I_1$ , причем ток статора в режиме токоограничения поддерживается на постоянном предельно заданном значении  $I_{1\text{макс}}$ . В момент времени  $t_1 = 1,4$  с на валу АД произведен наброс нагрузки до уровня  $M_c = 400$  Н·м. Скорость двигателя уменьшилась в соответствии с жесткостью его механической характеристики. В момент времени  $t_2 = 1,7$  с началось плавное увеличение момента сопротивления на валу АД до полного его останова. При действии токовой отсечки электромагнитный момент АД ограничился на допустимом уровне 750 Н·м. Значение тока, плавно увеличиваясь, ограничилось предельно допустимым значением  $I_{1\text{макс}} = 174$  А. Окончательное выключение электропривода происходит или по команде оператора, или срабатыванием времятоковой защиты преобразователя частоты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования систем скалярных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с ограничением тока в динамических режимах позволяют сделать следующие выводы.

1. Задатчик интенсивности позволяет ограничить пусковой ток асинхронного двигателя, однако только в переходных режимах по управляющему воздействию. При воздействии возмущающего воздействия ток статора АД может превысить допустимые значения, что негативно сказывается на параллельно работающей нагрузке.

2. Задержанная отрицательная обратная связь по току в канале регулирования напряжения ограничивает пусковой ток АД, однако ограничивает и электромагнитный момент АД, пропорциональный квадрату напряжения статора, что в большинстве практических случаев не позволяет произвести пуск асинхронного двигателя с реальной нагрузкой на его валу.

3. Задержанная отрицательная обратная связь по току в канале регулирования частоты позволяет ограничить динамические токи АД как в переход-

ных процессах пуска двигателя, так и при изменении нагрузки на его валу. При неконтролируемых изменениях нагрузки на валу двигателя его окончательный останов происходит при срабатывании времятоковой защиты преобразователя частоты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis / M.A. Vasilev, P. Blum, G. Chubarian, R. Olsen, C. Bennight, T. Cobine, D. Fackler, M. Hastedt, D. Houpt, Z. Mateo Y.B. Vasileva // *Journal of Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 75, iss. 3. – P. 455–463. – doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.08.008.
2. Orlowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2014. – Vol. 98. – P. 31–45. – doi: 10.1016/j.matcom.2013.05.012.
3. An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: theory and experiment / G. Abdelmadjid, B.S. Mohamed, T. Mohamed, S. Ahmed, M. Youcef // *Electric Power Systems Research*. – 2013. – Vol. 104. – P. 129–137. – doi: 10.1016/j.epsr.2013.06.023.
4. Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives // *Energy Conversion and Management*. – 2007. – Vol. 48, iss. 12. – P. 3095–3101. – doi: 10.1016/j.enconman.2007.05.010.
5. Sutikno T., Idris N.R.N., Jidin A. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 32. – P. 548–558. – doi: 10.1016/j.rser.2014.01.040.
6. Dominic D.A., Chelliah T.R. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes // *ISA Transactions*. – 2014. – Vol. 53, iss. 5. – P. 1680–1694. – doi: 10.1016/j.isatra.2014.04.008.
7. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Додэка-XXI, 2001. – 384 с.
8. Idir A., Kidouche M. Real-time simulation of V/f scalar controlled induction motor using RT-lab platform for educational purpose // *Recent advances in systems: proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics (SCI 2013), Venice, Italy, September 28–30, 2013*. – Venice, 2013. – P. 189–192. – (Recent advances in Electrical Engineering; 24).
9. Akin B., Nishant G. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors: application report SPRABQ8 / Texas Instrument Incorporated. – Dallas, Texas: Texas Instruments, 2013. – 25 p.
10. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // *Электромеханические преобразователи энергии: материалы международной научно-технической конференции, 17–19 октября 2007 г.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 269–272.
11. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
12. Real-time modeling and simulation of an active power filter / S. Beaulieu, M. Ouhrouche, C. Dufour, P.F. Allaire // *Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Power and Energy Systems, PES 2007, Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007*. – Calgary, ACTA Press, 2007. – P. 128–133.
13. Akin B., Nishant G. Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors / Texas Instruments Incorporated. – Dallas, Texas, 2000. – 27 p. – (C2000: Systems and Applications).
14. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar control of induction motor drives using dSPACE DS1104 // *Recent advances in systems: proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics (SCI 2013), Venice, Italy, September 28–30, 2013*. – Venice, 2013. – P. 322–327. – (Recent advances in Electrical Engineering; 24).
15. Современная технология разработки цифровых систем управления электроприводами / А.С. Каракулов, Н.В. Гусев, Г.В. Родионов, М.В. Сливенко // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 6. – С. 46–50.

Удут Леонид Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Электротехнического института Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – автоматизация электротехнических установок. Имеет более 50 публикаций, в том числе 18 пособий, 14 авторских изобретений и патентов. E-mail: udut@tpu.ru.

Чернышев Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Электротехнического института Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование электроприводов переменного тока. Имеет более 40 публикаций, в том числе 14 пособий, 6 авторских изобретений и патентов. E-mail: ach@tpu.ru.

Чернышев Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование электроприводов переменного тока, систем отжига электрических проводов. Имеет более 30 публикаций, в том числе 16 пособий. E-mail: chia@tpu.ru

### ***Current limiting in scalar electric drives with induction motors***<sup>\*</sup>

L.S. UDUT<sup>1</sup>, A. Yu. CHERNYSHEV<sup>2</sup>, I.A. CHERNYSHEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: udut@tpu.ru.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: ach@tpu.ru.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.). E-mail: chia@tpu.ru.

The relevance of the research is caused by the development of scalar variable-frequency electric drives with induction motors both with new structures and with newly formed production laboratories. Due to their relative simplicity scalar variable-frequency electric drives are widely applied in industrial units which do not require a wide range of speed control and high qualities of transients. The transients in scalar motor drives should proceed under limited current and torque conditions.

The main aim of the research is to synthesize/determine parameters of current limiting controllers and to make recommendations for their selection considering the digit capacity of analogue-digital converters of current sensors, the quality of transients in the current limiting circuit, current quantization of feedback loop signals as well as the study of current limiting systems in scalar motor drives with induction motors.

The authors have studied the motor drives using the simulation method in MATLAB (Simulink) and considered the peculiarities of the frequency converter power circuit and the motor drive control system. It is proved that in order to increase the validity of results of simulating the process of scalar motor drives with asynchronous motors the frequency converter model is to take into account all the main elements such as the power grid, a rectifier, resistances of interconnecting wires and cables, a capacitive filter, and a PWM voltage inverter. Besides, the third voltage harmonic should be introduced into the inverter control signal. It is ascertained that the current should be limited in scalar variable-frequency electric drives by the delayed reversed feedback or a current cutoff in the frequency control channel for both controlling and disturbing actions. The required quality of simulation is proved by using the developed model for preliminary adjustment of induction motor drives.

**Key words:** frequency, induction motor drive, scalar control, torque, pulse-width modulation, simulation, current limiting, dynamics, stator

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-120-133

---

<sup>\*</sup> Received 12 February 2015.

## REFERENCES

1. Vasilev M.A., Blum P., Chubarian G., Olsen R., Bennight C., Cobine T., Fackler D., Hastedt M., Houtp D., Mateo Z., Vasileva Y.B. A new natural gamma radiation measurement system for marine sediment and rock analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, vol. 75, iss. 3, pp. 455–463. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.08.008
2. Orłowska-Kowalska T., Tarchala G., Dybkowski M. Sliding-mode direct torque control and sliding-mode observer with a magnetizing reactance estimator for the field-weakening of the induction motor drive. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2014, vol. 98, pp. 31–45. doi: 10.1016/j.matcom.2013.05.012
3. Abdelmadjid G., Mohamed B.S., Mohamed T., Ahmed S., Youcef M. An improved stator winding fault tolerance architecture for vector control of induction motor: theory and experiment. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 104, pp. 129–137. doi: 10.1016/j.epsr.2013.06.023
4. Vaez-Zadeh S., Jalali E. Combined vector control and direct torque control method for high performance induction motor drives. *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, iss. 12, pp. 3095–3101. – doi: 10.1016/j.enconman.2007.05.010
5. Sutikno T., Idris N.R.N., Jidin A. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 548–558. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.040
6. Dominic D.A., Chelliah T.R.. Analisis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes. *ISA Transactions*, 2014, vol. 53, iss. 5, pp. 1680–1694. doi: 10.1016/j.isatra.2014.04.008
7. Voronin P.A. *Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semeistva, kharakteristiki, primeneniye* [Power semiconductor switches: families, characteristics, application]. Moscow, Dodeka-XXI Publ. House, 2001. 384 p.
8. Idir A., Kidouche M. Real-time simulation of V/f scalar controlled induction motor using RT-lab platform for educational purpose. *Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics "Recent advances in systems" (SCI 2013)*, Venice, Italy, September 28–30, 2013, pp. 189–192.
9. Akin B., Nishant G. *Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors: application report SPRABQ8*. Dallas, Texas, Texas Instrument Incorporated, 2013. 25 p.
10. Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. [Determination of the induction motor parameters according to the catalogue data]. *Materiály mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Electromechanical energy converters"], Tomsk, Russia, 17–19 October 2007, pp. 269–272.
11. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovaniye elektropriwodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical simulation of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.
12. Beaulieu S., Ouhrrouche M., Dufour C., Allaire P.F. Real-time modeling and simulation of an active power filter. *Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Power and Energy Systems, PES 2007*, Clearwater, Florida, USA, January 3–5, 2007, pp. 128–133.
13. Akin B., Nishant G. *Scalar (V/f) control of 3-phase induction motors. C2000: Systems and Applications*. Dallas, Texas, Texas Instrument Incorporated, 2000. 27 p.
14. Akroum H., Kidouche M., Aibeche A. Scalar control of induction motor drives using dSPACE DS1104. *Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics "Recent advances in systems" (SCI 2013)*, Venice, Italy, September 28–30, 2013, pp. 322–327.
15. Karakulov A.S., Gusev N.V., Rodionov G.B., Slivenko M.V. Sovremennaya tekhnologiya razrabotki tsifrovyykh sistem upravleniya elektroprivodami [Modern technology of digital electric drive control systems development]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2011, no. 6, pp. 46–50. (In Russian)