

УДК 681.513.5

ОПТИМАЛЬНОЕ ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Е. М. Потапенко, А. А. Шийка

Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: AndreyShiyka@gmail.com

Модифицирован известный критерий оптимальности векторного управления асинхронным электроприводом «момент/ток». Модифицированный критерий «момент/ток-м» позволяет при ограниченном напряжении существенно увеличить электромагнитный момент и одновременно расширить диапазон регулирования скорости по сравнению с известным критерием. Доказано, что при отсутствии ограничения напряжения характеристики критериев «момент/ток-м» и «момент/ток» совпадают. Получены энергетические характеристики законов управления. Представлена структурная схема робастного оптимального управления токами, и дано описание работы системы.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, оптимальное векторное управление, максимизация электромагнитного момента, минимизация мощности, расширенный диапазон регулирования скорости.

ОПТИМАЛЬНЕ ШИРОКОДИАПАЗОННЕ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Є. М. Потапенко, А. А. Шийка

Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: AndreyShiyka@gmail.com

Модифіковано відомий критерій оптимальності векторного керування асинхронним електроприводом «момент/струм». Модифікований критерій «момент/струм-м» дозволяє за умови обмеженої напруги суттєво збільшити електромагнітний момент і одночасно розширити діапазон регулювання швидкості порівняно з відомим критерієм. Доведено, що при відсутності обмеження напруги характеристики критеріїв «момент/струм-м» та «момент/струм» співпадають. Отримано енергетичні характеристики законів керування. Наведено структурну схему робастного оптимального керування струмами, й надано опис роботи системи.

Ключові слова: асинхронний електропривод, оптимальне векторне керування, максимізація електромагнітного моменту, мінімізація потужності, розширений діапазон регулювання швидкості.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Под широкодиапазонным управлением скоростью понимается управление в диапазоне от нулевой до нескольких номинальных скоростей. Такой диапазон скоростей необходим для приводов гибридных автомобилей и электромобилей, тяговых приводов электропоездов, приводов высокоскоростных металлообрабатывающих станков (электрошпинделей), стартеров-генераторов газотурбинных двигателей, электроприводов антенн радиолокаторов. Для этих целей в наибольшей степени подходят асинхронные двигатели (АД). Задачи управления АД при скоростях, меньших номинальной, в значительной степени решены [1]. Несмотря на то, что исследования по управлению АД при больших скоростях делятся уже около двадцати лет, исчерпывающее решение до сих пор не получено. В известных работах [2–6] решается задача увеличения электромагнитного момента с помощью максимизации широко известного критерия «момент/ток» (M/T). При этом не учитывается отличие уравнений моментного и намагничивающего токов, в результате чего эти токи оказываются по модулю равными, что, как будет показано ниже, ограничивает возможности максимизации момента. Кроме того, совершенно не учитывается электропотребление.

Целью исследования является разработка метода синтеза программного управления моментным и намагничивающим токами, максимизирующего электромагнитный момент при всех скоростях.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1. Постановка задачи. Полные уравнения АД являются нелинейными, неопределенными. В работе [1] для таких уравнений разработаны робастные методы управления по программным токам. Для формирования программных токов при большом диапазоне скоростей, по аналогии с работами [2–4], воспользуемся упрощенными уравнениями, учитывающими основные для данной задачи физические явления, а именно:

$$u_d = R_{s0}i_d - \omega_0 \sigma L_{s0}i_q; \tag{1}$$

$$u_q = R_{s0}i_q + \omega_0 L_{s0}i_d; \tag{2}$$

$$m = nL_{m0}^2 L_{r0}^{-1} i_d i_q, \tag{3}$$

где и в дальнейшем i_d, i_q, u_d, u_q – токи и напряжения статора, заданные в синхронном базисе (d, q); m – электромагнитный момент; n – количество пар полюсов; R_{s0} – номинальное значение сопротивления статора; L_{s0}, L_{r0}, L_{m0} – номинальные значения индуктивностей статора, ротора и взаимной индуктивности, $L_{mr0} = L_{m0} L_{r0}^{-1} \approx 1$; $\sigma = 1 - L_{m0}^2 / L_{s0} L_{r0}$ – коэффициент рассеивания; ω_0 – угловая скорость вектора потокосцепления ротора (синхронная скорость); ω – скорость ротора; p – оператор дифференцирования. (Двухфазная модель (1)–(3) получена из трехфазной с соблюдением равенства мощностей моделей).

При достижении максимальных значений электромагнитного момента и скорости АД необходимо

учитывать ограничения тока и напряжения статора АД, накладываемые на систему преобразователем частоты (ПЧ) с ШИМ и условиями безопасной работы АД [2–6].

$$|i|^2 = i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\max}^2; \quad (4)$$

$$|u|^2 = u_d^2 + u_q^2 \leq u_{\max}^2, \quad (5)$$

где $u_{\max} = U_{dc}/\sqrt{3}$, U_{dc} – напряжение в цепи постоянного тока ПЧ [2, 4].

2. *Синтез программного управления.* Самым распространенным методом оптимизации является максимизация отношения «момент/ток» [1–6]. В этом случае программные значения статорных токов определяются равенствами [1, 2]

$$i_{dp} = \sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}} = i_{qp} \operatorname{sign} m_0, \quad (6)$$

где m_0 – желаемое значение электромагнитного момента. Как видно из (6), модули программных токов равны. В то же время, как следует из уравнений (1) и (2), эти токи описываются различными уравнениями. Это наталкивает на мысль, что соотношения (6) не являются оптимальными, в особенности при больших скоростях. Для расширения возможностей оптимизации примем

$$i_{dp} = k \sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}}; \quad i_{qp} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{|m_0|}{nL_{m0}}} \operatorname{sign} m_0, \quad (7)$$

где k – искомый оптимизирующий безразмерный множитель (функция). Следует отметить, что произведение токов (7) дает тот же электромагнитный момент, что и произведение токов (6).

2.1. *Ограничение напряжения (5).* Сумма квадратов уравнений (1) и (2) с учетом ограничения (5) при подстановке в полученное уравнение выражений (7) дает:

$$u_{\max}^2 \geq u^2 = \frac{|m_0|}{nL_{m0}} \left[(kR_{s0} - \frac{1}{k} \omega_0 \sigma L_{s0} \operatorname{sign} m_0)^2 + \left(\frac{1}{k} R_{s0} \operatorname{sign} m_0 + \omega_0 L_{s0} k \right)^2 \right], \quad (8)$$

которое приводится к виду

$$u_{\max}^2 \geq u^2 = \frac{|m_0|}{nL_{m0}} \left[R_{s0}^2 (k^2 + k^{-2}) + \right. \quad (9)$$

$$\left. + 2R_{s0}L_{s0}\omega_0 \operatorname{sign} m_0 (1 - \sigma) + L_{s0}^2 \omega_0^2 (k^2 + \sigma^2 k^{-2}) \right].$$

Из уравнений (8) и (9) очевидно, что при любом заданном напряжении u модуль электромагнитного момента $|m_0|$ будет максимальным при минимальном значении выражений в квадратных скобках в уравнениях (8) и (9). Минимум этой функции достигается при равенстве нулю первой производной данной функции по k . Минимум имеет место при

$$k = \sqrt[4]{\frac{R_{s0}^2 + \sigma^2 L_{s0}^2 \omega_0^2}{R_{s0}^2 + L_{s0}^2 \omega_0^2}} > 0. \quad (10)$$

Таким образом, модуль электромагнитного момента максимален при выполнении условия (10). Максимальный электромагнитный момент находит-

ся из выражения (8) или (9) при $|u| = |u_{\max}|$ и при выполнении равенства (10), а токи, формирующие этот момент, определяются из выражений (7).

Замечания. 1. Сравнение выражений (6) и (7), (10) показывает, что известный критерий оптимизации М/Т (6) является частным случаем критерия М/Т-м (7), (10) при $\omega_0 = 0$, т.е. известный критерий оптимален только при нулевой скорости.

2. Значение оптимального k , как видно из уравнения (10), не зависит от произведения $\omega_0 \operatorname{sign} m_0$ (не зависит от режима работы: двигательный или генераторный).

3. Значение оптимального электромагнитного момента, в соответствии с уравнением (9), зависит от произведения $\omega_0 \operatorname{sign} m_0$. При прочих равных условиях электромагнитный момент в генераторном режиме больше, чем в двигательном.

4. Коэффициент k может лежать в пределах $\sqrt{\sigma} \leq k(\omega_0) \leq 1$.

2.2. *Ограничение тока (4).* Подстановка (7) в (4) дает

$$|m_0| \leq i_{\max}^2 nL_{m0} (k^2 + k^{-2})^{-1}, \quad (11)$$

откуда следует: модуль электромагнитного момента достигает максимума при $k = 1$, т.е. при выполнении соотношений (6). Максимальный электромагнитный момент определяется равенством в (11).

2.3. *Отсутствие ограничений тока и напряжения.* При невыполнении равенств в (4), (5) в качестве критерия оптимальности примем минимум активной мощности, которая, в соответствии с (1), (2), (7), определяется выражением

$$N_a = u_d i_d + u_q i_q = \frac{|m_0|}{nL_{m0}} \left[R_0 (k^2 + k^{-2}) + \omega_0 L_{s0} (1 - \sigma) \operatorname{sign} m_0 \right]. \quad (12)$$

Как и следовало ожидать, потребляемая активная мощность пропорциональна модулю электромагнитного момента. Выражение (12) в двигательном режиме ($\omega_0 m_0 > 0$) имеет минимум при $k = 1$ (при законе формирования токов (6)). В этом случае выражение (12) принимает вид

$$N_a = \frac{|m_0|}{nL_{m0}} [2R_{s0} + \omega_0 L_{s0} (1 - \sigma) \operatorname{sign} m_0]. \quad (13)$$

В генераторном режиме ($\omega_0 m_0 < 0$), как следует из (13), активная мощность возвращается в сеть при

$$|\omega_0| > 2R_{s0} L_{s0}^{-1} (1 - \sigma)^{-1}. \quad (14)$$

Реактивная мощность определяется выражением

$$Q = u_q i_d - u_d i_q = \frac{|m_0|}{nL_{m0}} \left[\omega_0 L_{s0} \left(k^2 + \frac{\sigma}{k^2} \right) \right]. \quad (15)$$

На рис. 1, 2 даны фрагменты характеристик $m_0 = f(\omega_0)$ (двигательный и генераторный режим) АЭП с двигателем 4А225М4УЗ, построенные по равенствам (11), (прямая 1); (9), (10) (кривая 2); (9) при $k = 1$, (кривая 3, известный критерий М/Т). Кривые 2 и 3 соответствуют ограниченному напряжению.

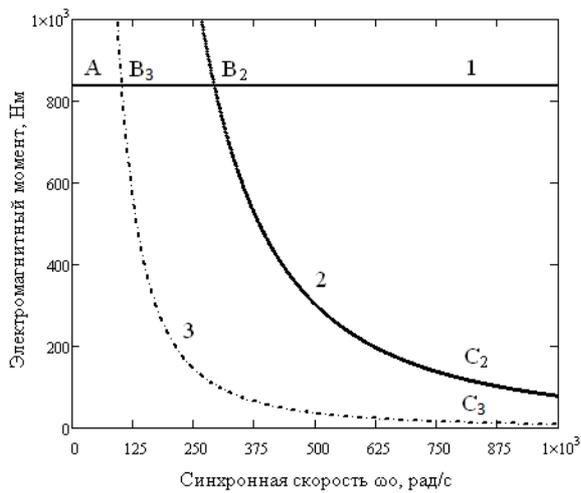


Рисунок 1 – Фрагменты характеристик $m_0 = f(\omega_0)$ АЭП с двигателем 4A225M4У3 (двигательный режим)

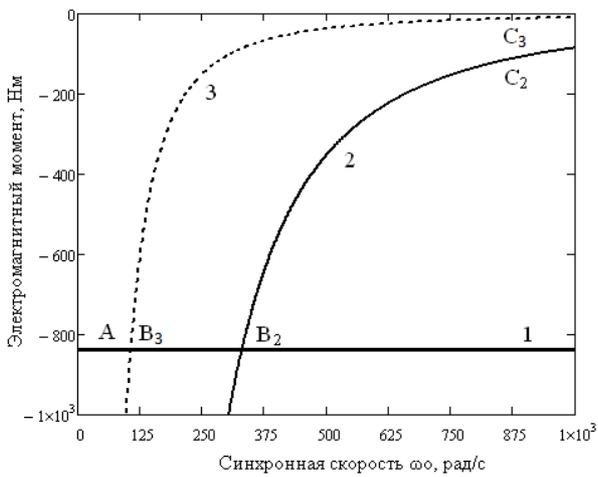


Рисунок 2 – Фрагменты характеристик $m_0 = f(\omega_0)$ АЭП с двигателем 4A225M4У3 (генераторный режим)

Сравнение кривых 2 и 3 (рис. 1, 2) убедительно демонстрирует значительное увеличение диапазонов регулирования электромагнитного момента и синхронной скорости при использовании предлагаемого метода оптимизации. Кривые AB_2C_2 (алгоритм М/Т-м) и AB_3C_3 (алгоритм М/Т)

соответствуют максимально быстрому разгону двигателя. Координатные оси характеристик не являются ее осями симметрии для двигательного и генераторного режимов (соотношение (9)).

На рис. 1 и 2 механическая характеристика представлена в функции синхронной скорости ω_0 . Механическую характеристику можно представить в функции скорости ротора ω с помощью зависимостей (16)

$$\omega_0 = n\omega + \omega_{sl}, \quad \omega_{sl} = \frac{i_{qp}}{T_r i_{dp}} = \frac{\text{sign } m_0}{T_r k^2}, \quad (15)$$

где ω_{sl} – скорость скольжения, T_r – постоянная времени ротора.

3. *Формирование робастного управления.* Функциональная схема блока формирования программных токов представлена на рис. 3. Предполагается использование робастного управления, описанного в монографии [1]. Будет считаться, что измеряются скорость ротора ω и вычисляются токи i_d, i_q . Момент инерции ротора, внешние воздействия и трение, действующие на него, а также погрешности формирования электромагнитного момента, обусловленные неточностью знания индуктивностей, входящих в выражение (3), неизвестны. Выделяется номинальное значение момента инерции ротора и индуктивностей, а все внешние воздействия, воздействия, обусловленные неопределенными частями параметров, объединяются в неопределенность, которая оценивается и компенсируется за счет применения комбинированного управления (блока «регулятор момента» [1]). Таким образом, комбинированное управление формирует желаемый электромагнитный момент m_0 , осуществляющий компенсацию неопределенности и формирование заданного вида переходного процесса. По выражениям (7), (10) формируются программные токи i_{dp}, i_{qp} . Вычисленные по измерениям фазных токов, токи i_d, i_q вычитаются из своих программных значений. Полученные разности подаются в робастные комбинированные регуляторы токов [1], которые формируют программные напряжения u_{dp}, u_{qp} , входящие в уравнения (1), (2), (5), (8), (9).

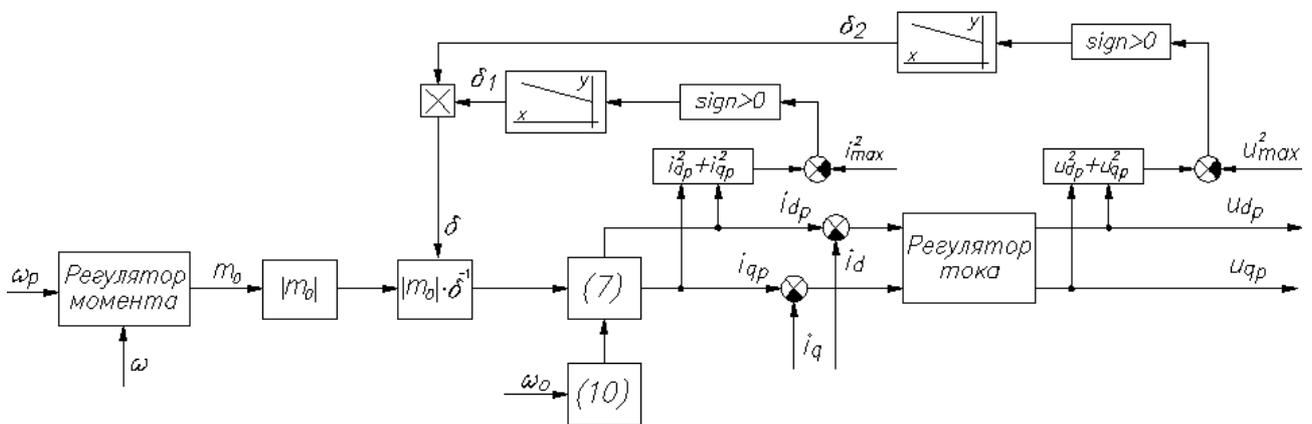


Рисунок 3 – Функциональная схема блока формирования программных токов

При невыполнении условий (4) или (5) с помощью цепей ограничения тока и напряжения формируются сигналы для уменьшения желаемого электромагнитного момента $|m_0|$ с помощью коэффициента ослабления $\delta = \delta_1 \delta_2$.

ВЫВОДЫ. В работе представлен модифицированный критерий оптимального векторного управления асинхронным электроприводом «момент/ток-м». Для данного критерия математически строго синтезированы выражения для определения коэффициента связи составляющих вектора тока статора k , позволяющего обеспечить максимальное значение электромагнитного момента в условиях ограничений по току и напряжению питания АЭП. Для случая не достижения указанных ограничений разработан метод синтеза программных токов, минимизирующих потребляемую мощность при заданном электромагнитном моменте. Исследованы энергетические характеристики законов управления. Представлена структурная схема робастного оптимального управления токами статора и дано описание работы системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – 352 с.
2. J.K. Seok and S.K.Sul, Optimal Flux Selection of an Induction Machine for Maximum Torque Operation in Flux-Weakening Region // IEEE Trans. on Power Electronics. –1999. – Iss. 14. – № 4. – PP. 700–708.
3. Gallegos-Lopes G., Gunawan F. S., Walters J. E Current Control of Induction Machines in the Field-Weakened Region // IEEE Trans. on Industry applications. – 2007. – Iss. 43. – № 4. – PP. 981–989.
4. Ben Ali, Khedhe A., Mimouni M.F., Dhifaoui R. Torque Maximization and Sensorless Control of Induction Motor in a Flux Weakening Region // Internal Journal of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering. – 2009. – IJ-STA, Vol. 3. – № 1 (July 2009). – PP. 972–985.
5. Пересада С.М, Дымко С.С. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток // Электротехнические и компьютерные системы. Н.-т. журнал. – К.: Техника, 2011. – № 03 (79). – С. 28–31.
6. Wasynchuk O., Sudhoff S.D., Corsine K.A. and oth. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives // IEEE Trans. On Energy Conversion. – 1998. – Iss. 13. – № 2. – PP. 163–169.

OPTIMAL WIDE SPEED CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE

E. Potapenko, A. Shiyka

Zaporizhzhya National Technical University

ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: AndreyShiyka@gmail.com

This paper presents modified version of known criteria «torque-per-Ampere» for optimal vector control of induction machine. Modified criteria «torque-per-Ampere-m» enables significantly increasing of the maximum electromagnetic torque in comparison with the known criteria for all speeds of the rotor under the voltage constraint. Analytically proved, that without voltage limits control performances for both criteria are coincide. The optimal power performances for modified criteria are obtained. The block diagram of robust optimal current regulator is represented. The simulations results show that modified criteria provide the maximization of torque-per-Ampere capability in all speeds or rotor.

Key words: induction motor drive, optimal vector control, torque maximization, wide speed control.

REFERENCES

1. Potapenko E.M., Potapenko E.E. *Robust algorithms of vector control of an induction machine.* – Zaporizhzhya: ZNTU, 2009. – 352 p. [in Russian].
2. J.K. Seok and S.K.Sul, Optimal Flux Selection of an Induction Machine for Maximum Torque Operation in Flux-Weakening Region // IEEE Trans. on Power Electronics. – 1999. – Iss. 14. – № 4. – PP. 700–708.
3. Gallegos-Lopes G., Gunawan F. S., Walters J. E Current Control of Induction Machines in the Field-Weakened Region // IEEE Trans. on Industry applications. – 2007. – Iss. 43. – № 4. – PP. 981–989.
4. Ben Ali, Khedhe A., Mimouni M.F., Dhifaoui R. Torque Maximization and Sensorless Control of Induction Motor in a Flux Weakening Region // *Internal Journal of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering.* – 2009. – IJ-STA. – Vol. 3 – № 1 (July 2009). – PP. 972–985.
5. Peresada S., Dymko S. Direct torque vector control of induction motors with maximum torque per Ampere ratio // *Electrotechnical and computer systems.* – К.: Technika, 2011. – № 03 (79). – PP. 28–31.
6. Wasynchuk O., Sudhoff S.D., Corsine K.A. and oth. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives // *IEEE Trans. On Energy Conversion.* – 1998. – Iss. 13 – № 2. – PP. 163–169.

Стаття надійшла 8.06.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Сергіємком С.А.