

# Разработка и исследование трехзонной системы векторного управления высокоскоростным асинхронным шпинделем

АЛЕКСЕЕВ А.А., КРАСИЛЬНИКЪЯНЦ Е.В., ТЮТИКОВ В.В.

ИГЭУ им. Ленина, Иваново, Россия

Одним из основных требований, предъявляемых к электроприводам высокоскоростных шпинделей металлообрабатывающих станков, является возможность работы в широком диапазоне скоростей с минимальным временем разгона и торможения с целью повышения производительности труда. Традиционные системы двухзонного управления электроприводом, выделяющие зоны постоянного момента и постоянной мощности, не всегда могут обеспечить выполнение этих требований в комплексе. В статье описывается разработка системы управления приводом главного движения на базе асинхронного двигателя с выделением третьей скоростной зоны регулирования – зоны постоянного скольжения (снижающейся мощности), позволяющей работать с максимальным моментом в широком диапазоне скоростей. Предложена методика определения границ зон и законов регулирования, основанная на априорной информации о параметрах привода и схемы замещения двигателя. Результаты моделирования и проведенные эксперименты на шпиндельном асинхронном двигателе Fapis номинальной мощностью 15 кВт и максимальной скоростью 15000 об/мин показывают высокую эффективность разработанной системы управления. Использование предложенной системы управления приводом высокоскоростного шпинделя позволяет получить требуемую точность в режиме высокоскоростной обработки и повысить производительность работы металлообрабатывающих станков.

Ключевые слова: электропривод, система управления, асинхронный двигатель, векторное управление, шпиндель, высокоскоростная обработка

Одним из важных направлений в современном машиностроении является высокоскоростная обработка (ВСО) металлов. Металлорежущий станок, обеспечивающий режим ВСО, должен иметь скорость вращения шпинделя 12000–25000 об/мин, а в ряде случаев до 50000 об/мин.

В приводах высокоскоростных шпинделей активно используются асинхронные электродвигатели (АД). Основными требованиями, предъявляемыми к таким приводам, являются широкий диапазон регулирования вверх от номинальной скорости (до 10:1 и выше), минимальное время разгона и торможения, поддержание заданного момента [1]. Для обеспечения высоких динамических свойств шпиндельного электропривода (ЭП) система управления (СУ) должна поддерживать максимально допустимый момент во всем скоростном диапазоне.

В асинхронном электроприводе скорости выше номинальной достигаются путем ослабления поля, для чего достаточно снижать потокосцепление ротора.

Традиционно системы управления, включающие ослабление поля, принято называть «двуухзонаими» [2], так как они обеспечивают работу в первых двух зонах регулирования скорости двигателя (зоны постоянного момента и постоянной мощности). Однако для

обеспечения максимального момента в зоне повышенных скоростей более корректно будет выделять еще и третью зону [3–8], в которой АД работает с постоянным скольжением, близким к критическому, а его мощность уменьшается.

Основные принципы трехзонного управления, на которых базируются существующие СУ, изложены в [3, 4]. В литературе описывается несколько подходов к реализации таких СУ, отличающихся различными методами и способами их реализации. Например, в [5] приведена функциональная схема системы трехзонного управления с ослаблением поля в зависимости от заданной скорости. Недостатком этой СУ является использование сигнала задания на скорость ротора, что накладывает дополнительные требования на задатчик интенсивности, а также высокая чувствительность к параметрам ЭП.

В системе, описанной в [6], для формирования закона управления потокосцеплением ротора (ПР) используется регулятор напряжения, а необходимость расчета границ зон управления отсутствует. Тем не менее, существует необходимость определения параметров двигателя, а наличие дополнительного контура регулирования усложняет процесс реализации и настройки системы.

В [7] для работы в третьей зоне предлагается снижать ограничение выхода регулятора скорости при достижении скольжения, близкого к максимальному, но без описания закона его снижения.

Стратегия, позволяющая получить максимальный момент путем минимизации потерь в статоре и роторе, описана в [8]. Однако в этом случае необходимо знать параметры воздушного зазора в двигателе и рассчитывать ток ротора, что зачастую не представляется возможным. Кроме того, в динамических режимах могут присутствовать колебания момента. Эта проблема частично решена в [9, 10], где описаны системы трехзонного управления, позволяющие получить максимально возможный момент с учетом минимизации колебаний во время динамических режимов. Однако в них присутствуют те же недостатки, что в [6]. Статья [11] также посвящена получению максимального момента с улучшенной динамикой, но она основывается на методе управления с прогнозирующими моделями конечного управляющего множества (*FCS-MPC*), который чрезмерно требователен к вычислительным ресурсам контроллера.

В [12] описан метод определения предельных механических характеристик асинхронного привода в трех зонах для анализа режимов его работы во всем диапазоне скоростей. Предложенный авторами алгоритм может быть использован для реализации систем управления тяговым электроприводом.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что проблема эффективного построения трехзонной СУ высокоскоростным электроприводом существует и исследования в этой области продолжаются.

Данная статья посвящена разработке и исследованию трехзонной СУ высокоскоростным шпинделем (ВСШ) с АД с поддержанием максимального момента во всем диапазоне скоростей. Представлена функциональная схема, приведены результаты расчетов, моделирования и экспериментов.

**Теоретические сведения.** Построим систему на базе векторного управления с ориентацией по ПР, так как в этом случае математическое описание процессов привода получается наиболее простым, а ориентация по потокосцеплению ротора позволяет управлять его амплитудой с целью ослабления поля. Будем использовать систему координат  $dq$ , вращающуюся со скоростью вектора ПР, где по оси  $d$  идет управление током намагничивания двигателя  $I_d$ , а по оси  $q$  – моментообразующим током  $I_q$ .

В любом режиме работы длина вектора напряжения двигателя не должна превышать амплитуду максимального напряжения на выходе инвертора  $U_{smax}$ , которое может быть приложено к обмоткам статора:

$$\sqrt{U_d^2 + U_q^2} \leq U_{smax}, \quad (1)$$

где  $U_d$ ,  $U_q$  – компоненты вектора напряжения статора в системе координат  $dq$ , В.

Из уравнений асинхронного двигателя [1] эти компоненты определяются как

$$U_q = R_s I_q + s\sigma L_s I_q + \omega_e \left( \sigma L_s I_d + \frac{L_m}{L_r} \Psi \right); \quad (2)$$

$$U_d = R_s I_d + s \left( \sigma L_s I_d + \frac{L_m}{L_r} \Psi \right) - \omega_e \sigma L_s I_q, \quad (3)$$

где  $R_s$  – сопротивление статора, Ом;  $\omega_e$  – скорость вращения вектора ПР, рад/с;  $I_d$  – ток намагничивания (ТН) двигателя, А;  $I_q$  – моментообразующий ток (МТ) двигателя, А;  $L_s$  – индуктивность статора, Гн;  $L_m$  – взаимоиндуктивность статора и ротора, Гн;  $L_r$  – индуктивность ротора, приведенная к статору, Гн;  $\Psi$  – амплитуда вектора ПР, Вб;  $s = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $\sigma$  – глобальный коэффициент рассеяния двигателя, отн.ед.

Если принять, что в установившихся режимах при работе на скорости выше номинальной падением напряжения на активном сопротивлении статора можно пренебречь, то выражения (2) и (3) примут вид:

$$U_q = \omega_e L_s I_q; \quad (4)$$

$$U_d = -\omega_e \sigma L_s I_d. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (1), получим

$$\sqrt{I_d^2 + \sigma^2 I_q^2} \leq \frac{U_{smax}}{\omega_e L_s}. \quad (6)$$

Компоненты вектора тока статора по осям  $d$ ,  $q$  не должны превышать амплитуды максимального тока статора АД:

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{smax}. \quad (7)$$

Электромагнитный момент АД в статике определяется согласно [2]:

$$M = 1,5 Z_p \frac{L_m^2}{L_r} I_d I_q = k_t I_d I_q, \quad (8)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя;  $k_t = 1,5 Z_p L_m^2 / L_r$ .

В первой зоне  $I_d$  и  $I_q$ , обеспечивающие максимальный момент, будут определяться из (7):

$$I_d = \frac{\Psi_n}{L_m} = I_{dn}; \quad (9)$$

$$I_q = \sqrt{I_{smax}^2 - I_d^2}, \quad (10)$$

где  $\Psi_n$  – номинальное потокосцепление ротора, Вб;  $I_{dn}$  – номинальный ток намагничивания, А.

При увеличении скорости выше граничной необходимо ослабление поля, т.е. снижение тока намагничивания. Скорость  $\omega_{ell}$ , задающая границу первой и второй зон, выводится из (6) и (7):

$$\omega_{ell} = \frac{U_{smax}}{L_s \sqrt{(\sigma^2 I_{smax}^2 + (1-\sigma^2) I_{dn}^2)}}. \quad (11)$$

Значение граничной скорости в общем случае может отличаться от номинальной скорости двигателя, так как зависит от параметров его схемы замещения.

Из (11) при подстановке  $I_{dn} = I_d$  выводится закон изменения тока намагничивания:

$$I_d = \sqrt{\frac{\left(\frac{U_{smax}}{\omega_e L_s}\right)^2 - (\sigma I_{smax})^2}{1 - \sigma^2}}, \quad (12)$$

а закон изменения моментаобразующего тока останется как в первой зоне (10).

При достижении скорости начала третьей зоны ток статора необходимо снижать, поддерживая напряжение на максимальном уровне. Граница второй и третьей зон  $\omega_{eIII}$  определяется из (6), (7) и (8) по формуле

$$\omega_{eIII} = \frac{U_{smax}}{I_{smax}} \sqrt{\frac{1 + \sigma^2}{2\sigma^2 L_s^2}}, \quad (13)$$

при этом для обеспечения максимального момента токи в третьей зоне должны изменяться согласно

$$I_d = \frac{U_{smax}}{\sqrt{2}L_s \omega_e}; \quad I_q = \frac{U_{smax}}{\sqrt{2}\sigma L_s \omega_e}, \quad (14)$$

что соответствует линейному изменению по закону

$$I_q = \frac{I_d}{\sigma}. \quad (15)$$

Перепишем выражения (9), (12) и (14) с целью записи полного закона ослабления поля:

$$\Psi^* = L_m \begin{cases} I_{dn} & \text{if } 0 < |\omega_e| < \omega_{eII}; \\ \sqrt{\frac{\left(\frac{U_{smax}}{\omega_e L_s}\right)^2 - (\sigma I_{smax})^2}{1 - \sigma^2}} & \text{if } \omega_{eII} < |\omega_e| < \omega_{eIII}; \\ \frac{U_{smax}}{\sqrt{2}\omega_e L_s} & \text{if } |\omega_e| > \omega_{eIII}. \end{cases} \quad (16)$$

Для работы с максимальным моментом при реализации трехзонного регулирования задание  $I_q$  должно изменяться согласно (10) и (14) по закону

$$I_q = \begin{cases} \sqrt{I_{smax}^2 - I_d^2} & \text{if } 0 < |\omega_e| < \omega_{eIII}; \\ \frac{U_{smax}}{\sqrt{2}\omega_e \sigma L_s} & \text{if } |\omega_e| > \omega_{eIII}. \end{cases} \quad (17)$$

Выведенные законы (16) и (17) позволяют построить систему управления, способную обеспечить максимальный момент в трех зонах регулирования.

Заметим, что при неправильно введённых в систему управления параметрах двигателя будет происходить либо выход на максимальное напряжение и размыкание системы, либо недоиспользование двигателя по мощности и моменту, из-за чего появляется требование о наличии их точных значений. Они могут быть либо взяты из паспортных данных производителя двигателя, либо при их отсутствии предлагается воспользоваться разработанным инструментом идентификации параметров электродвигателей [13]. Проведенные исследования на различных электродвигателях показали, что разброс идентифицируемых параметров не превышает 7–10 % реальных величин. Шпиндельные двигатели в обязательном порядке оснащаются системой активного воздушного или водного охлаждения, вследствие чего температура ротора в рабочих режимах вырастает незначительно. Следовательно, изменением постоянной времени ротора можно пренебречь.

**Функциональная схема.** Функциональная схема предлагаемой СУ ВСШ приведена на рис. 1.

Силовая часть электропривода содержит АД, питаемый от преобразователя частоты с ШИМ на базе автономного инвертора напряжения (АИН). Преобразователь получает питание от звена постоянного тока (ЗПТ) и формирует на выходе напряжение требуемой частоты и амплитуды. СУ электроприводом построена по принципу подчиненного регулирования координат.

Внутренними являются контуры  $I_q$  и  $I_d$  с ПИ-регуляторами (РМТ и РТН), чья функция – формирование вектора напряжения статора в системе координат  $dq$ . Для повышения точности управления в систему вводится блок компенсации перекрестных связей (БКПС), сигналы на выходе которого суммируются с выходными сигналами регуляторов тока. Блок работает согласно формулам [5]:

$$\begin{aligned} U_d^{ff} &= -\omega_e \sigma L_s I_q - R_r \frac{L_m}{L_r^2} \Psi; \\ U_q^{ff} &= \omega_e \sigma L_s I_d + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \Psi, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $U_d^{ff}$ ,  $U_q^{ff}$  – добавки напряжения по осям  $d$  и  $q$  соответственно, В;  $R_r$  – сопротивление ротора, Ом

Алгоритм работы блока ограничителя напряжения (БОН) организован таким образом, чтобы во всех режимах работы привода заданное выходное напряжение инвертора не превышало его максимального значения с учетом фактического значения входного напряжения инвертора  $U_{smax}$  [2]. При работе привода в условиях ограничения напряжения канал оси  $d$  имеет приоритет перед каналом оси  $q$ , т. е. в первую очередь обеспечивается желаемый уровень потокосцепления, а уже затем формируется требуемый электромагнитный момент. Данная логика обеспечивает корректное функционирование привода во второй и третьей зонах регулирования скорости. Блок работает в соответствии с уравнениями [14]:

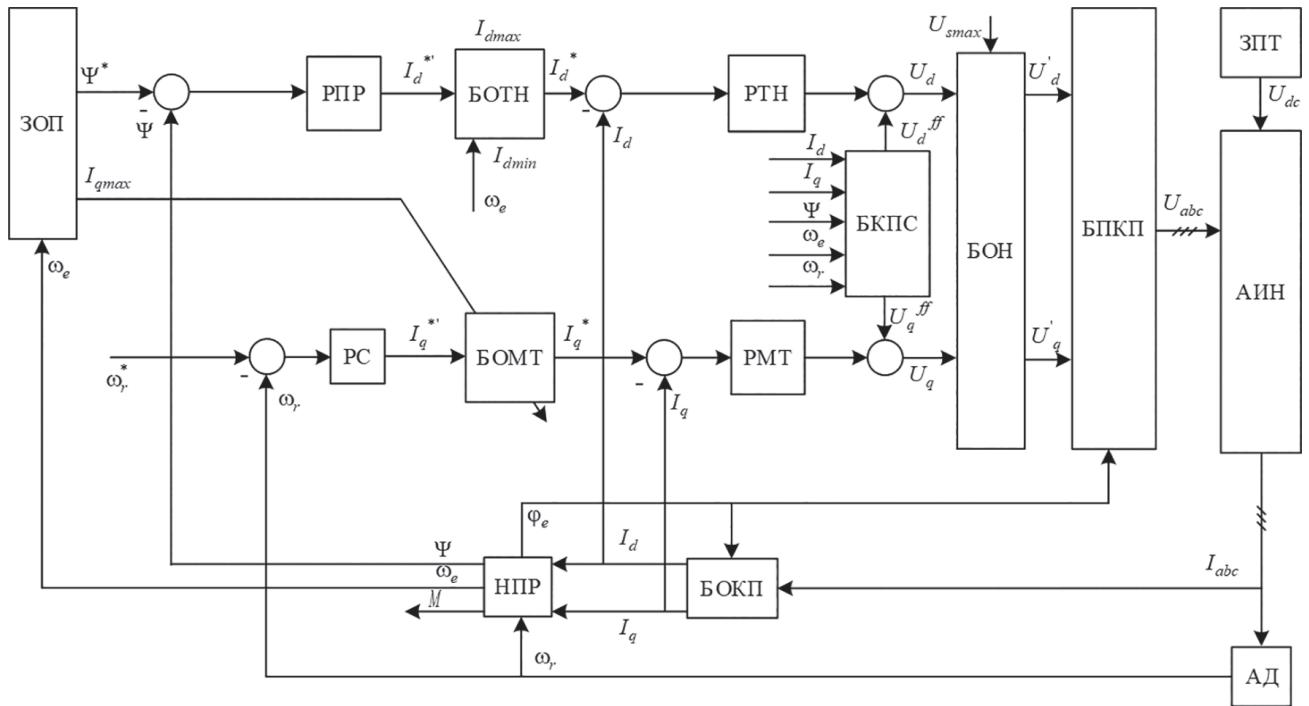


Рис. 1. Функциональная схема трехзонной СУ электроприводом ВСШ

Fig. 1. Functional diagram of the three-region high-speed spindle drive control system

$$U_s = \sqrt{U_d^2 + U_q^2};$$

$$U'_d = \begin{cases} \frac{U_d}{U_s} U_{smax} & \text{if } U_s > U_{smax}; \\ U_d & \text{if } U_s \leq U_{smax}; \end{cases}$$

$$U'_q = \begin{cases} \frac{U_q}{U_s} U_{smax} & \text{if } U_s > U_{smax}; \\ U_q & \text{if } U_s \leq U_{smax}, \end{cases}$$
(19)

где  $U_s$  – амплитуда вектора напряжения, В.

Блок координатных преобразований в прямом канале (БПКП) формирует из  $U_d$ ,  $U_q$  задание на скважность ШИМ  $U_{abc}$ , определяющее состояние стоек инвертора. Блок координатных преобразований в обратном канале (БОКП) из фазных токов  $I_{abc}$  формирует токи  $I_d$ ,  $I_q$  для замыкания контуров тока.

Внешним по отношению к контуру тока намагничивания является контур ПР с ПИ-регулятором (РПР). Обратная связь  $\Psi$  приходит с наблюдателя ПР (НПР), работающего по уравнениям [2]:

$$\begin{aligned} T_r \frac{d\Psi}{dt} &= -\Psi + L_m I_d; \quad \omega_e = Z_p \omega_r + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_q}{\Psi}; \\ \varphi_e &= \int \omega_e dt; \quad M = 1,5 Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi I_q, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $T_r$  – постоянная времени ротора, с.

Наблюдатель также содержит в себе функциональную зависимость  $L_m = f(\Psi)$ , получаемую по кривой намагничивания двигателя.

Задание для РПР  $\Psi^*$  формируется функциональным блоком ЗОП, реализующим закон ослабления поля (16) в зависимости от скорости поля  $\omega_e$  и параметров двигателя. Угол поворота вектора потокосцепления  $\varphi_e$  используется в блоках прямых и обратных координатных преобразованиях.

Выходной сигнал регулятора потокосцепления  $I_d^*$  в блоке БОТН ограничивается сверху на уровне  $I_{dmax}$ , который зависит от скорости поля. Если она равна нулю, то ограничение соответствует максимальному току статора  $I_{smax}$ , а если выше нуля, то номинальному току намагничивания  $I_{dn}$ .

Это сделано для форсировки процесса намагничивания двигателя после его первоначального включения и для работы с ТН, не превышающим номинальный, в дальнейшем. Нижний сигнал ограничивается значением  $I_{dmin} = I_{dn}/k_w$ , где  $k_w$  – коэффициент глубины максимального ослабления поля (принимается равным 10).

По отношению к контуру моментаобразующего тока внешним является контур регулирования скорости с ПИ-регулятором (РС). Задание  $\omega_r^*$  поступает с задатчика интенсивности, формирующего необходимый темп разгона. Выходной сигнал РС  $I_q^*$  динамически ограничивается до  $I_{qmax}$ , меняющегося согласно (17), блоке ограничения моментаобразующего тока (БОМТ).

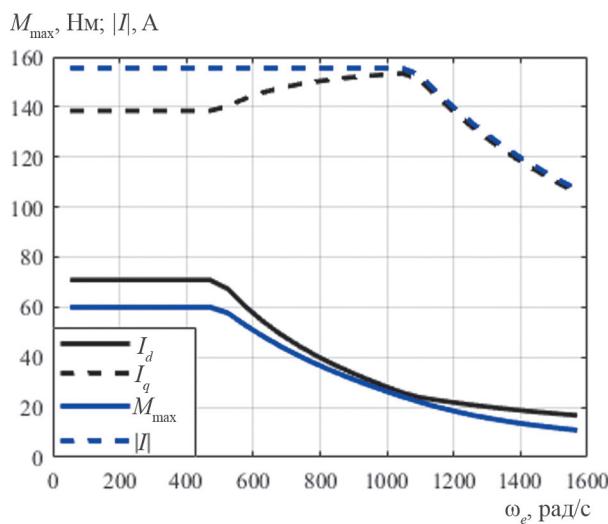
Исследование возможностей разработанной СУ ВСШ проведем путем математического моделирования.

**Результаты моделирования.** Моделирование СУ ВСШ проводились с использованием комплекса Matlab Simulink. В качестве испытуемого был выбран АД Fanuc aiIT15/15000 (номинальная мощность 15 кВт, макси-

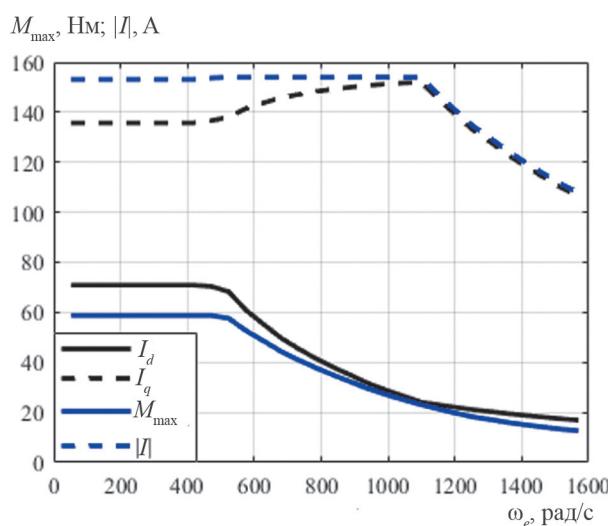
мальная скорость 15000 об/мин), который позиционируется как шпиндельный двигатель для приводов главного движения металлорежущих станков. Необходимые для моделирования параметры АД сведены в таблицу.

На рис. 2 показаны скоростные характеристики, соответствующие работе с максимальным моментом во всех зонах, полученные расчетным путем. На рис. 3 – те же зависимости, полученные путем моделирования системы управления. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что в разработанной системе управления достигается работа с моментом, приближающимся к теоретически максимально возможному во всех трех зонах регулирования скорости.

На рис. 4 показаны динамические характеристики при пуске двигателя в третью зону на скорость 15000 об/мин



**Рис. 2.** Расчетные скоростные характеристики СУ ВСШ  
**Fig. 2.** Calculated velocity characteristics of the high-speed spindle control system



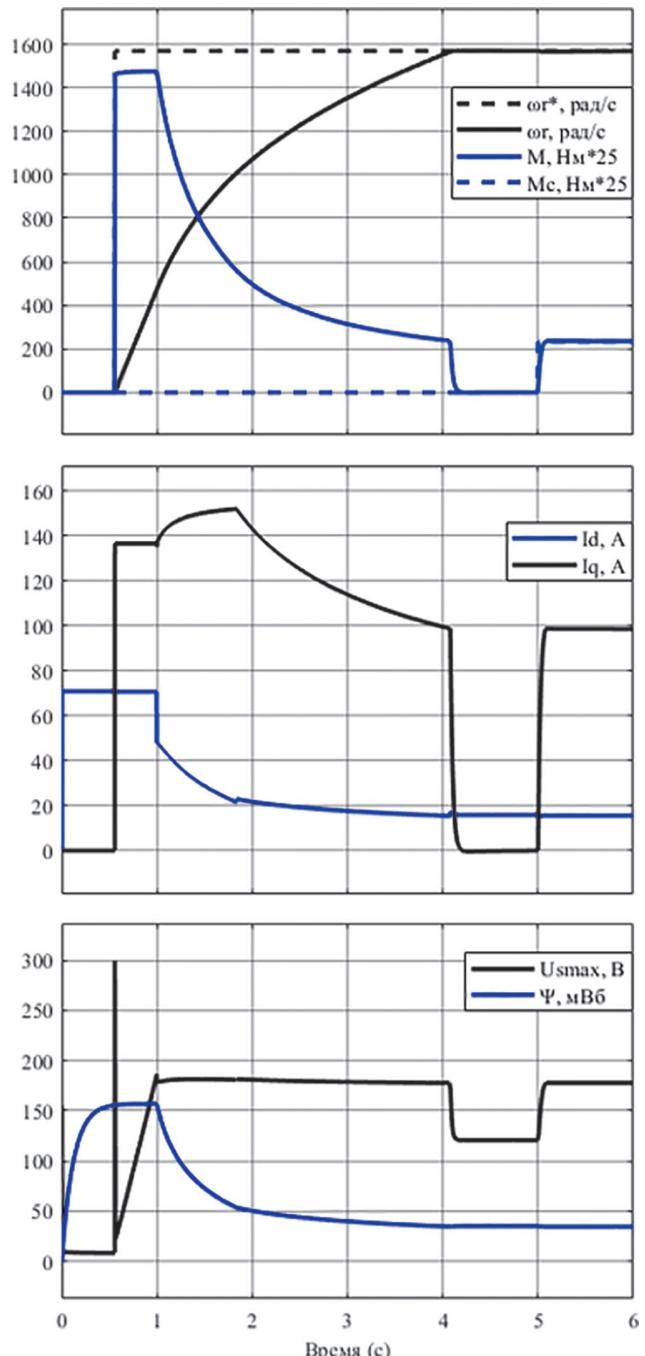
**Рис. 3.** Скоростные характеристики СУ ВСШ, полученные по результатам моделирования

**Fig. 3.** Velocity characteristics of the high-speed spindle control system obtained from the simulation

### Параметры АД Fanuc aiIT15/15000

#### Fanuc aiIT15/15000 parameters

$I_n$ , А	$U_{smax}$ , В	$F_n$ , Гц	$I_{dn}$ , А	$I_{smax}$ , А	$M_n$ , Нм
86	300	166,5	70	155	28,6
$R_s$ , Ом	$R_p$ , Ом	$L_m$ , Гн	$L_s$ , Гн	$L_p$ , Гн	$J$ , кгм <sup>2</sup>
0,13	0,02	0,0022	0,0024	0,0024	0,055



**Рис. 4.** Динамические характеристики электропривода с СУ ВСШ  
**Fig. 4.** High-speed spindle drive control system dynamic characteristics

с последующим набросом момента 9,5 Нм, близким к расчетному максимальному для этой скорости.

В результате с разработанной СУ двигатель разогнался до скорости 15000 об/мин за 3,5 с (не считая времени на намагничивание), а момент во время пуска соответствовал своему максимальному значению. Наброс статического момента, близкого к максимальному для этой скорости, не нарушил устойчивости системы.

**Экспериментальные результаты.** Для экспериментальной проверки разработанной системы был подготовлен стенд (рис. 5), включающий в себя специализированный контроллер движения *IntServo*, на котором была полностью реализована предложенная система управления, цифровой сервопреобразователь *IntAmp-30* ( $P = 30$  кВт) и асинхронный двигатель *Fanuc aiT15/15000*. Параметры указанных компонентов использовались в математической модели электропривода.

Эксперимент заключался в пуске двигателя на скорость 12000 об/мин без нагрузки с последующим остановом. На рис. 6 представлены графики, полученные на модели, а на рис. 7 – при стеновых испытаниях. Время разгона по результатам моделирования составило 2,1 с, а при натурных испытаниях – 2,2 с. Отличие временных характеристик при останове связано с тем, что процесс торможения на стенде происходил

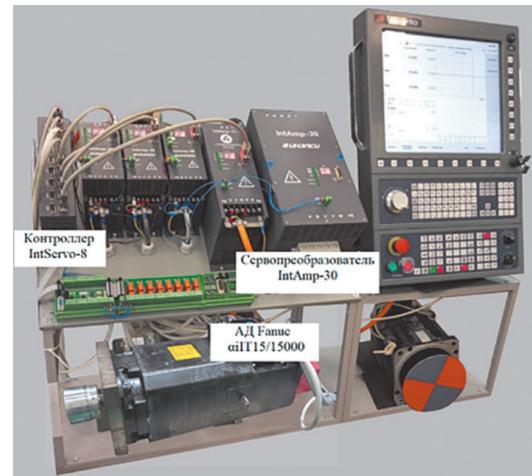


Рис. 5. Экспериментальный стенд

Fig. 5. Experimental setup

быстрее, поскольку сброс энергии шел в звено постоянного тока преобразователя, что увеличило доступное напряжение и, как следствие, момент.

**Выводы.** Результаты математического моделирования показали эффективность разработанных законов управления предложенной трехзонной системы векторного управления высокоскоростным шпинделем с асинхронным двигателем в широком диапазоне скоро-

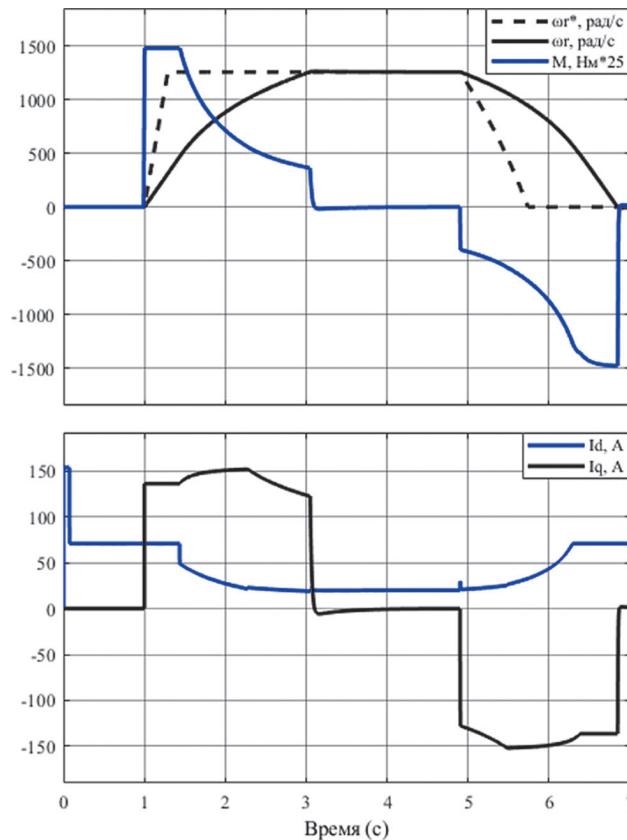


Рис. 6. Пуск АД на 12000 об/мин и останов (моделирование)

Fig. 6. Starting and stopping of induction motor at 12000 rpm (simulation)

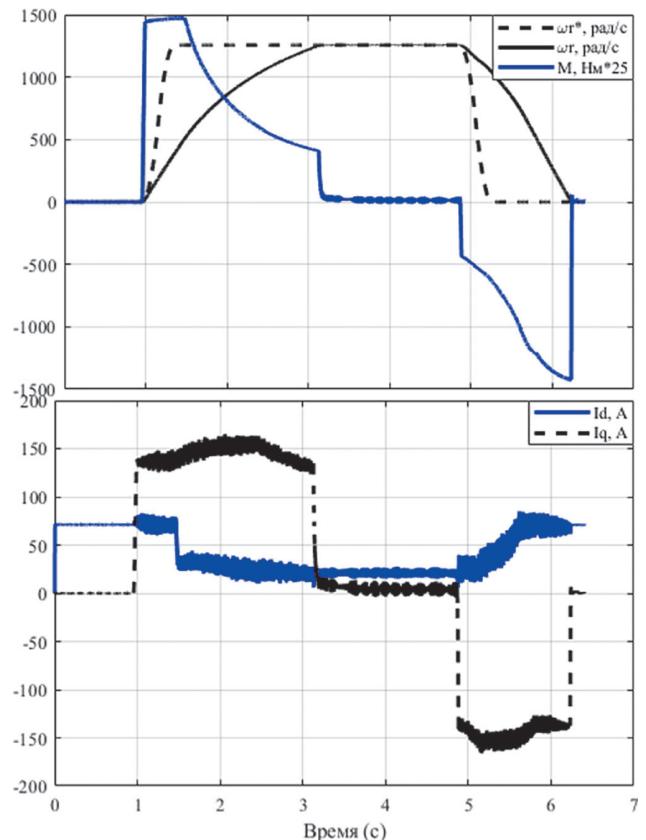


Рис. 7. Пуск АД на 12000 об/мин и останов (эксперимент)

Fig. 7. Starting and stopping of induction motor at 12000 rpm (experiment)

стей с максимально допустимым электромагнитным моментом.

В первой зоне скоростей (от минимального до номинального значения) поддерживается ток статора двигателя на предельно допустимом уровне. Во второй зоне (с ослаблением магнитного поля) устанавливаются максимальные значения тока и напряжение статора. Работа в третьей зоне (с глубоким ослаблением магнитного поля) происходит при предельных значениях напряжения и скольжении, близком к критическому.

Испытания, проведенные на экспериментальном оборудовании, показали совпадение статических и динамических характеристик с расчетными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cai C. et al. Optimization Design of High-Speed Motorized Spindle Control System. – 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017, pp. 1073–1079, DOI: 10.1109/ICISCE.2017.224.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2008, 298 с.
3. Nam K.H. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. Boca Raton: CRC Press, 2018, 574 p., DOI:10.1201/9781315200149
4. Llorente R.M. Practical Control of Electric Machines: Model-Based Design and Simulation. Springer Cham, 2020, 622 p.
5. Kim S.-H. Electric Motor Control. Elsevier, 2017, 438 p.
6. Casadei D. et al. A Control Scheme with Energy Saving and DC-Link Overvoltage Rejection for Induction Motor Drives of Electric Vehicles. – IEEE Trans. on Industry Applications, July-August 2010, vol. 46, No. 4, pp. 1436–1446, DOI: 10.1109/TIA.2010.2049627.
7. Шрейнер Р.Т. и др. Трехзоная система векторного частотного управления асинхронным электроприводом – VIII Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, 2014, т. 1, с. 433–437.
8. Attaiinese C., Monaco M.D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) Field-Oriented Control of Induction Motor. Electrical Engineering, 2021, vol. 103, pp. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0.
9. Dong Z. et al. Operating Point Selected Flux-Weakening Control of Induction Motor for Torque-Improved High-Speed Operation Under Multiple Working Conditions. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, vol. 34, No. 12, pp. 12011-12023, DOI: 10.1109/TPEL.2019.2905536.
10. Dong Z. et al. Flux-Weakening Control for Induction Motor in Voltage Extension Region: Torque Analysis and Dynamic Performance Improvement. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, No. 5, pp. 3740–3751, DOI: 10.1109/TIE.2017.2764853.

11. Ahmed A. et al. Finite-Control Set Model Predictive Control Method for Torque Control of Induction Motors Using a State Tracking Cost Index. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, vol. 64, No. 3, pp. 1916–1928, DOI: 10.1109/TIE.2016.2631456.

12. Anuchin A.S. et al. A Method of Determining the Maximum Performance Torque-Speed Characteristic for an Induction Motor Drive over Its Entire Speed Range. – IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2017, DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124815.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611266. Программный модуль «автонастройка и идентификация» для комплекса «ServoIDE» версии 3.0 / Е.В. Красильникъянц и др., 2022 г.

14. DQ Limiter [Электрон. ресурс], URL <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/dqlimiter.html> (дата обращения 18.06.2023).

15. Field-Oriented Control by the Numbers [Электрон. ресурс], URL: <https://www.edn.com/field-oriented-control-by-the-numbers> (дата обращения 18.06.2023).

Поступила в редакцию [23.04.2023]

Принята к публикации [29.06.2023]

#### Авторы:



Алексеев Александр Александрович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия.



Красильникъянц Евгений Валерьевич – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия.



Тютиков Владимир Валентинович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорные системы», проректор по научной работе, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия.

# Development and Study of a Three-Region Vector Control System for a High-Speed Asynchronous Spindle

**ALEKSEEV** *Alexandr A.* (*Ivanovo State Power Engineering University n. a. V.I. Lenin, Ivanovo, Russia*) –  
*Postgraduate Student of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Dept.*

**KRASIL'NIK"YANTS** *Evgeniy V.* (*Ivanovo State Power Engineering University n. a. V.I. Lenin, Ivanovo, Russia*) –  
*Senior Researcher, Cand. Sci. (Eng.).*

**TYUTIKOV** *Vladimir V.* (*Ivanovo State Power Engineering University n. a. V.I. Lenin, Ivanovo, Russia*) –  
*Head of the Electronics and Microprocessor Systems Dept., Vice-Rector for Scientific Work, Dr. Sci. (Eng.), Professor.*

*One of the main requirements for electric drives of high-speed spindles in metalworking machines is a possibility to operate in a wide range of speeds with minimum acceleration and deceleration times in order to increase the work productivity. Conventional two-region electric drive control systems that distinguish between constant torque and constant power zones are not always able to meet these requirements in a comprehensive manner. The article describes the development of the main motion drive control system based on an induction motor with distinguishing of the third speed control region - a constant slip region (decreasing power), which makes it possible to operate with the maximum torque in a wide speed range. A methodology for determining the boundaries of the regions and control laws is proposed, which is based on a priori information about the drive and motor's equivalent circuit parameters. The results of simulation and experiments carried out on the Fanuc spindle induction motor for a rated capacity of 15 kW and maximum speed of 15000 rpm show high effectiveness of the developed control system. By using the proposed control system of a high-speed spindle drive, the required accuracy in the high-speed machining mode is obtained along with increasing the productivity of metalworking machines.*

**К e y w o r d s:** *electric drive, control system, induction motor, vector control, spindle, high-speed machining*

---

## REFERENCES

---

1. Cai C. et al. Optimization Design of High-Speed Motorized Spindle Control System. – 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017, pp. 1073–1079, DOI: 10.1109/ICISCE.2017.224.
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* (Vector Control of AC Electric Drives). Ivanovo: IGEU im. V.I. Lenina, 2008, 298 p.
3. Nam K.H. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. Boca Raton: CRC Press, 2018, 574 p., DOI: 10.1201/9781315200149.
4. Llorente R.M. Practical Control of Electric Machines: Model-Based Design and Simulation. Springer Cham, 2020, 622 p.
5. Kim S.-H. Electric Motor Control. Elsevier, 2017, 438 p.
6. Casadei D. et al. A Control Scheme with Energy Saving and DC-Link Overvoltage Rejection for Induction Motor Drives of Electric Vehicles. – IEEE Trans. on Industry Applications, July-August 2010, vol. 46, No. 4, pp. 1436–1446, DOI: 10.1109/TIA.2010.2049627.
7. Shreyner R.T. et al. VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 – in Russ. (VIII International Conference on Automated Electric Drive AEP-2014), 2014, vol. 1, pp. 433–437.
8. Attaiinese C., Monaco M.D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) Field-Oriented Control of Induction Motor. Electrical Engineering, 2021, vol. 103, pp. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0.
9. Dong Z. et al. Operating Point Selected Flux-Weakening Control of Induction Motor for Torque-Improved High-Speed Operation Under Multiple Working Conditions. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, vol. 34, No. 12, pp. 12011–12023, DOI: 10.1109/TPEL.2019.2905536.
10. Dong Z. et al. Flux-Weakening Control for Induction Motor in Voltage Extension Region: Torque Analysis and Dynamic Performance Improvement. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 65, No. 5, pp. 3740–3751, DOI: 10.1109/TIE.2017.2764853.
11. Ahmed A. et al. Finite-Control Set Model Predictive Control Method for Torque Control of Induction Motors Using a State Tracking Cost Index. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, vol. 64, No. 3, pp. 1916–1928, DOI: 10.1109/TIE.2016.2631456.
12. Anuchin A.S. et al. A Method of Determining the Maximum Performance Torque-Speed Characteristic for an Induction Motor Drive over Its Entire Speed Range. – IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2017, DOI: 10.1109/RTUCON.2017.8124815.
13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022611266. Programmnyy modul' «avtonastroyka i identifikatsiya» dlya kompleksa «ServoIDE» versii 3.0 (Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2022611266. Software Module "Auto-Tuning And Identification" for the Complex "ServoIDE" version 3.0) / E.V. Krasil'nik"yants et al., 2022 r.
14. DQ Limiter [Electron. resource], URL <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/dqlimiter.html> (Date of appeal 18.06.2023).
15. Field-Oriented Control by the Numbers [Electron. resource], URL: <https://www.edn.com/field-oriented-control-by-the-numbers> (Date of appeal 18.06.2023).

*Received [23.04.2023]  
Accepted [29.06.2023]*