

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

**Воронко А.Б.**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.**

**e-mail: [ArturVoronko@gmail.com](mailto:ArturVoronko@gmail.com)**

*Разработан алгоритм формирования заданного потокосцепления в режиме ослабления поля для систем векторного управления моментом-потоком асинхронных двигателей тягового назначения. Предложенное решение позволяет эффективно ограничивать напряжение статора на заданном уровне с учетом напряжения звена постоянного тока питающего преобразователя. Представленные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность предложенного алгоритма. Библ. 6, рис. 1.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, ослабление поля, транспортные применения.

**Введение.** Современные алгоритмы косвенного векторного управления асинхронным двигателем (АД) [1, 2] при выполнении условий асимптотического полеориентирования обеспечивают независимое регулирование механических координат и вектора потокосцепления ротора. Одним из необходимых условий для этого является удержание контуров регулирования токов в режиме, исключающем вхождение системы в ограничение по выходному напряжению инвертора.

Классический метод формирования заданного потокосцепления в зоне ослабления поля подразумевает его уменьшение, начиная с некоторой рабочей точки, в обратно пропорциональной зависимости от скорости вращения ротора АД [1]. Однако этот метод не позволяет в полной мере использовать напряжение преобразователя для создания требуемого момента [3], а также избежать вхождения контуров регулирования тока в ограничение по напряжению в динамических режимах. Его использование в условиях транспортных применений, для которых характерны широкие диапазоны изменения скоростей вращения приводного двигателя, напряжения питания и задающих воздействий, дополнительно осложняется необходимостью определения базовых скоростей вхождения в зону ослабления поля для изменяющихся условий работы системы.

Вопросам регулирования координат АД в зоне скоростей выше номинальной с учетом ограничений на регулируемые координаты посвящено много работ, в частности, [3, 5]. В отдельную группу выделяют аналитические решения, основанные на математической модели АД, аналогичные [3], указывая на их чувствительность к вариациям параметров машины [4]. Широко представлены в литературе алгоритмы, формирующие заданное потокосцепление с помощью регулятора напряжения статора [4]. В [5] предложена комбинация статических ограничений, а также корректирующих связей, реализующих динамические ограничения задающих воздействий контуров регулирования токов.

Методы, аналогичные [4, 5], существенно изменяют структуру исходного алгоритма управления, поэтому требуют дополнительного анализа устойчивости и настройки регуляторов. С этой точки зрения, аналитическая форма решения задачи ослабления поля, представленная, например, [3], является более предпочтительной. Кроме того, построение алгоритма ослабления поля на основе аналитических зависимостей в виде ограничений на заданное потокосцепление оставляет дополнительную степень свободы для применения различных механизмов улучшения показателей качества и оптимизации энергетики процессов управления.

**Целью работы** является разработка алгоритма формирования заданного потокосцепления для систем векторного управления моментом-потоком АД, отвечающих требованиям транспортных применений.

**Формирование заданного потокосцепления.** Рассмотрим выражение для моментной составляющей тока статора [1] в системе координат (d-q)

$$\dot{i}_{1q} = -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \sigma^{-1} u_{1q}, \quad (1)$$

где  $(i_{1d}, i_{1q})$ ,  $(u_{1d}, u_{1q})$ ,  $(\psi_{2d}, \psi_{2q})$  – компоненты векторов тока статора, напряжения статора, потокосцепления ротора;  $\omega$  – угловая скорость ротора,  $\omega_0$  – синхронная скорость вращения системы координат (d-q),  $p_n$  – число пар полюсов. Константы  $\alpha, \beta, \gamma, \sigma > 0$  в (1), зависящие от электрических параметров АД, определены в соответствии с [2].

В установившемся режиме при выполнении условий полеориентирования по вектору потокосцепления ротора и отсутствии ошибок отработки заданного модуля вектора потокосцепления  $\psi^*$ , т.е. при  $\psi_{2q} = 0$ ,  $\psi_{2d} = \psi^*$ , уравнение (1) может быть записано в виде

$$\beta p_n \omega \psi^* = \sigma^{-1} u_{1q} - \gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d}. \quad (2)$$

Приняв во внимание, что контуры токов с «большими» коэффициентами усиления обеспечивают отработку заданных токов статора с нулевой ошибкой, реальные токи  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$  в (2) могут быть заменены на заданные значения  $i_{1d}^*$ ,  $i_{1q}^*$  в установившемся режиме  $i_{1d}^* = \psi^* L_m^{-1}$ , где  $L_m$  – индуктивность намагничивающего контура.

Учитывая дополнительно выражение для синхронной скорости при косвенном полеориентировании [2]

$$\omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m i_q^* (\psi^*)^{-1}, \quad \psi^* > 0, \quad (3)$$

и, подставляя (3) в (2), получим

$$\beta p_n \omega \psi^* = \sigma^{-1} u_{1q} - \gamma i_q^* - \omega p_n \psi^* L_m^{-1} - \alpha i_q^*. \quad (4)$$

В режиме ослабления поля на заданное значение моментной составляющей тока накладывается ограничение

$$|i_q^*| \leq i_{qr}^*, \quad (5)$$

где  $i_{qr}^*$  – номинальное значение моментной составляющей тока статора АД при номинальном потокоосцеплении.

Для исключения дополнительной динамики в подсистеме потокоосцепления в (4) примем  $i_q^* = i_{qr}^*$ .

Максимальное напряжение по оси  $q$  при векторном управлении ограничено выражением

$$u_{1q} \leq \sqrt{U_{dc}^2 / 3 - u_{1d}^2} \square u_{qmax}, \quad (6)$$

где  $U_{dc}$  – напряжение звена постоянного тока силового преобразователя. Используя (4) и (6) запишем неравенство, выполнение которого обеспечивает нахождение вектора напряжения статора в физически реализуемой области

$$\psi^* \leq \frac{\sigma^{-1} u_{qmax} - (\gamma + \alpha) i_{qr}^*}{|\omega| p_n (\beta + L_m^{-1})}, \quad |\omega| > 0. \quad (7)$$

Для повышения точности обработки момента-потокоосцепления при работе системы векторного управления в зоне ослабления поля необходимым является учет нелинейности кривой намагничивания АД. Для корректного формирования заданного тока возбуждения в данном исследовании использован метод определения кривой намагничивания, предложенный в [6], а также ее аппроксимация в виде

$$i_d^* = i_{dr}^* \left[ a (\psi^* / \psi_r^*) + (1 - a) (\psi^* / \psi_r^*)^b \right], \quad (8)$$

где  $i_{dr}^* = \psi_r^* L_m^{-1}$  – номинальное значение полевой составляющей тока статора АД при номинальном потокоосцеплении  $\psi_r^*$ ;  $0 < a \leq 1$ ,  $b > 1$  – константы, определяющие форму аппроксимированной кривой намагничивания.

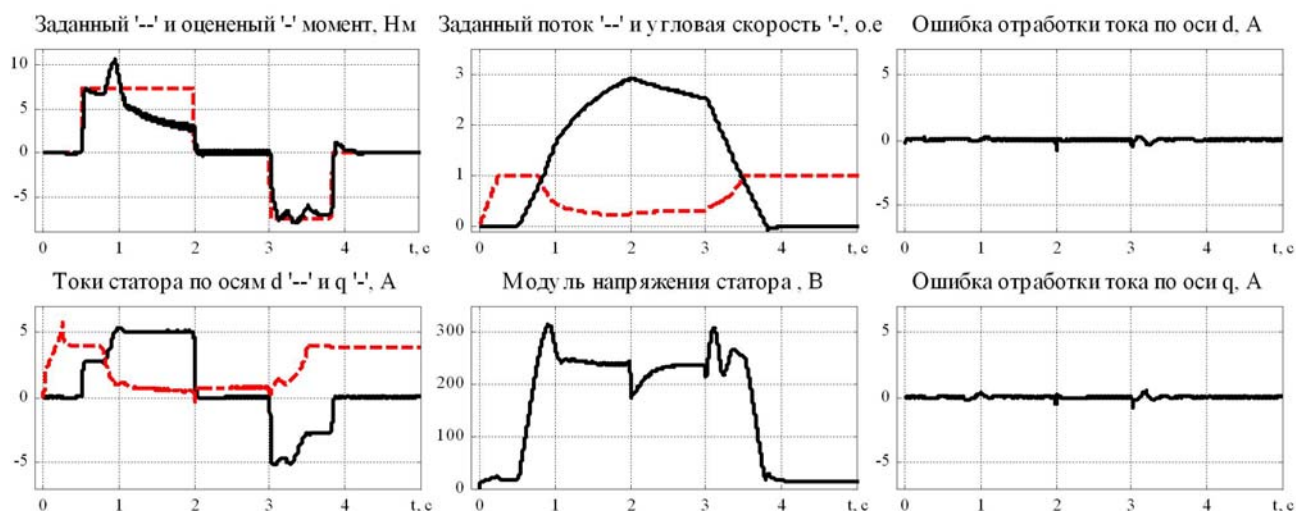
**Экспериментальное тестирование.** Исследования выполнены на установке, которая включает в себя: АД мощностью 2.2 кВт (параметры номинального режима: момент - 15 Нм, угловая скорость - 148 рад/с, потокоосцепление - 0.96 Вб); силовой преобразователь с автономным инвертором напряжения на IGBT-ключках; управляющий контроллер на основе цифрового сигнального процессора TMS320F28335.

Для идентификации кривой намагничивания исследуемого АД проведено ряд тестов, основанных на методике [6], в результате определены значения коэффициентов аппроксимации  $a = 0.71$ ,  $b = 6$  (8).

Тестирование предложенного алгоритма формирования заданного потокоосцепления (5)–(7) с учетом (8) выполнено в составе алгоритма косвенного векторного управления моментом АД [2]. При этом применялась последовательность операций управления, включающая следующие этапы: вначале машина возбуждается с использованием заданной траектории потокоосцепления, достигающей номинального значения; на интервале 0,5 – 2 с двигатель обрабатывает заданную траекторию момента, достигающую значения половины от номинального момента АД; на интервале 2 – 3 с система работает в режиме выбега с нулевым заданным моментом, а на участке 3 – 3,8 с от двигателя требуется обработать траекторию тормозного момента, обеспечивающую торможение до нулевой скорости. Графики переходных процессов регулируемых координат показаны на рисунке.

Совместно с траекторией заданного момента показан график оценки отработанного момента, полученный путем численного дифференцирования и низкочастотной фильтрации угловой скорости при известных значениях момента инерции и коэффициента вязкого трения механической части. Траектория заданного потокоосцепления показана в относительных единицах на одном графике с угловой скоростью. Как видно из приведенных графиков уменьшение заданного потокоосцепления начинается с некоторой скорости, близкой к номинальной, при этом до вхождения в ограничение (5) возрастает значение моментной составляющей тока. Интенсивность уменьшения намагничивающего тока выше, чем у заданного потокоосцепления из-за движения по нелинейному участку кривой намагничивания и соответствующего применения аппроксимации (8). Исходя из графика оценки отработанного момента, этому участку отвечает увеличение момента двигателя относительно заданного, что объясняется динамическим отставанием ослабления потока в машине. Следует отметить, что рассматриваемая ошибка обработки момента обусловлена высокой динамикой механических координат и может быть уменьшена путем введения производной по заданному потокоосцеплению или использованием модифицированного регулятора потокоосцепления.

На участке установившегося номинального значения тока статора по оси  $q$  стабилизируется модуль напряжения статора, что подтверждает желаемые свойства ограничения с помощью (7), при этом соответственно уменьшается генерируемый двигателем момент. Как видно из приведенных графиков, ошибки обработки токов по осям  $d$  и  $q$  в установившихся режимах равны нулю, что также подтверждает эффективность использования предложенного алгоритма формирования заданного потокоосцепления для предотвращения вхождения системы в ограничение по выходному напряжению инвертора при работе в зоне ослабления поля.



**Выводы.** Разработан алгоритм формирования заданного потокоцепления в режиме ослабления поля, предназначенный для использования в составе систем векторного управления моментом-потокоцеплением АД, который сформулирован в виде аналитической зависимости, учитывающей напряжение звена постоянного тока преобразователя, параметры машины и ограничение моментного тока. Представленные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность применения предложенного алгоритма для стабилизации выходного напряжения инвертора при работе в зоне глубокого ослабления поля, что отвечает требованиям транспортных применений.

УДК 681.5:62-83

#### АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ЗАДАНОГО ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ В РЕЖИМІ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Воронко А.Б.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

пр. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна.

e-mail: [ArturVoronko@gmail.com](mailto:ArturVoronko@gmail.com)

*Розроблено алгоритм формування заданого потоку в режимі ослаблення поля для систем векторного керування моментом-потоком асинхронних двигунів тягового призначення. Запропоноване рішення дозволяє ефективно обмежувати напругу статора на заданому рівні з врахуванням напруги ланки постійного струму живлячого перетворювача. Представлені результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого алгоритму. Бібл. 6, рис. 1.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, векторне керування, ослаблення поля, транспортні застосування.

#### ALGORITHM OF FLUX REFERENCE FORMING FOR VECTOR CONTROLLED INDUCTION MOTOR IN FIELD WEAKENING REGION FOR TRACTION APPLICATIONS

Voronko A.B.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

e-mail: [ArturVoronko@gmail.com](mailto:ArturVoronko@gmail.com)

*An algorithm of flux reference forming in field weakening region for vector control systems of induction motor for traction application is developed. The proposed solution can effectively limit the stator voltage at a predetermined level, according to the DC-bus voltage of supply converter. Presented experimental results confirm the effectiveness of the proposed algorithm. References 6, figure 1.*

**Key words:** induction motor, vector control, field weakening, traction applications.

1. Leonhard W. Control of Electrical Drives. (3rd edition). – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.
2. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors // IEEE Transactions on Power Electronic. – 2003. – Vol. 18. – No. 1. – Pp. 151–163.
3. Kim Sang-Hoon, Sul Seung-Ki. Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – Vol. 31. – No. 4. – Pp. 787–794.
4. Abu-Rub H., Schmirgel H., Holtz J. Maximum Torque Production in Rotor Field Oriented Control of an Induction Motor at Field Weakening // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2007. – Pp. 1159–1164.
5. Briz F., Diez A., Degner M. W., Lorenz R.D. Current and flux regulation in field-weakening operation // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37. – No. 1. – Pp. 42–50.
6. Levi E., Sokola M., Vukosavic S.N. A method for magnetizing curve identification in rotor flux oriented induction machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2000. – Vol. 15. – No. 2. – Pp. 157–162.

Надійшла 17.02.2014