

УДК 681.513.5

Е. М. Потапенко, д-р техн. наук,
А. А. Шийка

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫЕ РОБАСТНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

***Аннотация.** Обобщены результаты исследований, направленных на создание высокоточных энергооптимальных робастных асинхронных электроприводов. Предложенные методы позволяют значительно снизить энергопотребление ими по сравнению с известными. Обеспечивается робастность к неопределенности массо-инерционных характеристик и электрических параметров электропривода. Приведены результаты моделирования работы таких приводов с управлением по предлагаемому способу, подтверждающие ожидаемые характеристики.*

***Ключевые слова:** асинхронный электропривод, робастность, энергосбережение, энергооптимальность, точность управления*

E. M. Potapenko, ScD.,
A. A. Shiyka

PRECISION ENERGY OPTIMAL ROBUST INDUCTION DRIVE

***Abstract.** This paper presents a generalized results of the researches (under the head of the first co-author of this article), that were dedicated to developing of precision energy-optimal induction motor drive. Proposed algorithm provides significant decrease of power losses of induction motor drive compare to conventional vector control methods. Robustness to indeterminacy of electrical parameters, torque, and inertia of the drive are ensured. The validity of proposed algorithm is demonstrated by simulation.*

***Keywords:** induction motor drive, robustness, energy saving, energy optimal, precision control*

Є. М. Потапенко, д-р техн. наук,
А. А. Шийка

ВИСОКОТОЧНІ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНІ РОБАСТНІ АСИНХРОННІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ

***Анотація.** Узагальнено результати досліджень (під керівництвом першого співавтора цієї статті), спрямованих на створення високоточних енергооптимальних робастних асинхронних електроприводів (АЕП). Запропоновані методи дозволяють суттєво знизити енергоспоживання АЕП у порівнянні з відомими методами оптимального керування. Забезпечується робастність по відношенню до невизначеності масово-інерційних характеристик та електричних параметрів електропривода. Наведено результати моделювання роботи АЕП з керуванням по запропонованому методу, що підтверджують його очікувані характеристики.*

***Ключові слова:** асинхронний електропривод, робастність, енергозбереження, енергооптимальність, точність керування*

Введение. Благодаря простоте эксплуатации, надежности, дешевизне по сравнению с другими типами электродвигателей асинхронные двигатели (АД) давно привлекали внимание разработчиков электроприводов (ЭП). Однако их широкое использование началось только после появления мощных вычислителей, позволивших применить для управления векторные принципы Блашке, робастные высокоточные методы, используемые в ракетно-космической технике. В результате в настоящее время асинхронные приводы являются самыми распространенными. Указанные методы позволяют удовлетворять непрерывно возрастающим требованиям по точности управления. Расширение областей применения электроприводов с автономными источниками питания (электромобили, дизель-поезда, беспилотная малая авиация, стартеры газотурбинных авиадвигателей, приводы антенн радиолокаторов), ухудшение условий эксплуатации электроприводов выдвигает повышенные требования по обеспечению робастности их управления.

В настоящее время в мире, и особенно в Украине, актуальным является требование не просто энергосбережения при управлении, а достижение энергооптимальности (наивысшей степени энергосбережения). Задача минимизации энергопотребления не нова [1 – 4]. В работе [4] решают поставленную задачу путем предварительной разработки «оптимальных в среднем» алгоритмов управления без учета истинных значений переменных и параметров электропривода в каждый момент времени. Такое решение не позволяет достигнуть минимума энергетических затрат. В других работах [2, 3, 11] при синтезе управления используются простые критерии, не позволяющие достигнуть минимума электропотребления.

Целью статьи являются синтез и анализ высокоточных энергооптимальных робастных АЭП.

1. Описание электропривода. На рис. 1 изображена функциональная схема предлагаемого электропривода. Входным сигналом предлагаемого АЭП является программная угловая скорость ротора АД ω_p , определяемая технологическим процессом и качеством процесса ее дос-

тижения и торможения. Входным сигналом блока «Регулятор момента» (РМ) является программный

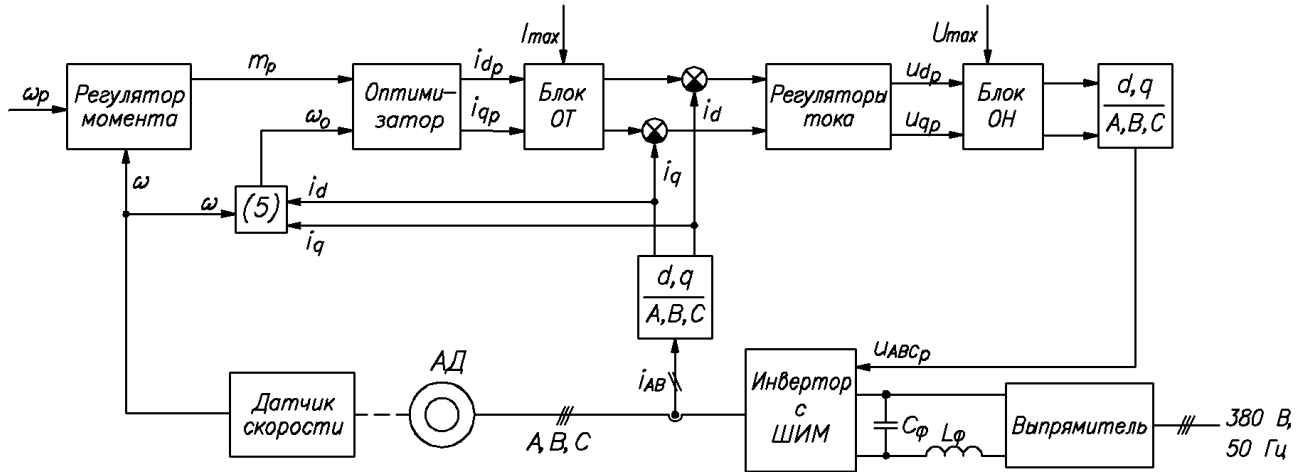


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемого электропривода

электромагнитный момент m_p , формируемый с помощью наблюдателя и регулятора [1], робастных по отношению к неопределенностям момента инерции ротора и индуктивностей, внешним воздействиям на ротор и трению, постоянной времени ротора без необходимости вычисления потокосцеплений.

Блок «Оптимизатор» предназначен для вычисления статорных программных токов в синхронном базисе (i_{dp}, i_{qp}) по электромагнитному моменту m_p и синхронной скорости ω_0 . В работе [1] были найдены выражения токов i_{dp}, i_{qp} , минимизирующих электромагнитные потери АД. В публикации [5] был введен коэффициент k , устанавливающий связь между оптимальными токами статора, что позволило в работе [6] синтезировать выражения программных токов, минимизирующих потери активной мощности АЭП (или максимизирующих КПД) при формировании заданного электромагнитного момента. В работе [8] получены выражения токов i_{dp}, i_{qp} , максимизирующие коэффициент мощности или минимизирующие полную мощность. Следует обратить внимание на то, что во всех случаях оптимизация осуществляется в реальном времени.

Для реализации указанных методов оптимизации необходимо знать следующие электромагнитные параметры электропривода: R_s – активное сопротивление фаз статора АД совместно с эквивалентным сопротивлением преобразователя частоты (ПЧ); R_r – активное сопротивление ротора; L_s, L_r, L_m – индуктивности фаз статора, ротора и взаимную индуктивность; R_m – сопротивление цепи намагничивания АД, связанное с потерями в стали. В работах [1, 9] синтезированы наблюдатели, оценивающие в реальном времени сопротивления R_s и R_r . Указанные выше индуктивности с ростом тока намагничивания нелинейным образом зависят от тока намагничивания. Блок оптимизатор в процессе своей работы минимизирует ток намагничивания до таких значений, при которых индуктивности практически не отличаются от их номинальных значений. Поэтому в самом оптимизаторе все индуктивности можно принимать равными своим

номинальным значениям. Сопротивление R_m , во-первых, в меньшей степени зависит от температуры, чем сопротивления меди, во-вторых, температура статора, с помощью которой можно вычислить R_m , легко замеряется. Таким образом, все параметры оптимизатора можно считать известными.

Сигналы с оптимизатора токов поступают на блок ограничения токов (ОТ), не допускающий превышения их опасных значений $|I_s|^2 = i_{dp}^2 + i_{qp}^2 \leq I_{max}^2$. Вычисленные токи i_d, i_q вычитаются из соответствующих программных токов i_{dp}, i_{qp} , полученные разности подаются в робастные комбинированные регуляторы токов (РТ). Дифференциальные уравнения токов i_d, i_q имеют неизвестные перекрестные связи и коэффициенты, зависящие от индуктивностей L_s, L_r, L_m , сопротивлений R_s и R_r . Регуляторы токов построены по комбинированному принципу. Они оценивают неопределенности и компенсируют их влияние, в результате чего независимо формируются управляющие напряжения в синхронном базисе u_{dp}, u_{qp} . Работа регуляторов тока исследована в монографии [1]. Напряжения u_{dp}, u_{qp} ограничиваются с помощью блока ограничения напряжения (ОН) $|U_s|^2 = u_{dp}^2 + u_{qp}^2 \leq U_{max}^2$. При отсутствии ОН контуры токов i_d, i_q независимы друг от друга. Напряжения u_{dp}, u_{qp} преобразуются в трехфазные напряжения, управляющие преобразователем частоты, формирующим напряжения, питающие асинхронный двигатель.

Как видно из рис. 1 и его описания, предлагаемый электропривод существенно отличается от известных электроприводов [10, 12]. В этих работах используется независимое подчиненное регулирование намагничивающего и моментного токов с использованием ПИ-регуляторов, с вычислением и компенсацией перекрестных связей.

2. Обеспечение робастности

2.1. Регулятор момента [1].

Рассматривается двухфазная модель АД, эквивалентная по мощности истинной трехфазной модели. Уравнения движения

ротора АД и электромагнитного момента определяются выражениями

$$I\dot{\omega} = m + m_l + m_f, \quad (1)$$

$$m = nL_m L_r^{-1} \psi_d i_q, \quad (2)$$

$$T_r \dot{\psi}_d + \psi_d = L_m i_d \quad (3)$$

где I и ω – неизвестный момент инерции и известная угловая скорость ротора, m – электромагнитный (управляющий) момент, m_l, m_f – неизвестные моменты нагрузки и момента трения.

На практике обычно все параметры объектов управления и внешние воздействия точно не известны. Особенно это имеет место в транспортных системах, системах, перемещающих грузы, в прокатном производстве и других областях. Перечисленные выше неопределенности требуют применения робастных методов управления. Полагаем, что m_l, m_f неизвестны, а параметры системы не точно известны, причем

$$\begin{aligned} I &= I_0 + I_\delta, \quad m = m_0 + m_\delta, \\ L_m &= L_{m0} + L_{m\delta}, \quad L_r = L_{r0} + L_{r\delta}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь I_0, m_0, L_{m0}, L_{r0} – детерминированные части и паспортные значения, $I_\delta, m_\delta, L_{m\delta}, L_{r\delta}$ – кусочно-дифференцируемые неизвестные погрешности. В соответствии с (2), (3)

$$m = nL_m L_r^{-1} (L_m i_d - T_r \dot{\psi}_d) i_q. \quad (5)$$

Основной проблемой, стоящей на пути оптимизации системы в динамических режимах, является большая постоянная времени T_r в (3) и (5). С целью ее компенсации, а также компенсации влияния неопределенностей, за номинальный электромагнитный момент принимается

$$m_0 = nL_{m0} L_{r0}^{-1} i_d i_q. \quad (6)$$

В этом случае с учетом (4)–(6) уравнение (1) выглядит

$$I_0 \dot{\omega} = m_0 + f, \quad (7)$$

где неопределенность f

$$f := m_l + m_f - I_\delta \dot{\omega} + f_1 (L_{m\delta}, L_{r\delta}, T_r, \dot{\psi}_d, i_d, i_q). \quad (8)$$

Уравнение (7) представляет собой уравнение полностью детерминированного объекта с номинальными параметрами, подверженного действию суммарной неопределенности f . Из (7) следует

$$f = I_0 \dot{\omega} - m_0. \quad (9)$$

Будем полагать быстродействие наблюдателя, оценивающего f , настолько большим, что в масштабе времени наблюдателя можно считать

$$\dot{f} = 0. \quad (10)$$

При условии, что имеется информация о i_d, i_q, ω , выражение (9) на языке динамических фильтров можно рассматривать как измерение для процесса (10). Тогда по уравнениям (9), (10) можно построить наблюдатель для оценки f в виде [1]

$$\dot{z} = L_M (\hat{f} + m_0) \quad (11)$$

$$\hat{f} = z - L_M I_0 \omega, \quad (12)$$

где L_M – коэффициент усиления наблюдателя. Зная \hat{f} , в соответствии с (7), закону управления следует придать вид

$$m_0 = m_{00} - \hat{f}. \quad (13)$$

Подстановка (13) в (7) дает уравнение

$$I_0 \dot{\omega} = m_{00} + (f - \hat{f}). \quad (14)$$

При точной работе наблюдателя $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{f} = f$. В этом случае уравнение (14) принимает вид

$$I_0 \dot{\omega} = m_{00}. \quad (15)$$

Пусть требуется отслеживать заданную (программную) траекторию ω_p . Положим

$$m_{00} = -k_M (\omega - \omega_p) + I_0 \dot{\omega}_p. \quad (16)$$

где k_M – коэффициент усиления регулятора момента. Подстановка (16) в (15) порождает уравнение

$$I_0 (\dot{\omega} - \dot{\omega}_p) + k_M (\omega - \omega_p) = 0. \quad (17)$$

При $k_M > 0$ (I_0 всегда больше нуля) имеет место асимптотическая устойчивость нулевого решения уравнения (17), следовательно, при $t \rightarrow \infty$ $\omega \rightarrow \omega_p$. Качество переходного процесса определяется параметрами I_0 и k_M . Решение уравнения (17) имеет вид

$$\omega - \omega_p = [\omega(0) - \omega_p(0)] \exp(-k_M t / I_0). \quad (18)$$

Система (11), (12) составляет наблюдатель, дающий оценку неопределенности f , а выражения (13), (16) – закон управления. Следует обратить внимание на то, что переходный процесс в (18) не зависит ни от одной из перечисленных выше неопределенностей, включенных в (8), в том числе, и от инерционности процессов в магнитной цепи. Если в L_{m0}, L_{r0} не учтены эффекты магнитного насыщения, то управление оказывается робастным также к магнитному насыщению.

2.2. Регулятор токов [1]. Рассматривается система уравнений токового контура, записанная в векторной форме, которая может быть приведена к виду

$$p i = -\frac{1}{T_{s0}'} i + k_T (u + f), \quad (19)$$

$$k_T = (\sigma L_{s0})^{-1}, \quad T_{s0}' = \sigma \frac{L_{s0}}{R_{s0}}, \quad (20)$$

$$f = f(e, \omega_0, L_s, i, R_{s\delta}), \quad (21)$$

где $f = [f_d, f_q]^T$ – вектор неопределенностей, куда включены ЭДС, перекрёстные связи между контурами токов, погрешности, обусловленные отклонением параметров от их номинальных значений, T_{s0}' – постоянные времени статорных цепей, $i = [i_d, i_q]^T$ – вектор токов, $u = [\dot{u}_d, \dot{u}_q]$ – вектор программных напряжений, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ – коэффициент рассеивания, e

– вектор противоЭДС, k_T – коэффициент усиления регулятора тока, p – символ дифференцирования.

Для каждого контура тока строится независимый компенсатор. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться скалярное уравнение тока, по форме совпадающее с (19). В соответствии с уравнением (19) неопределенность f определяется выражением

$$f = k_T^{-1} p i + (k_T T'_{s0})^{-1} i - u. \quad (22)$$

Для устранения необходимости дифференцировать ток построим наблюдатель для оценки f . При этом быстрое действие наблюдателя сделаем настолько большим, чтобы можно было полагать $\dot{f} = 0$. Наблюдатель будет иметь вид

$$p \hat{f} = l_T (\hat{f} - f), \quad (23)$$

где l_T – коэффициент усиления наблюдателя. Подстановка в (23) вместо f выражения (22) дает

$$p \hat{f} = l_T \left[\hat{f} - k_T^{-1} p i - (k_T T'_{s0})^{-1} i + u \right]. \quad (24)$$

Правая часть выражения (2.90) содержит дифференцирование. Для его устранения введем обозначение

$$z = \hat{f} + l_T k_T^{-1} i, \quad (25)$$

откуда

$$\hat{f} = z - l_T k_T^{-1} i. \quad (26)$$

Подстановка (26) в (24) дает уравнение

$$\dot{z} = l_T \left[z - i k_T^{-1} \left((T'_{s0})^{-1} + l \right) + u \right]. \quad (27)$$

Регулятор контура тока представляется в виде

$$u = q(i_p - i) - \hat{f} + p i_p - \frac{1}{T'_{s0}} i_p, \quad (28)$$

где q – постоянный коэффициент. Подстановка (28) в (19) дает

$$p(i - i_p) = -\frac{1}{T'_{s0}} (i - i_p) + k_T \left(q(i_p - i) - \hat{f} + f \right), \quad (29)$$

Моделирование процессов с участием контуров тока проводится по зависимостям (26) – (29).

Разработаны также методы оценки в реальном времени сопротивлений ротора и статора. Оценка сопротивления статора по предложенному методу позволяет избавиться от необходимости измерения выходных напряжений ПЧ, а использовать вместо них управляющие сигналы блока ШИМ. Разработанный алгоритм вместо оценки сопротивления статора АД оценивает сумму сопротивлений статора, кабеля, эквивалентного сопротивления блока ШИМ, включающим в себя сопротивления транзисторов и фиктивные сопротивления, учитывающие влияние запаздывания при открытии и закрытии транзисторов ШИМ, и «мертвое» время в нем.

3. Оптимизатор. По аналогии с работами [5 – 7] вводится замена переменных

$$i_{dp} = k \sqrt{\frac{|m_p|}{nL_\Sigma}}, \quad i_{qp} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{|m_p|}{nL_\Sigma}} \text{sign}(m_p), \quad (30)$$

где $L_\Sigma = L_m^2 L_r^{-1}$; $k > 0$ – искомым оптимизирующий коэффициент связи токов статора, с помощью которого можно задать любое соотношение между токами

i_{dp} , i_{qp} . Справедливость данной замены подтверждается подстановкой выражения (30) в уравнение электромагнитного момента (6), что дает тождество. Такая замена позволяет при заданном электромагнитном моменте проводить минимизацию потерь мощности, варьируя не двумя переменными i_{dp} , i_{qp} , а одной переменной k . Основным потребителем электроэнергии в АЭП является АД. В работе [6, 7] использовано следующее выражение потребляемой мощности АД:

$$P = \frac{1}{2} \sigma L_s \frac{d}{dt} (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + R_s (i_{dp}^2 + i_{qp}^2) + R_r L_{mr}^2 i_{qp}^2 + \omega m_p + L_{mr} i_{dp} \dot{\psi}_d + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \left(\left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 i_{qp}^2 + i_{dp}^2 \right), \quad (31)$$

где первое слагаемое представляет собой потери рассеяния, второе и третье – потери мощности на нагрев соответственно в обмотках статора (с учетом ПЧ) и ротора (потери в меди), четвертое слагаемое является полезной механической мощностью, пятое слагаемое – мощность магнитных полей машины, шестое – потери в стали АД, L_{lr} – индуктивность рассеивания ротора.

Подстановка токов статора (30) в выражение (31) в установившемся режиме дает

$$P = \frac{|m_p|}{nL_\Sigma} \left[R_s (k^2 + k^{-2}) + R_r L_{mr}^2 k^{-2} + \omega n L_\Sigma \text{sign}(m_p) + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \left(\left(\frac{L_{lr}}{L_r} \right)^2 k^{-2} + k^2 \right) \right]. \quad (32)$$

Значение оптимального коэффициента токов статора k , при котором потребляемая мощность будет минимальной, определяется выражением [6]

$$k = \sqrt[4]{\left(R_s + R_r L_{mr}^2 + \frac{\omega_0^2 L_m^2 L_{lr}^2}{L_r^2 R_m} \right) / \left(R_s + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \right)}. \quad (33)$$

4. Результаты моделирования. На рис. 2 приведены графики моделирования разгона АЭП с управлением по предлагаемому методу (кривые показаны сплошной линией). Расчет проводился для трехфазного АД 4А100L2У3 с параметрами, приведенными в табл. 1. Момент нагрузки принят равным номинальному (18 Нм). Для сравнения на рис. 2 построены аналогичные графики, полученные для метода максимизации отношения «момент-ток» (кривые показаны штрихпунктирной линией) [11]. Отметим, что для предлагаемого метода при низких скоростях коэффициент связи токов статора $k \geq 1$, $i_d \geq i_q$, что обеспечивает низкий уровень потерь в меди. При росте скорости значение k уменьшается, вследствие чего становится $i_d < i_q$, следовательно, обеспечивается автоматическое уменьшение уровня магнитного потока, и уменьшение потерь в стали. Как следует из рис. 2, г, применение предложенного метода оптимального управления позволяет уменьшить потери мощности АЭП на 20 % по сравнению с методом максимизации отношения «момент-ток».

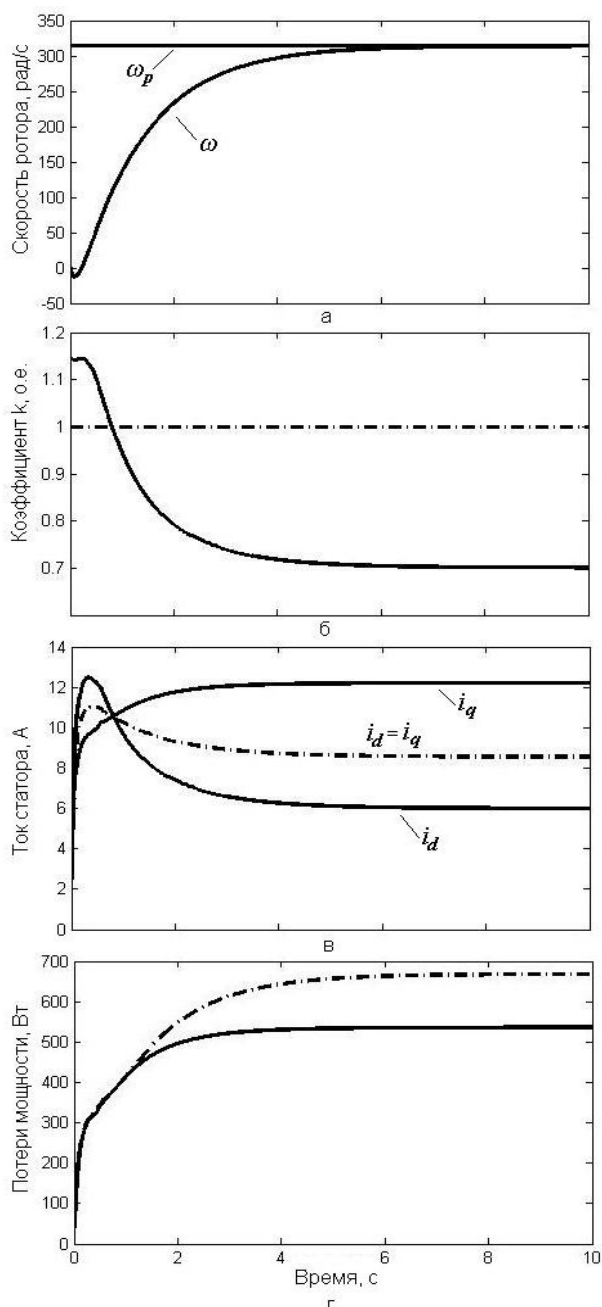


Рис. 2. Результаты моделирования

1 Основные параметры двигателя 4A100L2У3

$P_n = 5,5 \text{ кВт}$	$R_s = 1,05 \text{ Ом}$	$L_m = 0,25 \text{ Гн}$
$n_n = 3000 \text{ об/мин}$	$R_r = 0,77 \text{ Ом}$	$L_s = 0,254 \text{ Гн}$
$n = 1$	$R_m = 1000 \text{ Ом}$	$L_r = 0,254 \text{ Гн}$

Выводы. Обобщены и представлены результаты исследований, направленных на создание высокоточных энергооптимальных робастных асинхронных электроприводов при недостижении ограничений статорного тока и напряжения. Алгоритмы управления синтезированы с помощью современной теории автоматического управления, а именно, с использованием робастных наблюдателей и регуляторов, а также синтезированного авторами оптимизатора, позволяющего формировать заданный электромагнитный момент с минимальными

потерями активной мощности. Математическое моделирование подтвердило работоспособность и реализуемость предлагаемого метода управления. Сравнение потерь потребляемых активных мощностей при предлагаемом управлении с потерями при широко распространенном управлении с оптимизатором типа «момент/ток» показало существенное снижение потерь при предлагаемом управлении. В данной работе предполагается, что токи и (или) напряжения не достигают их ограничений. Оптимизация при действии ограничений рассмотрена в работе [7]. Особо следует отметить, что предлагаемая оптимизация осуществляется в реальном времени.

Авторы статьи готовы принять участие в создании реальных асинхронных производственных и транспортных электроприводов в части разработки, отладки и сдачи в эксплуатацию методов управления, а также в модернизации работающих электроприводов.

Список использованной литературы

1. Потапенко Е. М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко. – Запорожье : ЗНТУ. – 2009. – 352 с.
2. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; под ред. И. Я. Браславского. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
3. Поляков В. Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер; под ред. Р. Т. Шрейнера. – Екатеринбург : ФГАОУ ВПО, «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. – 222 с.
4. Овсянников Е. М. Управление тяговым асинхронным электроприводом гибридных автомобилей по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности / Е. М. Овсянников, Нгуен Куанг Тхиеу, Нгуен Хак Туан // Сб. научн. тр. 65-й межд. научно-технич. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». – М. : МАМИ, 2009.
5. Потапенко Е. М. Оптимальное широкодиапазонное управление скоростью асинхронного электропривода / Е. М. Потапенко, А. А. Шийка // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу* – Кременчук : КрНУ. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 298 – 301.
6. Шийка А. А. Робастное управление асинхронным электроприводом с минимизацией потерь мощности в реальном времени / А. А. Шийка, Е. М. Потапенко // *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Збірник наукових праць. Серія : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків : НТУ «ХП». – 2013. – № 36 (1009). – С. 106 – 109
7. Шийка А. А. Оптимальное управление асинхронным электроприводом по критерию максимума

электромагнитного момента / А. А. Шийка // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наук. Видання. – Кременчук : – 2014. – КрНУ., – Вип. 1/2014 (2). – С. 56 – 58.

8. Шийка А. А. Энергооптимальное управление асинхронным электроприводом с минимизацией реактивной мощности / А. А. Шийка, Е. М. Потапенко // Электротехнические и компьютерные системы. – К. : Техника. – 2014 – № 15 (91).

9. Душинова Е. В. Оценка сопротивлений статора и ротора асинхронного привода / Е. В. Душинова, Е. М. Потапенко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ. – 2011. – Вип. 1(1). – С. 130 – 131.

10. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

11. Пересада С. М. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток / С. М. Пересада, С. С. Дымко // Электротехнические и компьютерные системы. – К. : Техника. – 2011. – № 03 (79). – С. 28 – 31.

12. Novotny D.W., and Lipo T.A., (1996), Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press, Oxford, UK.

Получено 13.07.2014

References

1. Potapenko E.M., and Potapenko E.E, Robustnie algoritmi upravleniya asinhronnim privodom [Robust Algorithms of Vector Control of Induction Drive], (2009), ZNTU, Zaporizhzhya, Ukraine, 352 p (In Russian).

2. Braslavskiy I.Y., Ishmatov Z.S., and Polyakov V.N. Energoberegayushiy asinhrinnyy electroprivod [Energy-Saving Induction Drive], (2004), Moscow, Russian Federation, *Akademiya Publ.*, 256 p. (In Russian).

3. Polyakov V.N., and Shreiner R.T. Energoeffektivniye regimi reguliruemich electroprivodov peremennogo toka [Energy Effective Modes of Regulated Induction Drive], (2012), FGAOU BPO Russian State Professional-Pedagogical University, 222 p. (In Russian).

4. Ovsyannikov E.M., Nguen K.T., and Nguen X.T. Upravlenie tyagoviy'm asinhronnim electroprivodom gibridny'h avtomobiley po minimumu poter' i maksimumu peregrusochnoy sposobnosti. [Loss-Minimising and Maximum Torque Capability Control of Traction Induction Drive], (2009), *Materialu 65-y Mezhd. Nauchn.-Techn. Konf. Assotsiatsii Avtomobil'nich Inzhenerov (AAI) "Priority Rasvitiya Otechestvennogo Avtotractorosroeniya i Podgotovki Ingenernich i Nauchnich Kadrov"*, Moscow, Russian Federation, pp. 120 – 129 (In Russian).

5. Potapenko E.M., and Shiyka A.A. Optimalnoe shirokodiapazonnoe upravlenie skorostyu asinhronnogo electroprivoda [Optimal Wide-Speed Control of Induction Motor Drive], (2012), *Electromechanichni i Energozberigayuchi Sistemi*, Kremenchuk, KrNU, Ukraine, Vol 3/2012 (19), pp. 298 – 301 (In Russian)

6. Shiyka A.A., and Potapenko E.M. Robastnoe upravlenie asinhronnim electroprivodom z minimizatsiey poter' moschnosti v real'nom vremeni [Robust Loss-Minimising Real-Time Control of Induction Motor Drive], (2013), *Vistnik Natsional'nogo Technichnogo Universitetu "KhPI"*, Kharkiv, Ukraine, NTU HPI, Vol No. 36 (1009), pp. 106 – 109 (In Russian).

7. Shiyka A.A. Optimalnoe upravlenie asinhronnim electroprivodom po kriteriu maksimuma electromagnitnogo momenta [Torque-Maximizing Optimal Control of Induction Drive], (2014), *Problemi Enegroresurso Zberegennya v Electrotechnichnuh Sistemah. Nauka, Teoriya i Practika*, Kremenchuk, Ukraine, KrNU, Vol 1/2014(2), pp. 56 – 58 (In Russian).

8. Shiyka A.A., and Potapenko E.M. Energoopmalnoe upravlenie asinhronnim electroprivodom z minimizatsiey reaktivnoy moschnosti [Energyoptimal Control of Induction Drive with Reactive Power Minimization] (2014), *Electotexnicheskie and Komp'yuternye e Sistemy'*, Kiev, Ukraine, *Technika*, Vol. 15 (91) (In Russian).

9. Dushinova E.V., and Potapenko E.M. Otsenka soprotivleniya statora i rotora asinhronnogo privoda [Stator and Rotor Resistance Identification of Induction Drive], (2011), *Vistnik Kremenchudskogo Dergavnogo Universitetu im. M. Ostragradskogo*, Kremenchuk, Ukraine, KrNU, Vol 1 (1). pp. 130 – 131 (In Russian).

10. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie electroprivodami peremennogo toka [Vector Control of AC Drive], (2008), GOUVPO Ivanovsky State Power University im. V.I. Lenina, Ivanovo, Russian Federation, 98 p. (In Russian).

11. Peresada S., and Dymko S. Pryamoe vektornoe upravlenie momentom asinhrinnyh dvigateley s maksimizatsiey sootnosheniya moment-tok [Direct Torque Vector Control of Induction Machine with Maximum Torque-Current Capability], (2011), *Electotexnicheskie and Komp'yuternye e Sistemy'*, Kiev, Ukraine, *Technika*, No. 03 (79), pp. 28 – 31 (In Russian).

12. Novotny D.W., and Lipo T.A., (1996), Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press, Oxford, UK.



Потапенко

Евгений Михайлович, д-р техн. наук, проф. каф. электропривода и автоматизации Запорожского нац. технического ун-та. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, д. 64, тел. +38(097) 405 93 89. E-mail: kofey@ukr.net.



Шийка

Андрей Андреевич, аспирант каф. электропривода и автоматизации Запорожского нац. технического ун-та. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, д. 64, г, тел. +38 (066) 900 34 20. E-mail: AndreyShiyka@gmail.com