

УДК 621.313

**Борисевич Алексей Валерьевич**

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
Институт металлургии, машиностроения и транспорта  
Россия, Санкт-Петербург<sup>1</sup>  
Доцент кафедры «Автоматы»  
Кандидат технических наук  
E-Mail: [alex.borysevych@gmail.com](mailto:alex.borysevych@gmail.com)

## **Практический алгоритм численного поиска для минимизации мощности потерь асинхронного электродвигателя**

**Аннотация:** Асинхронные электродвигатели доминируют в мировой структуре потребления электроэнергии, поэтому разработка и внедрение энергоэффективного электропривода всегда экономически оправдана и актуальна в условиях увеличения стоимости энергоносителей. Целью настоящей статьи является разработка метода прямого численного поиска минимума энергопотребления электродвигателя, который бы обладал достаточной концептуальной и вычислительной простотой для реализации на основе микропроцессоров общего назначения. В статье предложена стратегия оптимизации мощности потерь в обмотках электродвигателя, работающего в установившемся режиме от частотного преобразователя с векторным управлением. Метод является обобщением алгоритма монотонного изменения уставки тока намагничивания. Существенным отличием предложенного метода является использование предкомпенсации уставки и зависимость производной по времени тока намагничивания от скорости изменения мощности потерь. Непрерывная траектория оптимизируемой величины исключает возмущения выходного электромагнитного момента двигателя. Метод использует значения сопротивлений статора и ротора в качестве параметров, которые значительно менее подвержены вариации при работе электродвигателя, чем индуктивности. Описано моделирование системы оптимизации в среде MATLAB/Simulink и эксперименты с реальным асинхронным электродвигателем. Результаты моделирования и экспериментов показали, что метод работоспособен и устойчив к шумам измерения.

**Ключевые слова:** Асинхронный электродвигатель; векторное управление; энергоэффективность электропривода; мощность потерь в обмотках; численная оптимизация; выбор тока намагничивания; монотонное изменение уставки; имитационное моделирование; Simulink; dSpace.

Идентификационный номер статьи в журнале 88TVN114

---

<sup>1</sup> 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.

**Aleksey Borisevich**  
St. Petersburg State Polytechnical University,  
Institute of Metallurgy, Mechanical engineering and Transport  
Russia, St.-Petersburg  
E-Mail: [alex.borysevych@gmail.com](mailto:alex.borysevych@gmail.com)

## **Practical numerical search algorithm for induction motor power losses minimization**

**Abstract:** Induction motors currently dominate in the structure of global energy consumption, thus the research and development of energy-efficient electric drive systems is always economically viable and relevant in conditions of energy cost increase. The purpose of this paper is to develop a method for determination the motor losses minimum in steady state by the direct numerical search. New method should have sufficient computational and conceptual simplicity for implementation on general-purpose microprocessors systems. Method proposed is a generalization of monotonic regulation algorithm for magnetizing current setpoint. The essential differences from the original algorithm are introduced precompensation of current setpoint and dependence of the magnetizing current time derivative from the power losses rate of change. Motor output torque ripple is prevented due to continuous optimization trajectory of current setpoint. The method relies on the values of the stator and rotor resistances, which are much less susceptible of variations during operation of the motor than the inductances. Simulation of the motor efficiency optimization in MATLAB/Simulink as well as experiments with a real induction motor is described. The results of simulations and experiments have shown the good performance of method and its resistance to measurement noise.

**Keywords:** Induction motor; field-oriented control; energy efficiency; electrical power losses; search controller; magnetizing current setpoint; monotonic setpoint change; simulation; Simulink; dSpace.

Identification number of article 88TVN114

## Введение

Электродвигатели – доминирующий класс потребителей электроэнергии в мире. Во многих применениях электродвигатель большую часть времени работает с нагрузкой, меньшей номинальной. При этом КПД двигателя оказывается существенно ниже, чем при номинальном моменте на валу [1]. Специальные стратегии скалярного и векторного управления позволяют достичь оптимума энергопотребления в различных условиях нагрузки электродвигателя. Обзор состояния зарубежных работ, посвященных этой проблеме, можно найти в [2–4]. Из последних отечественных публикаций можно привести исследования [5–7].

В настоящей статье рассматривается метод, относящийся к классу прямой численной минимизации в реальном времени (search controller) для оптимизации энергоэффективности электродвигателя. Метод изменяет уставку тока намагничивания  $i_{sd}$  в системе векторного управления электродвигателем. Предложенный алгоритм является обобщением достаточно известного [8] простого подхода монотонного изменения тока намагничивания (ramp method).

Описываемый метод существенно отличается от оригинального в следующем:

- в качестве целевой функции вместо активной потребляемой мощности используется оценка мощности потерь  $P_{loss}$ , вычисляемая на основе измеряемых токов статора  $i_{sd}$  и  $i_{sq}$ ,
- динамическая предкомпенсация уставки  $i_{sd}$  на основе форсирующего звена трансформирует задачу нестационарной оптимизации в поиск минимума статической (стационарной) функции,
- введена зависимость  $\dot{i}_{sd}$  от  $\dot{P}_{loss}$ , что увеличивает скорость сходимости метода по сравнению с прототипом,
- метод генерирует непрерывную траекторию уставки  $i_{sd}$ , что исключает возмущения электромагнитного момента двигателя.

Как и остальные методы прямой численной оптимизации, рассмотренный алгоритм не требуют точной модели двигателя, а за счет предложенных решений скорость сходимости сравнима с методами на основе модели мощности потерь и на практике составляет несколько секунд.

## 1. Предварительные сведения

### 1.1. Модель электродвигателя и мощности потерь

Рассмотрим модель двигателя на основе обратной Г-образной схемы замещения [9] с ориентацией оси  $d$  вращающейся системы координат параллельно потокоцеплению ротора  $\phi_r$ . В пространстве состояний, данная модель реализуется системой дифференциальных уравнения четвертого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_r &= -\frac{R_R}{L_M} \phi_r + i_{sd} R_R, \\ i_{sq} &= -\frac{\omega}{L_\sigma} \phi_r - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sq} - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sq} - i_{sd} \omega_s + \frac{u_{sq}}{L_\sigma}, \\ i_{sd} &= \frac{R_R}{L_M L_\sigma} \phi_r - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sd} - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sd} + i_{sq} \omega_s + \frac{u_{sd}}{L_\sigma}, \\ \dot{\omega} &= p \frac{p \phi_r i_{sq} - T_m}{J}. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega_s = \omega + \frac{R_R i_{sq}}{\phi_r}$  – синхронная скорость,  $\omega$  – скорость вращения вала двигателя (электрическая – т.е. механическая  $\omega_r$ , умноженная на число пар полюсов  $p$ ),  $T_e = p \phi_r i_{sq}$  – электромагнитный момент вращения, развиваемый двигателем. Параметры статора двигателя:  $R_s, L_\sigma$ , параметры ротора двигателя  $R_R, L_M$ .

Все напряжения и токи в модели (1) являются действующими значениями и полученными с помощью преобразований Кларка и Парка, инвариантных по мощности.

Во всей статье мы будем пренебрегать динамикой регуляторов тока статора  $i_{sd}$  и  $i_{sq}$ , полагая, что их быстродействие значительно выше, чем динамика потокоцепления и скорости. В таком случае, сокращенная модель двигателя может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_r &= -\frac{R_R}{L_M} \phi_r + i_{sd} R_R, \\ \dot{\omega} &= p \frac{p \phi_r i_{sq} - T_m}{J}. \end{aligned} \quad (2)$$

Пренебрегая регуляторами тока статора, в настоящей статье используется следующая аппроксимация мгновенной мощности потерь:

$$P_{loss}(t) = i_{sq}^2(t)(R_s + R_R) + i_{sd}^2(t)R_R, \quad (3)$$

где  $i_{sd}$  – уставка тока намагничивания и  $i_{sq}$  – значение квадратурного тока, который выдает ПИ-регулятор скорости.

В полностью установившемся режиме, мощность потерь выражается как

$$P_{loss}^{ss}(i_{sd}) = \left( \frac{T_m}{p L_M i_{sd}} \right)^2 (R_s + R_R) + i_{sd}^2 R_R. \quad (4)$$

Минимумом энергопотребления для функции качества  $P_{loss}^{ss}(i_{sd})$  достигается при уставке тока намагничивания:

$$i_{sd}^* = \sqrt{\frac{T_m}{L_M p}} \sqrt[4]{\frac{R_R + R_s}{R_s}}. \quad (5)$$

Заметим, что потери в сердечнике электродвигателя не учитываются, так как в области неполной нагрузки двигателя доминирующими являются тепловые потери в обмотках (3).

## 1. 2. Метод монотонного изменения уставки

Метод линейного (монотонного) изменения уставки (ramp method) является простейшим поисковым алгоритмом для минимизации мощности [8]. Предположим, что известно направление изменения  $i_{sd}$  для достижения оптимума. Эта информация может быть получена из анализа поведения  $i_{sq}(t)$  при последнем изменении нагрузки на валу: если новое установившееся значение  $i_{sq}$  больше предыдущего, то момент нагрузки  $T_m$  увеличился и оптимум  $i_{sd}^*$  для нового состояния будет больше предыдущего (поскольку,  $i_{sd}^* : T_m$  согласно (5)). Аналогично, если  $i_{sq}$  уменьшилось, то  $i_{sd}$  – тоже надо уменьшать.

В оригинальном описании [8] метод состоит из последовательности монотонных ступенчатых изменений уставки  $i_{sd}$  до тех пор, пока измеряемое значение мощности  $P_{in}$  не начнет увеличиваться. В варианте алгоритма, определенного в непрерывном времени, ступенчатое изменение может быть представлено как линейное нарастание или убывание, реализуемое интегрированием константы:

$$\dot{i}_{sd} = c, \quad (6)$$

до тех пор, пока выполняется

$$|\dot{P}_{in}| > \varepsilon, \quad (7)$$

где  $c = const$  – скорость изменения, знак которой зависит от направления поиска,  $\varepsilon > 0$  – значение производной  $\dot{P}_{in}$ , ниже которой поиск останавливается в предположении что  $P_{in}$  перестало уменьшаться, и достигнут минимум.

Выбор константы  $c$  зависит от двух очевидных идей: если значение  $c$  слишком мало, то метод сходится медленно; если значение  $c$ , наоборот, слишком велико, то мгновенное значение измеряемой мощности  $P_{in}(t)$  существенно отличается от установившегося значения при текущем  $i_{sd}(t)$  из-за внутренней динамики мощности потерь в двигателе, что приведет к неточному результату оптимизации.

## 2. Разработка метода

Первым главным отличием разработанного метода является то, что вместо активной потребляемой мощности  $P_{in} = i_{sq}u_{sq} + i_{sd}u_{sd}$  в качестве критерия оптимизации используется мощность потерь  $P_{loss}$ , вычисляемая по (3) на основе измеряемых  $i_{sq}$  и  $i_{sd}$ . Это вносит некоторую неточность моделирования, но при этом случайный шум измерения в  $P_{loss}$  заметно меньше, чем в  $P_{in}$ .

### 2. 1. Предкомпенсация уставки тока намагничивания

В методах прямого поиска необходимым является знание установившейся мощности  $P_{loss}^{ss}(i_{sd})$  для заданного значения  $i_{sd}$ . Но при изменении  $i_{sd}$  в соответствии с некоторой траекторией поиска  $i_{sd}(t)$ , в каждый момент времени получается значение мгновенной мощности  $P_{loss}(t)$ , которая, очевидно, отличается от  $P_{loss}^{ss}(i_{sd})$ . Основное решение в данной ситуации: изменить и зафиксировать  $i_{sd}$ , подождать некоторое время, пока значения токов

установятся, и только тогда измерить  $P_{loss}$ . Такой подход существенно ограничивает быстродействие методов поисковой оптимизации. Далее мы предложим схему предварительной компенсации уставки  $i_{sd}$ , которая позволяет оценить установившееся значение  $P_{loss}^{ss}(i_{sd})$  для мгновенного значения  $i_{sd}$  без ожидания установившегося состояния электродвигателя.

Предположим, что ПИ-регулятор скорости обладает достаточным быстродействием, чтобы противодействовать возмущениям механического момента нагрузки на валу  $T_m$ . Как следствие, ошибка регулирования скорости  $\omega_r$  очень мала при изменениях  $T_m$  и  $\phi_r$ . В таком случае, можно пренебречь динамикой ПИ-регулятора скорости, полагая, что значение тока  $i_{sq}$  на его выходе обеспечивает постоянство электромагнитного момента  $T_e(t) = T_m(t)$ :

$$i_{sq}(t) = \frac{T_m}{p\phi_r(t)}. \quad (8)$$

Отсюда получается мгновенное значение мощности потерь с близким к идеальному регулятором скорости:

$$P_{loss}(t) = \left( \frac{T_m}{p\phi_r(t)} \right)^2 (R_s + R_R) + i_{sd}^2(t)R_R. \quad (9)$$

Рассмотрим следующую компенсацию уставки  $i_{sd}$  с помощью фильтра высоких частот (в операторной форме):

$$i_{sd}(s) := \frac{\tau_R s + 1}{s} \cdot s\xi(s) = \dot{\xi}\tau_R + \xi, \quad (10)$$

где  $\xi$  – новая промежуточная переменная,  $s = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа.

Подстановка (10) в уравнение для магнитного потока ротора  $\phi_r$  из (??) дает

$$\phi_r(s) = \frac{L_M}{\tau_R s + 1} \cdot \frac{\tau_R s + 1}{s} \cdot s\xi(s) = L_M \xi(s), \quad (11)$$

Если следующие начальные условия выполняются  $\xi(0) = i_{sd}(0)$ ,  $\dot{\xi}(0) = 0$  с самого начала, то всюду далее  $\phi_r(t) = L_M \xi(t)$  и мощность потерь преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{loss} &= \left( \frac{T_m}{sL_M \xi} \right)^2 (R_s + R_R) + (\dot{\xi}\tau_R + \xi)^2 R_R = \\ &= \left( \frac{T_m}{sL_M \xi} \right)^2 (R_s + R_R) + \xi^2 R_R + (2\xi\dot{\xi}\tau_R + (\dot{\xi})^2 \tau_R^2) R_R = \\ &= P_{loss}^{ss}(\xi) + (2\xi\dot{\xi}\tau_R + (\dot{\xi})^2 \tau_R^2) R_R. \end{aligned} \quad (12)$$

В результате, получается однозначная функция  $P_{loss}^{ss}(\xi)$ , выражающая установившуюся мощность потерь для значения  $\xi$  тока намагничивания

$$P_{loss}^{ss}(\xi) = P_{loss} - (2\xi\dot{\xi}\tau_R + (\dot{\xi})^2\tau_R^2)R_R = \\ = i_{sq}^2(t)(R_s + R_R) + \xi^2(t)R_s. \quad (13)$$

Полученный механизм можно проинтерпретировать следующим образом: при изменении  $\xi$  согласно некоторой траектории  $\xi(t)$ , значение  $P_{loss}^{ss}(\xi)$ , вычисленное по (13), выражает установившуюся мощность потерь для тока намагничивания  $i_{sd}(t)$ , равного значению  $\dot{\xi}\tau_R + \xi$  в момент  $t$ .

## 2. 2. Модификация метода линейного изменения уставки

Резюмируя механизм компенсации, получается следующий вариант алгоритм линейного изменения уставки:

- вычислять  $i_{sd}(t) := \dot{\xi}(t)\tau_R + \xi(t)$ , где сигнал  $\xi(t)$  – линейно нарастающей формы, согласно (6),
- вычислять для каждого момента времени  $P_{loss}^{ss}(\xi)$  по формуле (13) и производную по времени  $\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$  (численно, с помощью фильтра высоких частот),
- если  $|\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)| < \varepsilon$  для текущего значения  $\xi(t)$ , то  $\xi$  – оптимальное значение тока намагничивания  $i_{sd}$ , и мы получаем  $i_{sd}^* := \xi$ , поиск заканчивается.

Линейно изменяющийся сигнал, определяемый как  $\xi(t) = \xi(0) + \dot{\xi}t$  ( $\dot{\xi} = c = const$ ), очевидно не является оптимальной траекторией поиска. Легко заметить, что  $\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi) = 0$  при оптимальном  $\xi$ , а также значение  $\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$  мало около оптимальной точки  $\xi$ . Отсюда, при изменении  $\xi$  в направлении оптимума (направлении уменьшения  $P_{loss}^{ss}(\xi)$ ), скорость изменения  $\xi$  может быть установлена пропорционально  $-\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$ . Таким образом, можно предложить модифицированную траекторию поиска:

$$\xi = \int_0^t c dt \Rightarrow \xi = -c' \int_0^t \dot{P}_{loss}^{ss}(\xi) dt, \quad (14)$$

где  $-\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$  выступает как форсирующий множитель, а знак  $c'$  выбирается точно также как и для  $c$  (для обеспечения правильного направления оптимизации).

Для безусловного увеличения скорости сходимости метода оба подхода (исходный и модифицированный) могут быть объединены в одном правиле изменения переменной  $\xi$ :

$$\xi = \int_0^t \max\{c, -c'\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)\} dt. \quad (15)$$

В принципе, можно упростить компонент  $\int_0^t \dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$  формулы (15) до выражения  $P_{loss}^{ss}(\xi(t)) - P_{loss}^{ss}(\xi(0))$ , но значение  $\dot{\xi}$  все равно необходимо для предкомпенсации (10), и для однообразия мы будем записывать правило обновления в форме (15).

Следует заметить, что в практическом применении  $\dot{\xi}(t) = \max\{c, -c'\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)\}$  должно быть пропущено через фильтр низких частот. Это делается поскольку, согласно механизму предкомпенсации  $i_{sd}(t) = \dot{\xi}(t)\tau_R + \xi(t)$  и скачок  $\dot{\xi}(t)$  в самом начале и конце оптимизации – при старте и остановке изменения  $\xi(t)$  – приведет к скачку  $i_{sd}(t)$ , что нежелательно для предотвращения возмущений выходного электромагнитного момента двигателя. Поскольку значение  $\dot{P}_{loss}^{ss}(\xi)$  вычисляется с помощью фильтра высоких частот, имеющего конечную полосу пропускания, то скорость изменения уставки  $\dot{\xi}(t)$  также имеет смысл ограничить сверху некоторым значением  $c_{max}$  для предотвращения перерегулирования мощности.

### 3. Численные результаты

#### 3.1. Моделирование

Для верификации предложенного алгоритма было проведено моделирование в среде MATLAB/Simulink. Структура разработанной модели показана на рисунке 1.

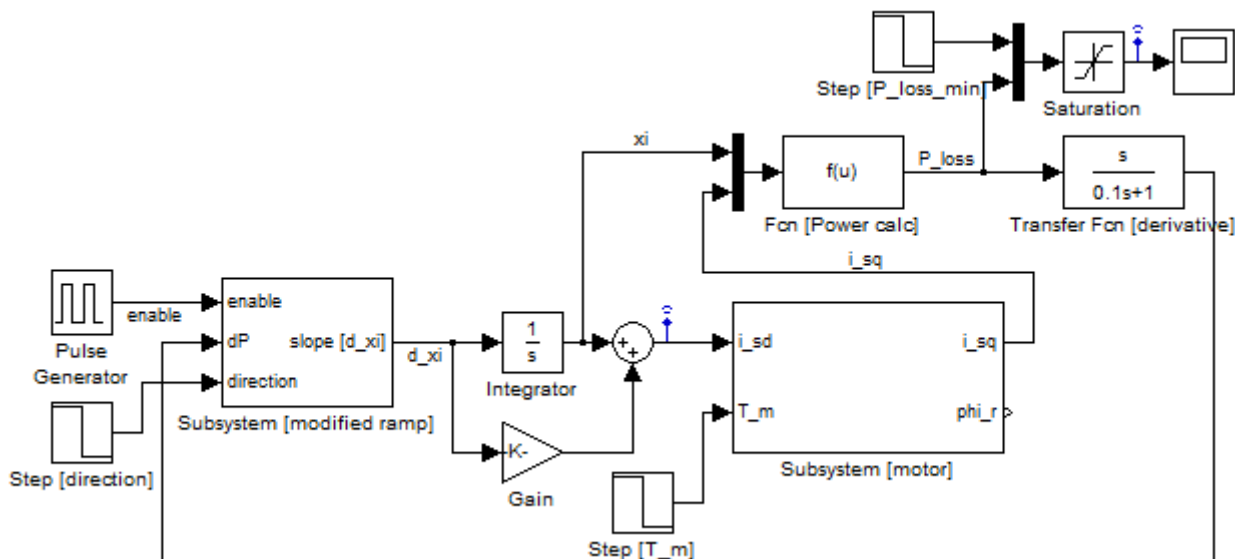
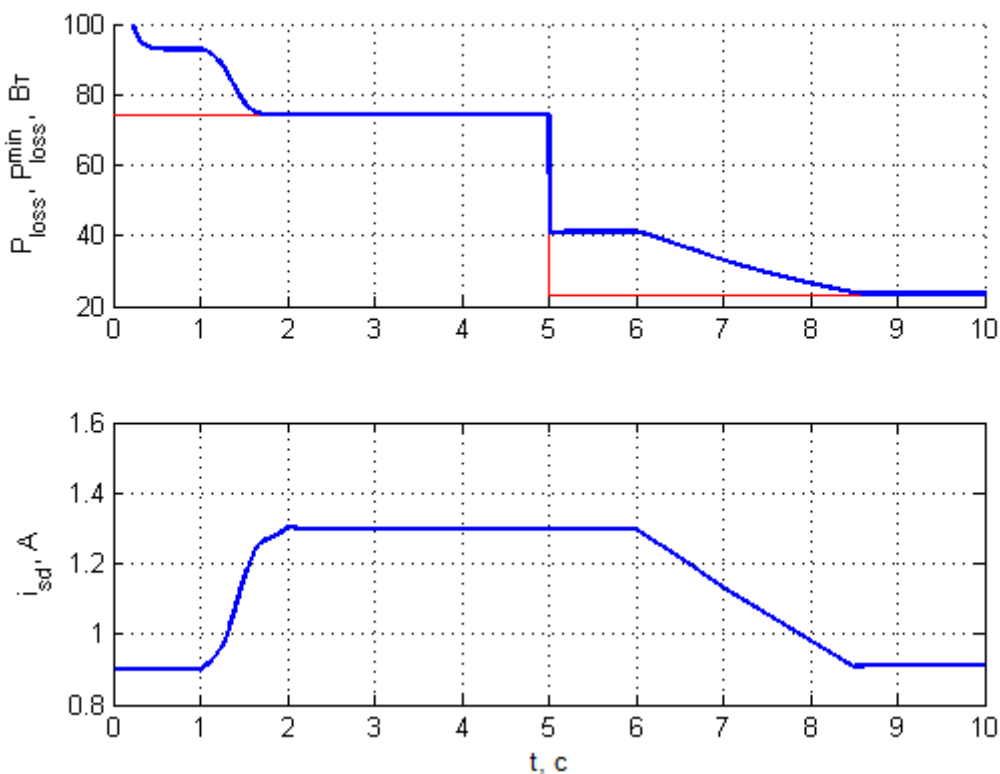


Рис. 1. Модель алгоритма оптимизации

Модель электродвигателя (?) была реализована внутри подсистемы Subsystem [motor]. Параметры модели соответствуют двигателю DRS71S4 производства SEW-Eurodrive номинальной мощностью 0.37 кВт. Алгоритм оптимизации реализован как дискретная система с помощью блоков MATLAB Function и Unit Delay. Параметры алгоритма выбраны следующим образом:  $c = 0.15$ ,  $c' = 0.02$ ,  $\varepsilon = 0.5$ ,  $t_0 = 0.2$ , где  $t_0$  – время от начала оптимизации, после которого включается проверка условия окончания алгоритма (для предотвращения преждевременной остановки).

При моделировании рассматривалось два случая: когда  $T_m = T_m^{nom}$  и когда двигатель работает не на полной нагрузке  $T_m = 0.25T_m^{nom}$ , где  $T_m^{nom}$  – номинальный момент двигателя (2.6 Нм). Начальным током намагничивания для моделирования выбрано его оптимальное значение для момента  $T_m = 0.25T_m^{nom}$ .





**Рис. 2.** Динамика мощности потерь и тока намагничивания

Результаты моделирования приведены на рисунке 2. Аналитически рассчитанное минимальное значение мощности потерь  $P_{loss}^{min}$  показано тонкими горизонтальными линиями.

Моделирование подтверждает, что метод сходится практически к оптимальному значению тока намагничивания, а скорость сходимости выше, чем для исходного алгоритма линейного изменения уставки (но не во всех случаях, что зависит от крутизны функции  $P_{loss}^{ss}(\xi)$ ).

### Аппаратная реализация и эксперимент

В качестве платформы для аппаратной реализации использовался контроллер dSPACE с платой управления двигателями DS5202. Данная платформа представляет собой систему из процессора цифровой обработки сигналов и программируемой логической интегральной схемы [10]. Платформа оснащена программным обеспечением для запуска программного кода, автоматически сгенерированного из моделей MATLAB Simulink. В результате, алгоритмы управления, реализованные как модели в Simulink, могут быть экспериментально протестированы с реальным асинхронным двигателем практически без их изменения. В качестве силовой части использовался модифицированный модуль SEW-Eurodrive MoviAxis, сигналы ШИМ на который подавались непосредственно из контроллера dSPACE.

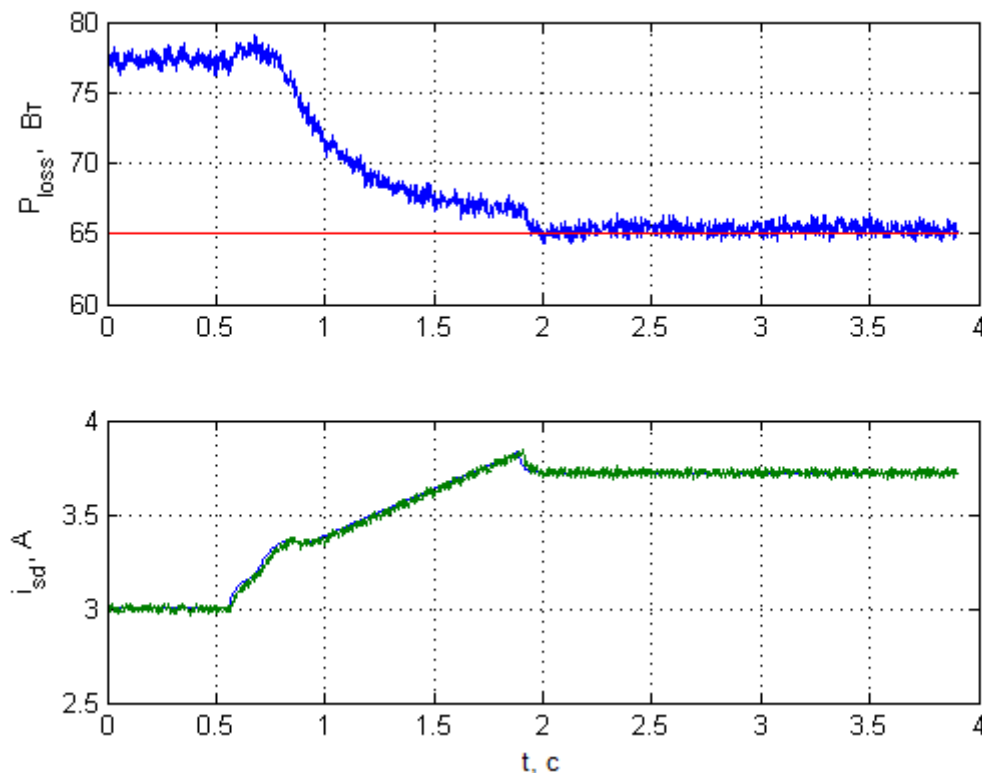
В дополнение к модели поискового алгоритма, рассмотренной в предыдущем параграфе, было реализовано также векторное управление электродвигателем с ориентацией по полю ротора.

Экспериментальная установка состояла из двигателя DRS112M4 производства SEW-Eurodrive номинальной мощностью 4 кВт (26.6 Нм номинальный момент), который был связан валом с управляемой нагрузочной машиной.

Для алгоритма оптимизации использовались следующие параметры:  $c = 0.5$ ,  $c' = 0.015$ ,  $\varepsilon = 2$ ,  $t_0 = 0.5$ . Для уменьшения шумов оптимизируемой функции, результаты измерения тока  $i_{sq}$  перед вычислением (13) пропускались через фильтр Баттерворта с частотой среза  $f_c = 2$  Гц.

Электродвигатель был введен в непрерывное вращение с помощью векторного управления для стабилизации скорости  $\omega = 100$  рад/сек. Два значения механической нагрузки были протестированы:  $T_m = 13.6$  Нм (примерно 50 % от номинального момента) и  $T_m = 6.8$  Нм (25 % от номинального момента).

Переходные процессы мощности потерь при активации алгоритма оптимизации представлены на рисунках 3 – 6.



**Рис. 3.** Динамика мощности потерь  $P_{loss}$  и тока намагничивания  $i_{sd}$  для момента  $T_m = 6.8$  Нм (начальное значение  $i_{sd}$  меньше оптимального)

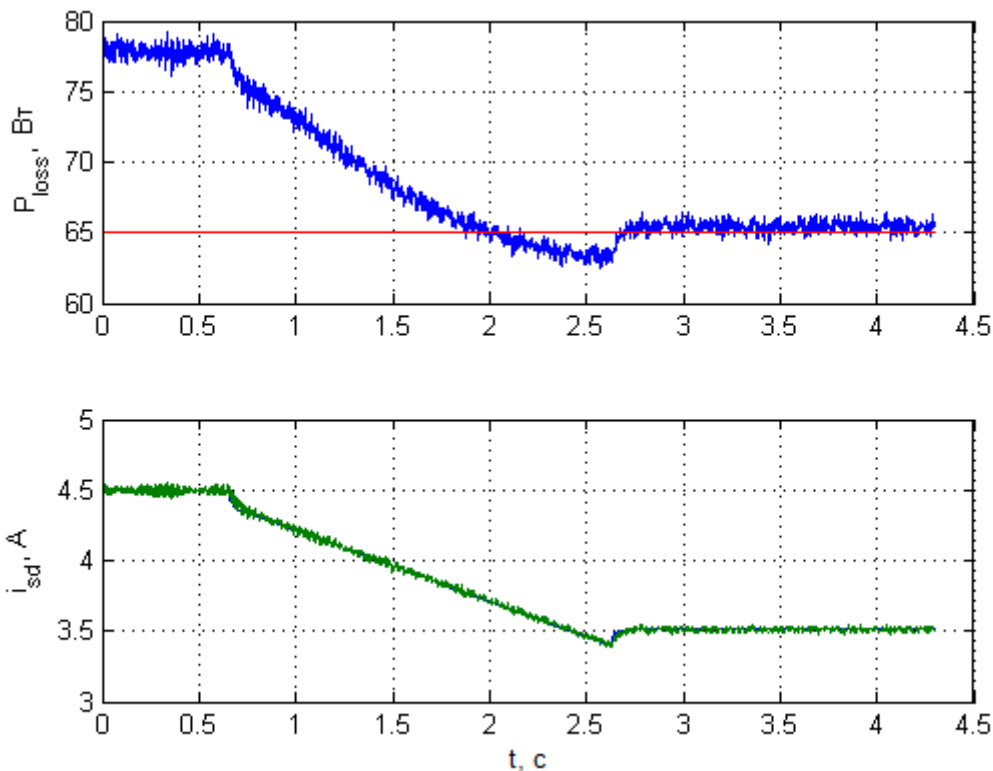


Рис. 4. Динамика мощности потерь  $P_{loss}$  и тока намагничивания  $i_{sd}$  для момента  $T_m = 6.8$  Нм (начальное значение  $i_{sd}$  больше оптимального).

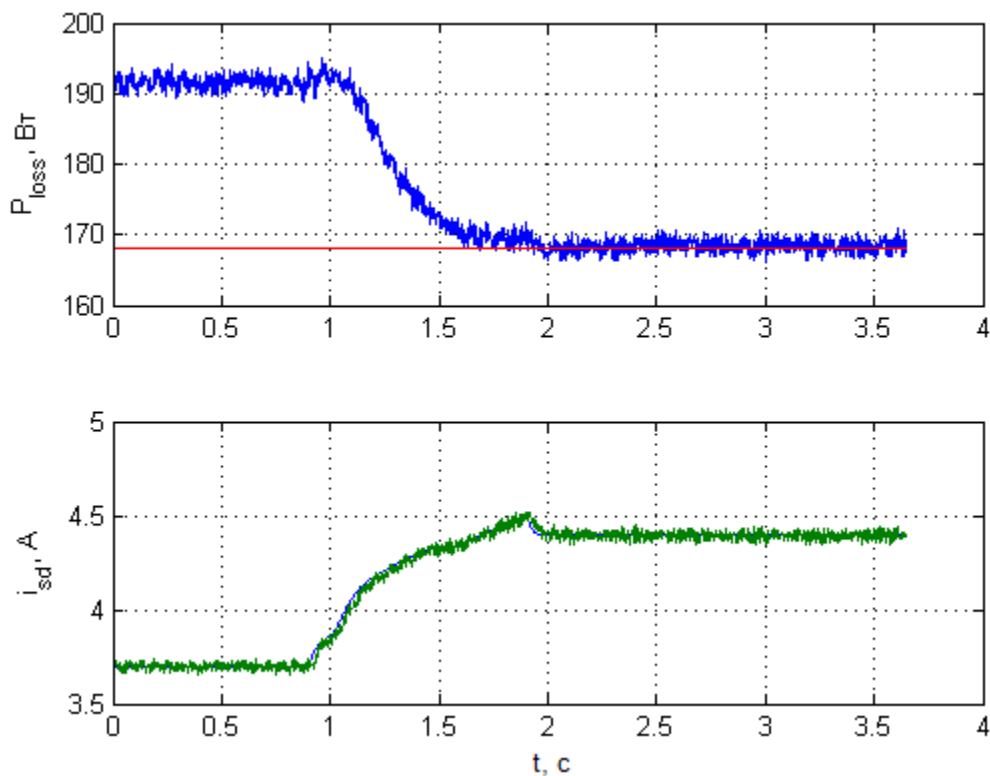
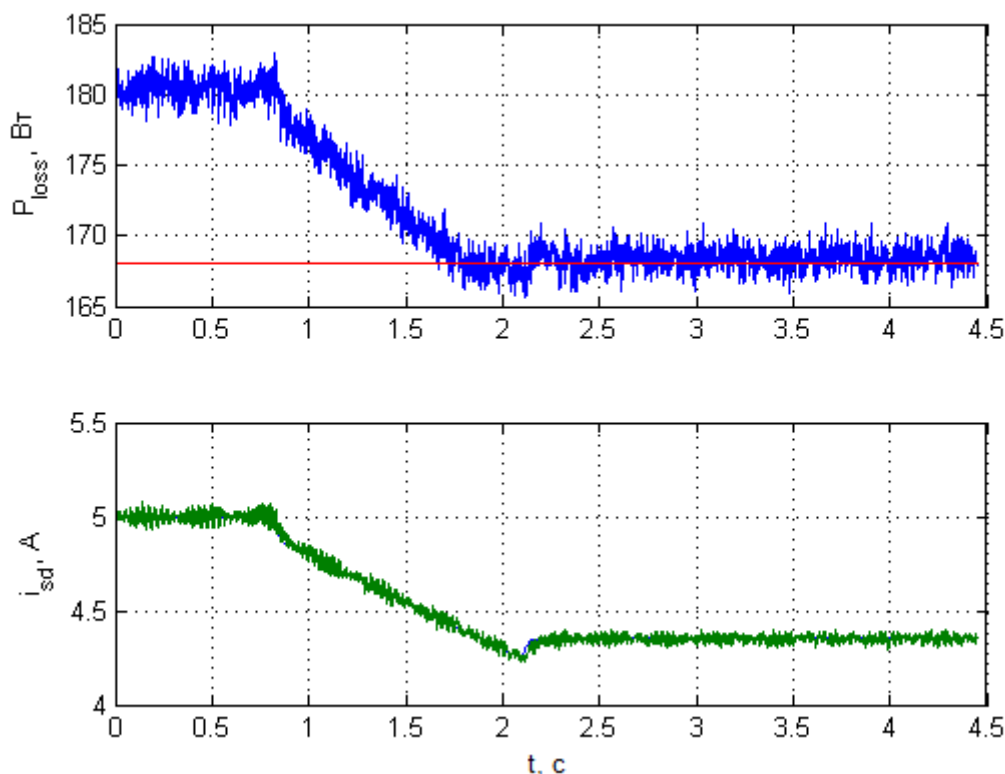


Рис. 5. Динамика мощности потерь  $P_{loss}$  и тока намагничивания  $i_{sd}$  для момента  $T_m = 13.6$  Нм (начальное значение  $i_{sd}$  меньше оптимального).



**Рис. 6.** Динамика мощности потерь  $P_{loss}$  и тока намагничивания  $i_{sd}$  для момента  $T_m = 13.6$  Нм (начальное значение  $i_{sd}$  больше оптимального).

Экспериментальное исследование показало, что метод сходится практически к оптимальному значению тока намагничивания, а скорость сходимости выше, чем для исходного алгоритма линейного изменения уставки. Траектория тока намагничивания  $i_{sd}(t)$  отличается от линейно изменяющегося сигнала из-за действия предкомпенсации и форсирующего множителя.

### Заключение

В настоящей статье предложен новый алгоритм минимизации мощности потерь в асинхронном электродвигателе, являющийся существенной модификацией метода линейного (монотонного) изменения уставки тока намагничивания. Метод основан на прямой численной оптимизации мощности потерь как функции от тока намагничивания  $i_{sd}$ , что обеспечивает устойчивость к вариации параметров двигателя. Существенным отличием данного метода является использование предкомпенсации уставки тока намагничивания, позволяющая значительно сократить время поиска минимума. Также алгоритм выдает непрерывную траекторию тока  $i_{sd}(t)$ , что исключает возмущения выходного электромагнитного момента двигателя. Моделирование и эксперименты с реальным асинхронным двигателем показывают, что метод работоспособен и устойчив к шумам измерения. Концептуальная и вычислительная простота метода позволяет реализовать его в существующих системах векторного управления, в том числе построенных на основе микроконтроллеров общего применения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 120 с.
2. Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P. Energy efficient control of three-phase induction motor - a review // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2009. – Т. 1. – №. 1. – С. 61-70.
3. Bazzi A. M., Krein P. T. Review of methods for real-time loss minimization in induction machines // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2010. – Т. 46. – №. 6. – С. 2319-2328.
4. Blanusa B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. Rijeka: Sciyo. – 2010.
5. Толочко О. И., Розкаряка П. И., Чекавский Г. С. Оптимизация энергопотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем // Сборник научных трудов ДонНТУ. Серия: «Электротехника и энергетика». – Вып. – 2011. – Т. 11. – №. 186. – С. 396-400.
6. Семькина И.Ю. К вопросу о математическом описании потерь в стали электродвигателей переменного тока // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования», 2013 №5 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2013/5/124.pdf> , свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
7. Borisevich A., Schullerus G. Energy Efficient Control of an Induction Machine under Load Torque Step Change // arXiv preprint arXiv:1312.6094. – 2013.
8. Chakraborty C. et al. Fast search controllers for efficiency maximization of induction motor drives based on DC link power measurement // Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the. – IEEE, 2002. – Т. 2. – С. 402-408.
9. Trzynadlowski A. M. Control of induction motors. – Academic Pr, 2001. – 228 p.
10. Thomas A. dSPACE DS1103 Control Workstation Tutorial and DC Motor Speed Control // Senior Project Report, Bradley University ECE Department (May 2009). – 2009. – Т. 478.

**Рецензент:** Смирнов А. Б., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО СПбГПУ.

## REFERENCES

1. Pankratov V.V., Zima E.A. Jenergooptimal'noe vektornoe upravlenie asinhronnymi jelektroprivodami: Ucheb. posobie. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2005. – 120 s.
2. Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P. Energy efficient control of three-phase induction motor - a review // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2009. – Т. 1. – №. 1. – С. 61-70.
3. Bazzi A. M., Krein P. T. Review of methods for real-time loss minimization in induction machines // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2010. – Т. 46. – №. 6. – С. 2319-2328.
4. Blanus B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. Rijeka: Sciyo. – 2010.
5. Tolochko O. I., Rozkarjaka P. I., Chekavskij G. S. Optimizacija jenergotreblenija pozicionnogo jelektroprivoda s vektornym upravleniem asinhronnym dvigatelem // Sbornik nauchnyh trudov DonNTU. Serija: «Jelektrotehnika i jenergetika». – Vyp. – 2011. – Т. 11. – №. 186. – С. 396-400.
6. Semykina I.Ju. K voprosu o matematicheskom opisanih poter' v stali jelektrodvigatelej peremennogo toka // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovanija», 2013 №5 [Jelektronnyj resurs] - Rezhim dostupa: <http://www.science-education.ru/pdf/2013/5/124.pdf>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. - Jaz. rus., angl.
7. Borisevich A., Schullerus G. Energy Efficient Control of an Induction Machine under Load Torque Step Change // arXiv preprint arXiv:1312.6094. – 2013.
8. Chakraborty C. et al. Fast search controllers for efficiency maximization of induction motor drives based on DC link power measurement // Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the. – IEEE, 2002. – Т. 2. – С. 402-408.
9. Trzynadlowski A. M. Control of induction motors. – Academic Pr, 2001. – 228 p.
10. Thomas A. dSPACE DS1103 Control Workstation Tutorial and DC Motor Speed Control // Senior Project Report, Bradley University ECE Department (May 2009). – 2009. – Т. 478.