

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья  
УДК 62-589.1  
EDN: GHONPU  
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-84-94



## Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

А.Е. Давыдов<sup>1✉</sup>, Б.М. Боченков<sup>2</sup>, Ю.В. Панкрац<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Резюме.** Целью исследования являлось расширение диапазона (с сохранением мощностных характеристик) скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами в электроприводе главного движения металлорежущего станка. В работе использовалось математическое моделирование электропривода синхронного двигателя с постоянными магнитами с помощью программного продукта SimInTech. В качестве исходных данных для моделирования использовались параметры двигателя постоянного тока: номинальная мощность 2,2 кВт, напряжение 315 В, скорость 1500 об/мин, КПД 90,5%, номинальный ток 6 А. Разработан алгоритм управления электроприводом, включающий две зоны управления: зону максимальной мощности и зону увеличенной скорости. Показано, что в зоне максимальной мощности поддерживаются номинальные характеристики, а в зоне увеличенной скорости достигается повышение скорости синхронного двигателя в электроприводе главного движения металлорежущего станка до 2 раз без ухудшения мощностных характеристик. Проведены численные эксперименты и сравнительный анализ результатов работы алгоритма управления с традиционными методами управления, которые подтвердили теоретические значения. Результаты моделирования показали, что при управлении синхронных двигателей с постоянными магнитами во второй зоне энергопотребление системы управления не превышает номинальных значений. Таким образом, разработанная система управления синхронных двигателей с постоянными магнитами обеспечивает эффективное управление электроприводом главного движения металлорежущего станка, демонстрирующего улучшенные характеристики обработки материалов, изготавливаемых из металлов с малой твердостью. Проведенное авторами исследование представляет практическую значимость для промышленности, где повышение скорости двигателя в металлорежущих станках является важным фактором для увеличения производительности и снижения времени обработки.

**Ключевые слова:** металлорежущие станки, синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическое моделирование, преобразователь частоты, двухзонное управление

**Для цитирования:** Давыдов А.Е., Боченков Б.М., Панкрац Ю.В. Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 84–94. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU

## POWER ENGINEERING

Original article

## Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor

Artem E. Davydov<sup>1✉</sup>, Boris M. Bochenkov<sup>2</sup>, Yuriy V. Pankrats<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The article is aimed at extending the speed range of a permanent-magnet synchronous motor in the main-motion electric drive of a machine tool (while maintaining the power characteristics). In this work, the electric drive of a permanent-magnet synchronous motor was mathematically modeled using the SimInTech software. As input data for modeling, the following DC motor parameters were used: nominal power of 2.2 kW, voltage of 315 V, speed of 1500 rpm, energy conversion efficiency of 90.5%, and nominal current of 6 A. An algorithm for controlling the electric drive was developed to include two control zones: zone of maximum power and increased speed zone. It is shown that in the maximum power zone, the nominal characteristics are maintained, while in the increased speed zone, an increase in motor speed of up to two times is achieved in the main-motion electric drive of the machine tool without a decrease in its power characteristics. Numerical experiments were conducted, as well as an analysis comparing the control algorithm and

© Давыдов А.Е., Боченков Б.М., Панкрац Ю.В., 2024

conventional control methods, which confirmed the theoretical values. The modeling results showed that with the control of permanent-magnet synchronous motors, the power consumption of a control system in the second zone does not exceed the nominal values. Thus, the developed system for controlling permanent-magnet synchronous motors provides effective control over the main-motion electric drive of a machining tool that demonstrates improved performance in machining materials made of low-hardness metals. The present study is of practical importance for industries in which increasing motor speed in machine tools constitutes an important factor in improving capacity and reducing machining time.

**Keywords:** metal-cutting machines, permanent magnet synchronous motor, mathematical modeling, frequency converter, two-zone control

**For citation:** Davydov A.E., Bochenkov B.M., Pankrats Yu.V. Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):84-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU

## ВВЕДЕНИЕ

Интеграция синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в электроприводы металлорежущих станков с ЧПУ имеет существенное влияние на их развитие. СДПМ обеспечивает высокую плотность мощности, что позволяет станкам обрабатывать металлические заготовки с высокой точностью. Точное управление и обратная связь от СДПМ дают возможность станкам выполнять операции, такие как фрезерование и сверление, с повторяемостью и минимальными отклонениями. Электронная регулировка СДПМ также улучшает скорость и плавность движения инструмента, способствуя повышению производительности и общей эффективности производства металлических изделий [1, 2].

Тем не менее повышение эффективности обработки возможно путем увеличения скорости вращения ротора шпинделя. Но прямое увеличение оборотов приведет к необходимости увеличения энергопотребления двигателя, что, в свою очередь, может вызвать повреждение электропривода, а также негативно сказаться на заготовке или шпинделе из-за возможного перегрева [3].

Решением данной задачи может стать увеличение скорости путем ослабления потока, в таком случае мощность, прилагаемая к фрезе, остается неизменной, вследствие этого фреза проходит одну и ту же точку большее количество раз, в результате чего качество обрабатываемой поверхности увеличивается.

Ранее начало исследования было представлено на конференции [4], в данной статье представлено продолжение, в котором раскрыто более подробное изложение методологии и точнее результаты, полученные в ходе работы.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования, целью которых является расширение диапазона скорости СДПМ, привлека-

ют широкий интерес исследователей в свете их потенциальной важности для достижения требуемых характеристик без необходимости дополнительных финансовых вложений в области электропривода. В приведенном примере [5] выполняется исследование, в ходе которого авторы осуществляют сравнение и анализ механических, регулировочных и энергетических характеристик электроприводов на основе двигателя постоянного тока (ДПТ) с электроприводом на основе вентильного двигателя (ВД). В ходе данного сопоставительного анализа было выявлено, что электропривод на основе ВД демонстрирует значительные преимущества по сравнению с электроприводом на основе ДПТ в связи с уникальными конструктивными особенностями и наличием усовершенствованных систем управления. Отсутствие щеток в конструкции и возможность более глубокой настройки при взаимодействии с частотным преобразователем обеспечивают электроприводу с ВД выдающиеся регулировочные и энергетические характеристики в широком спектре угловых скоростей. Кроме того, данное исследование указало на перспективность внедрения вентильных двигателей в системы электропривода металлорежущих станков.

Однако в исследовании, проведенном авторами работы [6], сравниваются электроприводы, использующие асинхронный двигатель (АД), ВД и СДПМ. Результаты данного научного изыскания показали, что СДПМ является наиболее эффективным типом двигателя, характеризующимся низким уровнем пульсаций, по сравнению с ВД, а также обеспечивающим более плавное и точное управление. Эти особенности СДПМ могут привести к лучшей производительности при применении в металлорежущих станках.

В работах [2, 4] рассматривается перспектива уменьшения магнитного потока СДПМ. Это потенциально позволяет увеличить ско-

рость вращения двигателя без необходимости внесения дополнительных изменений в его конструкцию. А в статье [7] авторы исследуют лучшую структуру расположения магнитов в СДПМ, подходящую для ослабления потока.

В статье [3] осуществлен расчет сил и момента резания, возникающих в процессе фрезерования с использованием концевых фрез. Автором сделан вывод о необходимости учета множества параметров, таких как глубина резания, скорость подачи, степень износа режущего инструмента, а также влияние ширины фрезерования и диаметра фрезы на силы резания и крутящий момент. Особое внимание было уделено условиям экспериментов, при которых можно достичь достаточной равномерности процесса фрезерования для получения надежных результатов. Эти результаты подчеркивают важность учета множества факторов при проектировании экспериментов и оптимизации процесса фрезерования с использованием концевых фрез, что может привести к более точному контролю и повышению эффективности данного производственного процесса.

В контексте внедрения технологии ослабления потока СДПМ во фрезерные станки, исследования и разработки в этой области представляют собой важное направление. Понимание влияния магнитного потока на результирующие характеристики момента и скорости и оптимизация конструкции СДПМ способствуют повышению производительности и эффективности фрезерных станков. Данные исследования могут привести к созданию более точных и эффективных систем фрезерования, что, в свою очередь, может значительно улучшить качество обработки поверхностей и снизить износ режущих инструментов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Разработка системы управления.** Для реализации второй зоны управления требуется ослабить потокосцепление двигателя, в результате чего уменьшится максимальный момент ( $M$ , н/м), а угловая скорость ( $\omega$ , рад/с) станет выше. При этом мощность ( $P$ , кВт) остается на уровне не менее номинальной. График этого перехода показан на рис. 1. На графике показан переход от зоны, где преобладает максимальный момент (первая зона), к зоне, где момент снижается, а скорость увеличивается (вторая зона), при этом мощность двигателя не снижается.

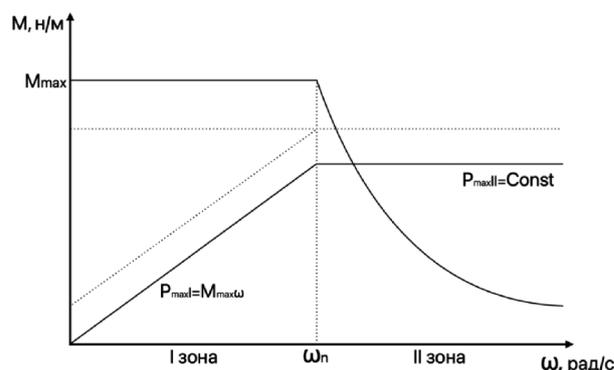


Рис. 1. Схема перехода синхронных двигателей постоянного тока во вторую зону управления  
Fig. 1. Diagram of synchronous direct current motor transition to the second control zone

Устройство электропривода главного движения металлорежущего станка показано на рис. 2 и имеет общепринятую структуру. Это контроллер управления, с которого на инвертор подаются сигналы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и подключается источник постоянного напряжения, а с инвертора подается трехфазное напряжение АВС на СДПМ, с которого методом измерения датчиками тока и скорости формируется обратная связь.

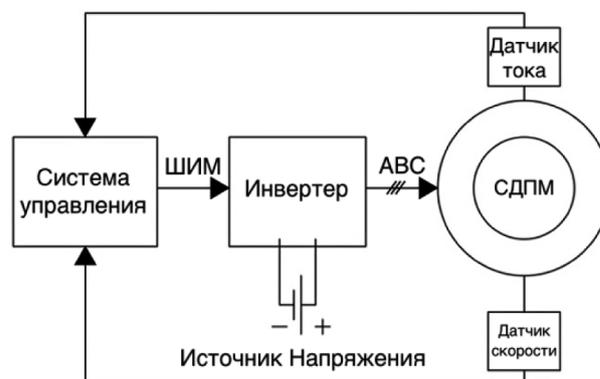


Рис. 2. Структурная схема электропривода  
Fig. 2. Structural diagram of the electric drive

В качестве системы координат была выбрана система  $dq$  и построена структурная схема электропривода, которая показана на рис. 3. На блок-схеме присутствует: РС – регулятор скорости, РЭ – регулятор ЭДС, БР – блок расчета ЭДС, РТ – регулятор тока, КП – координатный преобразователь,  $I_q$  – ток по оси  $q$ ,  $I_{d3}$  – задающее значение тока по оси  $d$ ,  $\omega$  – обратная связь по скорости,  $\omega_3$  – задающее значение скорости,  $E_3$  – задающее значение ЭДС.

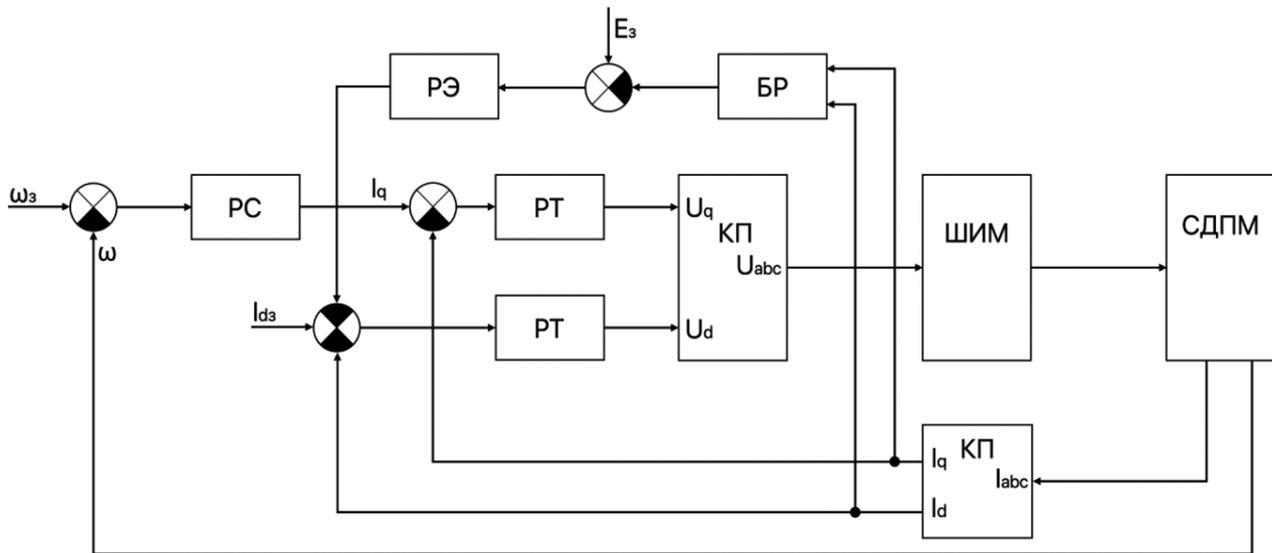


Рис. 3. Блок-схема dq системы управления синхронных двигателей постоянного тока  
 Fig. 3. Block diagram of the dq control system of synchronous direct current motors

Для перехода во вторую зону управления требуется ослабить магнитный поток, с этой целью в схеме был добавлен регулятор электродвижущей силы (ЭДС).

Детали диаграммы на рис. 3 следуют в порядке слева направо: настройка желаемой скорости двигателя, обратная связь по скорости, регулирование скорости, обратные связи по току q и d, регуляторы тока в координатах dq, координатный преобразователь dq в ABC, блок преобразования ШИМ. СДПМ, координатный преобразователь ABC в dq и итоговая скорость [8, 9]. Регулятор ЭДС подключается в обратную связь по току Id, входными данными которого является расчетная ЭДС относительно номинальной и включается только при переходе во вторую зону управления.

#### Математическое описание системы.

СДПМ описывается формулами:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_{sd}}(U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_e L_{sq} I_{sq}) \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_{sq}}(U_{sq} - R_s I_{sq} + \omega_e L_{sd} I_{sd} - \psi_f \omega_e) \\ M_{em} = \frac{3Z_p}{2}(I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq})) \end{cases} \quad (1)$$

ПИ-регулятор тока рассчитывается по формуле:

$$U_d = k_p e + k_i \int edt, \quad (2)$$

где  $k_p$  – расчетное пропорциональное звено;  
 $k_i$  – расчетное интегральное звено.

Формула производной замкнутой системы для звена  $k_p$ :

$$k_p = \frac{k_1 \cdot \frac{L}{r}}{(a_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{U_n})}, \quad (3)$$

где  $k_1$  – обратная связь по току, А;  $a_1$  – выбранный коэффициент.

Формула производной замкнутой системы для звена  $k_i$ :

$$k_i = \frac{k_1}{(a_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{U_n})}. \quad (4)$$

Пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор скорости рассчитывается по формуле:

$$U_d = k_p e + k_d \frac{de}{dt}. \quad (5)$$

Формула производной замкнутой системы для звена  $k_p$ :

$$k_p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot J}{(a_2 \cdot W_m)}, \quad (6)$$

где  $k_2$  – обратная связь по скорости, рад/с;  $a_2$  – выбранный коэффициент.

Формула производной замкнутой системы для звена  $k_d$ :

$$k_d = \frac{a_1 \cdot k_2 \cdot J}{(a_2 \cdot W_m \cdot k_1)}. \quad (7)$$

Функция передачи I/U для машины:

$$W_i = W_{ci} \cdot k \cdot W_{co}, \quad (8)$$

где  $W_{ci}$  – передаточная функция регулятора тока;  $k$  – коэффициент преобразователя;  $W_{оце}$  – передаточная функция объекта управления.

Передаточная функция формирования момента на валу машины одинакова для схемы  $q$  и  $d$  и имеет вид:

$$W_m = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Psi \cdot \frac{1}{J \cdot s}, \quad (9)$$

где  $Z_p$  – количество пар полюсов;  $\Psi$  – потокосцепление ротора машины, Вб;  $J$  – момент инерции двигателя, н/м.

Передаточная функция контура скорости для тока  $q$  на рис. 2 показана ниже:

$$W_s = W_{sc} \cdot W_i \cdot W_m, \quad (10)$$

где  $W_s$  – передаточная функция контура скорости;  $W_{cs}$  – передаточная функция регулятора скорости;  $W_i$  – передаточная функция токового контура;  $W_m$  – передаточная функция крутящего момента двигателя.

Передаточная функция контура скорости для тока  $d$  на рис. 3 отличается наличием регулятора потокосцепления:

$$W_s = W_{sc} \cdot W_\psi \cdot W_m, \quad (11)$$

где  $W_\psi$  – передаточная функция контура потокосцепления.

Передаточная функция цепи потокосцепления для тока  $d$  показана на рис. 3, где  $W_{сцп}$  – передаточная функция регулятора потокосцепления;

$L_d$  – индуктивность статора по петле тока  $d$ , Гн.

Для ослабления потокосцепления в классическую двухконтурную систему полеориентированного управления вводится блок регулирования потокосцепления ( $R_\psi$ ) [10, 11].

Для ослабления магнитного потока в классической двухконтурной системе управления, основанной на ориентации поля, вводится блок регулирования потока магнитного потока ( $R_\psi$ ). По математическому описанию была составлена блок-схема системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, в координатах  $dq$  представлена на рис. 3 [1, 2, 4, 12–14].

Из математического описания системы мы получаем диаграммы, иллюстрируемые на рис. 4, 5.

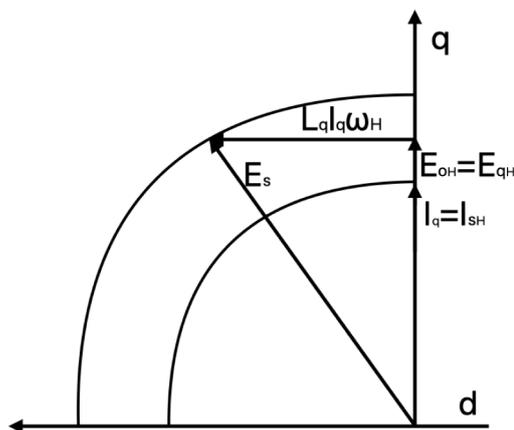


Рис. 4. Диаграмма работы синхронных двигателей постоянного тока в первой зоне  
Fig. 4. Diagram of synchronous direct current motor operation in the first zone

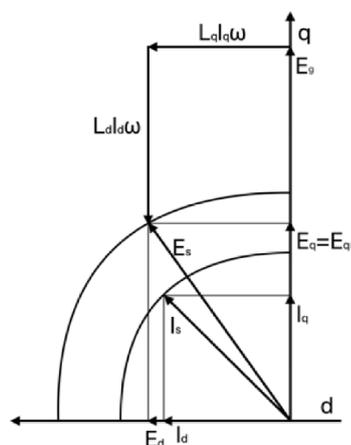


Рис. 5. Схема синхронных двигателей постоянного тока с ослабленным потоком  
Fig. 5. Diagram of synchronous direct current motors with the weakened flux

На рис. 4 представлена диаграмма, иллюстрирующая работу СДПМ в номинальном режиме. На этой диаграмме показан режим работы с поперечным током ротора равным номинальному току ( $I_s = I_{SH} = I_q$ ), А, при номинальной частоте вращения. Модуль вектора ЭДС ( $E_s$ ) достигает предельного значения, ограниченного окружностью  $r = E_{SH}$ . Также на диаграмме присутствуют следующие векторы и параметры:

$E_q$  – ЭДС по оси  $q$ , В;

$L_q I_q \omega$  – ЭДС реакции ротора по оси  $q$ , В.

На рис. 5 показана диаграмма при  $\omega > \omega_H$ . Вектор  $E_s$  остается неизменным, в то время как вектор общей ЭДС ( $E_g$ ) увеличивается и превышает  $E_{SH}$ . Это происходит в связи с введением тока по оси  $d$  ( $I_d$ ) при таком уменьшении тока  $I_q$ , что  $L_q I_q \omega = \text{const} = L_q I_{SH} \omega_H$ , это приводит к появлению ЭДС реакции ротора по оси  $d$  ( $L_d I_d \omega$ ), ко-

торая компенсирует увеличение  $E_g$  так, что  $E_q$  остается неизменной. Также на диаграмме присутствуют следующие векторы и параметры:

$E_{qr}$  – номинальная ЭДС по оси q, В;

$E_d$  – ЭДС по оси d, В;

$I_s$  – модуль тока, А.

Введение зависимости  $I_d$  от  $I_q$  и  $\omega$  важно для достижения оптимальной производительности и эффективности работы СДПМ в различных режимах.

$$I_d = \frac{E_q - E_g}{L_d \cdot \omega \cdot p_{in}} = \frac{\sqrt{E_{sr}^2 - (L_q i_q \omega p_{in})^2} - C \Phi_f \omega p_{in}}{L_d \cdot \omega \cdot p_{in}}. \quad (12)$$

Данный алгоритм позволяет при ограниченной ЭДС вращения достигать более высоких скоростей вращения ротора. Это позволит при тех же значениях тока  $I_d$  создать дополнительное магнитное поле, направленное против постоянных магнитов, что позволит ослабить результирующее поле и расширить диапазон регулирования скорости с постоянством мощности.

Математическая модель, представленная в данном контексте, направлена на оценку возможности управления двигателем, используемым в механизме привода главного движения металлорежущего станка во второй зоне. Анализ второй зоны является критически важным, поскольку регулирование потокосцепления двигателя оказывает влияние на косинус фазового угла ( $\cos\phi$ ), что позволяет при сохранении общей мощности двигателя повысить скорость вращения ротора при уменьшении критического момента электродвигателя. В результате этого металлорежущий станок, оснащенный данной системой управления, имеет более высокие характеристики обработки, такие как точность и качество обработки деталей, особенно тех, которые изготавливаются из мягких металлов. Это означает, что система управления

способствует улучшению производительности и точности обработки материалов на станке [8, 10–18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для моделирования использовались параметры двигателя, указанные в таблице, все расчеты проводились в среде математического моделирования SimInTech. Модели СДПМ, ПИ-регуляторов разработаны и верифицированы разработчиками программного обеспечения.

Характеристики синхронных двигателей постоянного тока

Characteristics of synchronous direct current motors

№	Наименование	Значение
1	Количество пар полюсов	4
2	Номинальная мощность	2200 Вт
3	Напряжение	360 В
4	Номинальная скорость	1500 об/мин
5	Номинальная частота	50 Гц
6	КПД	90,5%
7	Номинальный ток	6 А
8	Номинальный момент	14 Нм
9	Максимальный момент (2 мин)	45 Нм
10	Коэффициент мощности	0,99η
11	Фазное сопротивление	2,1 Ом

В данной математической модели выполнен расчет на увеличение частоты вращения ротора в 1,5 раза.

На рис. 6 демонстрируется графическое представление скорости двигателя, иллюстрируя следующие этапы: инициирование пуска двигателя, рабочий режим на стандартной скорости, переход к повышенной скорости и установившийся режим на высокой скорости. Для разгона двигателя до номинальных оборотов требуется 0,1 с, а с момента начала переключения на повышенные обороты до достижения устойчивого состояния повышенных оборотов проходит 0,25 с.

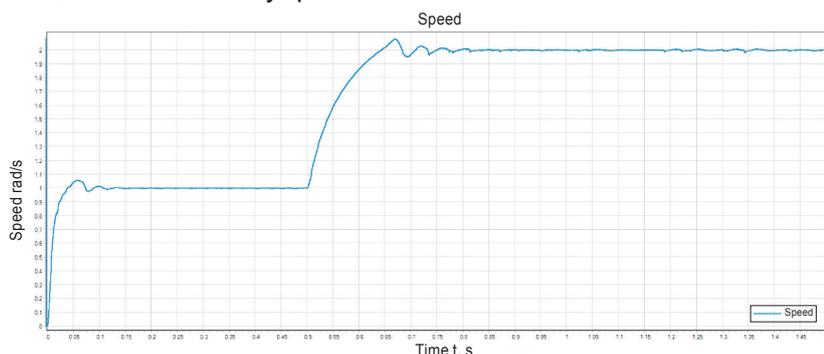


Рис. 6. График скорости, рад/с  
 Fig. 6. Speed graph, rad/s

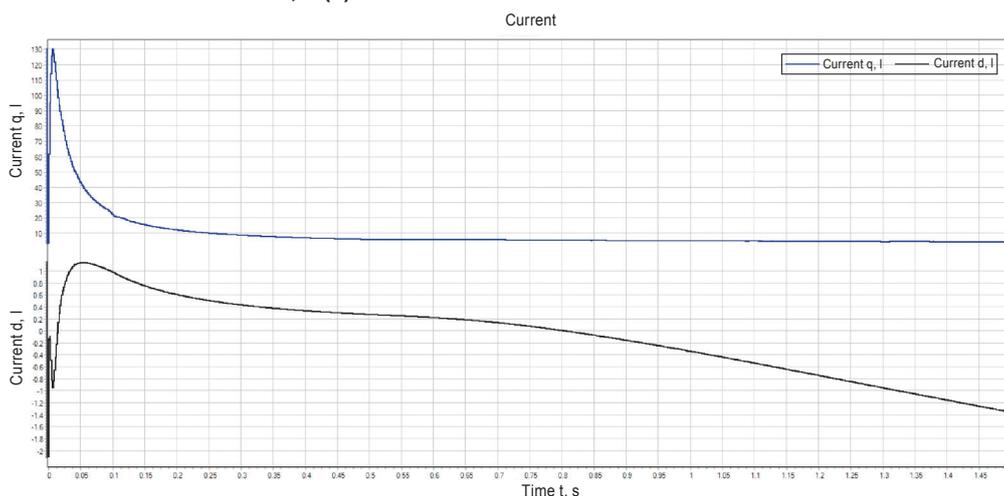


Рис. 7. График тока, I, A

Fig. 7. Current graph, I, A

Рис. 7 представляет собой график тока в системе координат dq. Из графика видно, что ток в номинальном режиме стремится к нулю в связи с моментом сопротивления равным 1 Н/м, а при переходе на повышенную скорость ток по оси d возрастает, что приводит к ослаблению магнитного поля статора. Стоит отметить, что суммарный ток двигателя не превышает номинального тока двигателя. Исходя из полученных данных видно, что на повышенной скорости двигатель потребляет мощности не больше, чем в номинальном режиме, и достигается это за счет изменения потокосцепления.

Для увеличения скорости вращения за счет увеличения мощности требуется подать больший ток на двигатель. На рис. 8 представлен график тока при переходе во вторую зону за счет увеличения мощности двигателя.

Из рис. 8 видно, что усредненное значение тока при увеличении скорости увеличивается в 7–8 раз, что в условиях номинальных нагрузок может быть равным 32–36 А, при номинальном значении тока в 4,5 А. При кратковременном изменении такое превышение тока не приведет к отрицательным последствиям для двигателя, однако энергозатраты значительно превышают те, что будут необходимы при предложенном двухзонном управлении.

В данной статье проведено исследование перспективного двухзонного алгоритма управления электроприводом синхронных двигателей с постоянными магнитами в электроприводе главного движения металлорежущего станка. В ходе исследования было проведено математическое моделирование электропривода с СДПМ, в результате которого были получены следующие результаты: при ослаблении потокосцепления двигатель может раз-

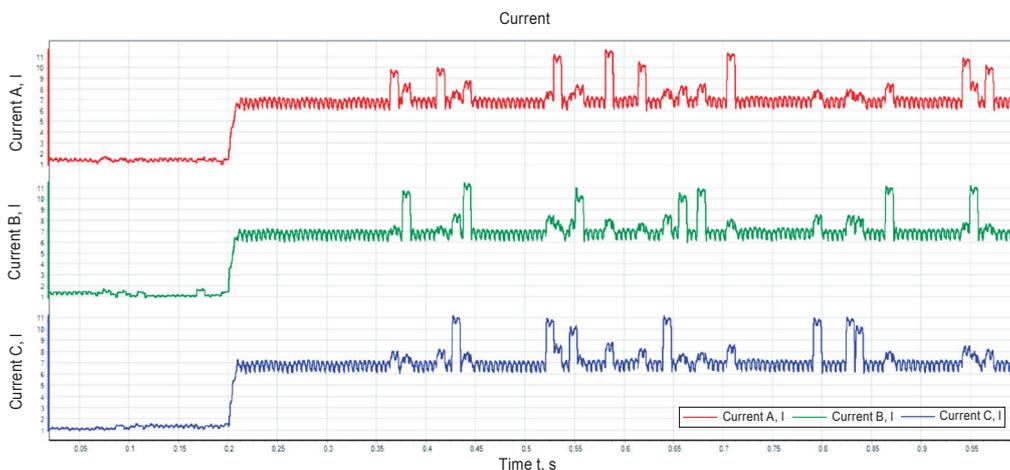


Рис. 8. Текущий график, I, A, в системе координат abc

Fig. 8. Current graph, I, A, in abc coordinate system

вивать скорость в 2 раза выше номинальной, со снижением максимального момента, что не влияет на мощность электропривода. Это способствует улучшению качества обработки металлов. Однако стоит отметить, что предложенный алгоритм может работать в узком диапазоне повышения скорости, например в случае обработки твердых металлов. Тем не менее это позволяет повысить качество обработки поверхности и увеличить надежность конструкции станка, поскольку потребляемый ток остается в номинальных значениях, обеспечивая нормальную работу всех элементов цепи. Следует также учесть, что разгон электродвигателя более, чем два раза, может привести к саморазрушению, если не будет проведена модернизация механической части. В связи с высокой стоимостью СДПМ было решено предварительно провести математическое моделирование системы управления, и при успешных результатах перейти к стендовым испытаниям. В представленной математической модели все модели идеальны, поэтому реальные результаты могут отличаться. В будущих статьях планируется представить результаты стендового моделирования на реальных СДПМ для сравнения с результатами моделирования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Система управления СДПМ является ключевым элементом электропривода главного движения металлорежущего станка. Для управления двигателем СДПМ было выполнено математическое моделирование, позволившее оценить его работу на номинальных и повышенных оборотах. Результаты моделирования показали, что при управлении СДПМ во второй зоне скоростей энергопотребление системы управления не превышает номинальных значений. Таким образом, разработанная система управления СДПМ обеспечивает эффективное управление электроприводом главного движения металлорежущего станка, что, в свою очередь, обеспечивает их надежную и безопасную работу. В итоге металлорежущий станок, оборудованный данной системой управления, демонстрирует улучшенные характеристики обработки материалов. Особенно это касается точности и качества обработки деталей, в основном изготавливаемых из металлов, обладающих невысокой твердостью (мягких). Это означает, что система управления способствует повышению производительности и уровня точности в процессе обработки материалов на станке.

## **Список источников**

1. Фираго Б.И. Работа трехфазных вентильных двигателей переменного тока при скорости выше основной // *Электромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2011. № 4. С. 12–16. EDN: QNRKFD.
2. Коваль А.С., Яшин В.С., Артеменко А.И. Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 3(64). С. 121–128. [http://doi.org/10.53078/20778481\\_2019\\_3\\_121](http://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121). EDN: AGLUAI.
3. Грубый С.В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // *Известия вузов. Машиностроение*. 2020. № 10. С. 26–37. <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG.
4. Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I., Bayanov E., Chipurnov S. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles // *Электротехнические комплексы и системы: материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции* (г. Уфа, 26–28 октября 2022 г.). Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2022. P. 235–243. EDN: СКҮКСТ.
5. Щагин А.В., Нгуен Тхань Зьонг, Чжо Сое Вин. Сравнительный анализ электроприводов производственных станков // *Известия вузов. Электроника*. 2022. Т. 27. № 2. С. 193–204. <http://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-2-193-204>. EDN: BZZGAV.
6. Rauth S.S., Samanta B. Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-Based FOC // *IEEE 17th India Council International Conference*. 2020. Vol. 17. <http://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>.
7. Li Chunyan, Kou Baoquan. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle // *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 2012. <http://doi.org/10.1109/EML.2012.6325049>.
8. Davydov A., Bochenkov B., Anosov V. Compact inverter for single-phase induction motor // *International Russian Automation Conference (Sochi, 5-11 September 2021)*. Sochi: IEEE, 2021. P. 74–78. <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537331>.
9. Yu Yang, Cong Leyao, Tian Xia, Mi Zengqiang, Li Yang, Fan Zhen, et al. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss // *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2020. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–171. <http://doi.org/10.30941/CESTEMS.2020.00021>.

10. Carpaneto M., Marchesoni M., Vallini G. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter // SPEEDAM (Pisa, 14–16 June 2010). Pisa: IEEE, 2010. P. 318–323. <http://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545088>.
11. Kolano K. New method of vector control in PMSM motors // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 43882–43890. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>.
12. Kotin D., Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2023. Vol. 10. No. 105. P. 1093–1102. <http://doi.org/10.19101/IJATEE.2022.10100564>.
13. Zhang Yunfei, Qi Rong, Rong Qi. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control // Energies. 2022. Vol. 15. No. 7. P. 2543. <http://doi.org/10.3390/en15072543>.
14. Chau Kwok Tong, Chan Ching Chuen, Liu Chunhua. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. Iss. 6. P. 2246–2257. <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>.
15. Lee Sung Gu, Bae Jaenam, Kim Won-Ho. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. No. 3. P. 5200705. <http://doi.org/10.1109/TASC.2017.2775561>.
16. Xu X., Novotny D.W. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. 1992. Vol. 28. Iss. 6. P. 1353–1358. <http://doi.org/10.1109/28.175288>.
17. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. P. 752012. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
18. Коваль А.С., Шваяков А.В. Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 4. С. 113–120. EDN: OITKCL.
19. Киселев Н.В., Мядзель В.Н., Рассудов Л.Н. Электроприводы с распределенными параметрами. Л.: Судостроение, 1985. 220 с.
20. Коваль А.С., Артеменко А.И. К вопросу разработки электропривода пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4(61). С. 56–61. [http://doi.org/10.53078/20778481\\_2018\\_4\\_56](http://doi.org/10.53078/20778481_2018_4_56). EDN: YPLUUP.

### References

1. Firago B.I. Operation of three-phase brushless AC motors at speeds higher than the main one. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. 2011;4:12-16. (In Russ.). EDN: QNRKFD.
2. Koval A.S., Yashin V.S., Artemenko A.I. Model of a PMSM-based electric drive with surface arrangement of magnets on the rotor and flow regulation. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2019;3:121-128. (In Russ.). [http://doi.org/10.53078/20778481\\_2019\\_3\\_121](http://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121). EDN: AGLUAI.
3. Grubiy S.V. Calculation of the cutting forces and torque when milling with end mills. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;10:26-37. (In Russ.). <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG.
4. Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I., Bayanov E., Chipurnov S. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles. In: *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: materialy I Vserossijskoj konferencii po elektricheskim mashinam v ramkah Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Electrical complexes and systems: materials of the 1st All-Russian Conference on Electrical Machines within the framework of the International scientific and practical conference*. 26–28 October 2022, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2022, p. 235-243. (In Russ.). EDN: CKYKCT.
5. Shchagin A.V., Nguyen Thanh Duong, Kyaw Soe Win. Comparative analysis of electric drives of processing equipment. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2022;27(2):193-204. (In Russ.). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-2-193-204>. EDN: BZZGAV.
6. Rauth S.S., Samanta B. Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-Based FOC. In: *IEEE 17th India Council International Conference*. 2020;17. <http://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>.
7. Li Chunyan, Kou Baoquan. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle. In: *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 2012. <http://doi.org/10.1109/EML.2012.6325049>.
8. Davydov A., Bochenkov B., Anosov V. Compact inverter for single-phase induction motor. In: *International Russian Automation Conference*. 5-11 September 2021, Sochi. Sochi: IEEE; 2021, p. 74-78. <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537331>.
9. Yu Yang, Cong Leyao, Tian Xia, Mi Zengqiang, Li Yang, Fan Zhen, et al. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss. In: *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2020;4(3):161-171. <http://doi.org/10.30941/CESTEMS.2020.00021>.
10. Carpaneto M., Marchesoni M., Vallini G. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter. In: *SPEEDAM*. 14–16 June 2010, Pisa. Pisa: IEEE; 2010, p. 318-323. <http://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545088>.
11. Kolano K. New method of vector control in PMSM motors. *IEEE Access*. 2023;11:43882-43890. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>.

12. Kotin D., Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2023;10(105):1093-1102. <http://doi.org/10.19101/IJATEE.2022.10100564>.
13. Zhang Yunfei, Qi Rong, Rong Qi. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control. *Energies*. 2022;15(7):2543. <http://doi.org/10.3390/en15072543>.
14. Chau Kwok Tong, Chan Ching Chuen, Liu Chunhua. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246–2257. <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>.
15. Lee Sung Gu, Bae Jaenam, Kim Won-Ho. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(3):5200705. <http://doi.org/10.1109/TASC.2017.2775561>.
16. Xu X., Novotny D.W. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992;28(6):1353-1358. <http://doi.org/10.1109/28.175288>.
17. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10:752012. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
18. Koval A.S., Shvayakov A.V. Electromechanical system of lifts with a speed of 2 m/s. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009;4:113-120. (In Russ.). EDN: OITKCL.
19. Kiselev N.V., Myadzel' V.N., Rassudov L.N. *Electric drives with distributed parameters*. Leningrad: Sudostroenie; 1985, 220 p. (In Russ.).
20. Koval A.S., Artemenko A.I. On the selection of speed controller parameters and the formation of motion tachograms in elevator adjustable drives. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2018;4:56-61. (In Russ.). [http://doi.org/10.53078/20778481\\_2018\\_4\\_56](http://doi.org/10.53078/20778481_2018_4_56).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Давыдов Артем Евгеньевич**,  
аспирант,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия  
✉ [a.e.davydov@corp.nstu.ru](mailto:a.e.davydov@corp.nstu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

**Artem E. Davydov**,  
Postgraduate Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia  
✉ [a.e.davydov@corp.nstu.ru](mailto:a.e.davydov@corp.nstu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

**Боченков Борис Михайлович**,  
к.т.н., доцент,  
кафедра электропривода и автоматизации  
промышленных установок,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия  
[bochenkov@ngs.ru](mailto:bochenkov@ngs.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

**Boris M. Bochenkov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Department of Electric Drive and Automation of Industrial  
Installations,  
Novosibirsk State Technical University,  
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia  
[bochenkov@ngs.ru](mailto:bochenkov@ngs.ru)  
<https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

**Панкрац Юрий Витальевич**,  
к.т.н., доцент,  
кафедра электропривода и автоматизации  
промышленных установок,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия  
[pankrats79@mail.ru](mailto:pankrats79@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

**Yuriy V. Pankrats**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Department of Electric Drive and Automation of Industrial  
Installations,  
Novosibirsk State Technical University,  
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia  
[pankrats79@mail.ru](mailto:pankrats79@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

#### Вклад авторов

#### Contribution of the authors

Давыдов А.Е. – концептуализация, исследование, сбор данных, первоначальный вариант написания рукописи, редактирование. Боченков Б.М. – концепция исследования, дизайн. Панкрац Ю.В. – концепция исследования, сбор данных.

Davydov A.E. carried out conceptualization, performed the research, collected data, submitted the original manuscript and was responsible for editing. Bochenkov B.M. was responsible for the research concept and design. Pankrats Yu.V. was responsible for the research concept and data collection.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 16.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2023 г.; принята к публикации 05.12.2023 г.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.