

УДК 621.314.5

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-20-25

Оптимизация режима работы асинхронного двигателя при векторном управлении

А. В. Морозов, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. К. Барсуков, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Для регулирования вращающего момента асинхронного двигателя применяется векторное управление, позволяющее формировать необходимые значения пространственных векторов тока и напряжения статора в любой момент времени. В статье приведены результаты исследования параметров тягового асинхронного привода технологической электротележки при использовании различных критериев оптимизации значений величин. Исследован критерий минимума тока статора, который выполняется при равенстве проекций вектора тока на оси синхронной системы отсчета. Также исследован критерий минимизации потерь мощности в двигателе и предложен способ его обеспечения на основе известных данных опытов холостого хода и короткого замыкания и параметров схемы замещения двигателя. Все составляющие мощности потерь – потери в обмотках статора и ротора, магнитопроводе статора – выражаются в виде функций продольного тока статора, после чего находится экстремум их суммы. Результаты расчета затрат энергии и потерь мощности в двигателе при выполнении одного рабочего цикла позволяют говорить о том, что предложенный способ расчета и задания продольного и поперечного токов обеспечивает КПД двигателя в среднем на 3 процента больший, чем при поддержании минимума тока статора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, векторное управление, оптимизация.

Введение

В электроприводах различного назначения широко используется скалярное частотное управление, при котором скорость вращения вала асинхронного двигателя регулируется посредством изменения частоты питающего напряжения. Это позволяет, к примеру, в широком диапазоне изменять производительность технологических установок, подачу насосов, скорость перемещения транспортных средств. Недостатком данного метода является невозможность обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов. Для того чтобы контролировать вращающий момент и ускорение в любой момент времени, существует векторное управление, при котором инвертор формирует необходимые значения пространственных векторов тока и напряжения статора. Алгоритм полеориентированного управления содержит контуры регулирования продольного и поперечного токов статора. В статье приведены результаты исследования зависимости коэффициента полезного действия тягового асинхронного двигателя электротележки от значений продольного и поперечного токов. Предложен аналитический способ определения оптимальных значений токов.

Исследование способов оптимизации токов системы управления

Функциональная схема алгоритма полеориентированного регулирования скорости, рис. 1, обрабатывает сигнал энкодера ω , а также значения токов фаз i_a, i_b , получаемые от датчиков. Педаль акселератора задает вращающий момент посредством требуемого значения поперечного тока i_q^* . Задание продольного тока i_d^* обеспечивает необходимое потокосцепление двигателя. При помощи прямого преобразования Парка по сигналам i_a, i_b вычисляются проекции пространственного вектора тока на оси синхронной системы отсчета i_{sd}, i_{sq} . Эти значения являются сигналами обратных связей, которые обрабатывают регуляторы PT_d и PT_q . Скорость вращения синхронной системы отсчета ω_s , необходимая для координатных преобразований, вычисляется как сумма угловой скорости вала ω и скольжения ω_s . Выходные сигналы регуляторов тока задают мгновенные значения напряжений u_d и u_q , по которым после обратного преобразования Парка определяются длительности управляющих импульсов ключей инвертора t_i .

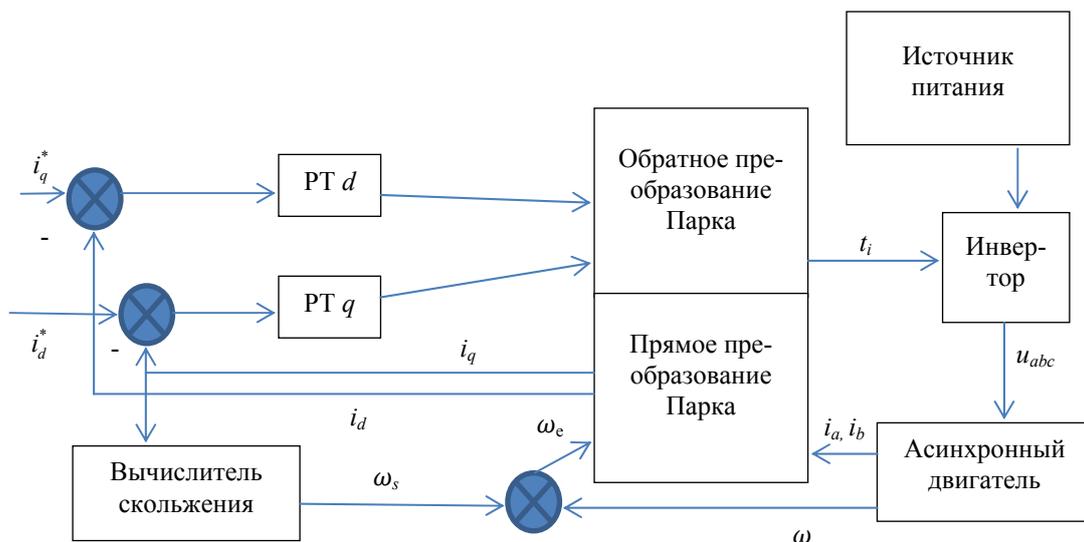


Рис. 1. Векторное регулирование момента

Величинами, определяющими электромагнитный момент, являются продольная и поперечная проекции тока статора на оси синхронной системы отсчета dq . Момент пропорционален их произведению, из чего следует, что, варьируя значения i_{sd} и i_{sq} , возможно изменять угол поворота вектора тока статора относительно системы отсчета. Момент определяется площадью прямоугольника, диагональю которого является вектор I_s , а сторонами – проекции вектора, рис. 2.

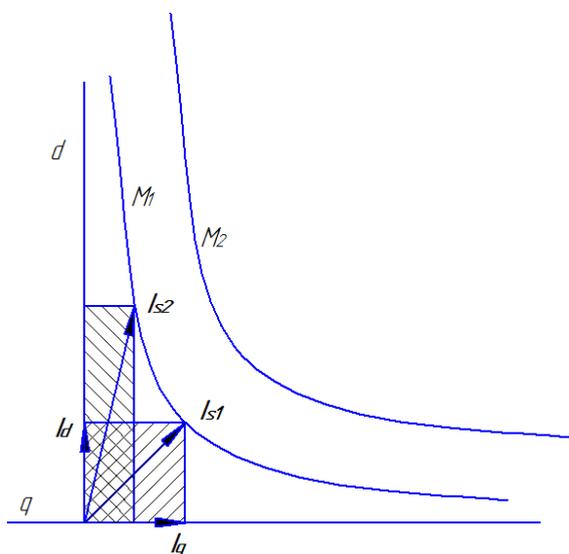


Рис. 2. Вектор тока статора в синхронной системе отсчета

При изменении соотношения проекций с сохранением постоянной величины их произведения конец вектора тока статора описывает годограф, соответствующий моменту M_1 . Большому моменту M_2 соответствует годограф, расположенный правее.

Потокосцепление ротора является одной из величин, определяющих вращающий момент. В идеале, оно должно поддерживаться номинальным. Если номинальное значение неизвестно, применяется оптимизация потока ротора различными способами. Оптимизация согласно критерию минимума тока статора обеспечивает минимум функции тока относительно заданного вращающего момента M . Решение уравнения $dI_s/dt = 0$ позволяет определить значения поперечного и продольного тока статора [1]:

$$I_{q\text{опт}} = I_{d\text{опт}} = \frac{\Psi_{R\text{опт}}}{L_m}. \tag{1}$$

Соотношение (1) соответствует расположению вектора тока I_{s1} под углом 45° к оси d .

Таким образом, при выборе в качестве регулируемой величины момента необходимо изменение продольного и поперечного токов в пропорции 1:1. Для значений вращающего момента используемого двигателя АДТ-6МР в диапазоне от 10 до 150 Н·м потокосцепление должно находиться в диапазоне 24–91 мВб, а продольный и поперечный токи статора составлять 90–360 А. Минимум фазного тока позволяет сократить потери мощности в ключах инвертора. Повышение КПД тягового привода, в целом, является актуальной задачей, так как оно, в частности, позволяет увеличить пробег транспорта до следующего заряда аккумулятора. Данные практических исследований [1, 2] говорят о том, что этот способ обеспечивает достаточно высокий КПД двигателя, еще большее увеличение которого возможно за счет оптимизации токов согласно критерию минимума мощности потерь. Для этого могут использоваться различные способы. В [3] выполнена оптимизация функции мощно-

сти потерь в двигателе методом Лагранжа относительно величины питающего напряжения и скорости скольжения, что позволило получить оптимальное значение скольжения в виде отношения сопротивлений статора и ротора. В качестве основного автоматического алгоритма оптимизации можно выделить способ, при котором во время работы двигателя пошагово изменяется величина потокосцепления с целью достижения минимума потребляемой мощности [4, 5]. Преимуществом этого способа является нетребовательность к точности задания параметров двигателя. В [6] приведен автоматический алгоритм минимизации полной мощности потерь привода, включая потери в инверторе. Также последние публикации в данной области описывают алгоритм, основанный на использовании метода роя частиц с целью поиска экстремума функции мощности потерь [7].

Рассмотренные выше методы сопряжены с рядом трудностей при их практической реализации. В частности, для работы подобного рода алгоритмов в режиме реального времени требуются процессоры со значительным запасом вычислительной мощности, а также хранение большого объема опытных данных. Поэтому с целью последующего практического применения автором выполнена оптимизация КПД тягового двигателя аналитическим методом. Для этого мощность потерь представлена в виде функции потокосцепления [8], а также принято допущение, что в Т-образной схеме замещения продольная составляющая пространственного вектора тока статора \vec{I}_{sd} равна вектору тока ветви намагничивания \vec{I}_m , а поперечная \vec{I}_{sq} – приведенному току ротора \vec{I}_r' . Потери мощности складываются из следующих основных компонентов: электрические потери в обмотках статора и ротора $p_{эл1}$ и $p_{эл2}$, магнитные в железе статора $p_{маг}$, механические $p_{мех}$ и дополнительные $p_{доп}$, из которых расчету подлежат первые три составляющие. Джоулевы потери в обмотках статора могут быть выражены через проекции пространственного вектора статора:

$$p_{эл1} = 3I_s^2 R_1 = 3 \left(\frac{|\vec{I}_s|}{\sqrt{2}} \right)^2 R_1 = \frac{3}{2} (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) R_1, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где R_1 – сопротивление статорной обмотки.

Ток статора определяется через его проекции на оси системы отсчета:

$$|\vec{I}_s| = \sqrt{I_{sq}^2 + I_{sd}^2}. \quad (3)$$

Аналогично для потерь в роторе:

$$p_{эл2} = 3I_r'^2 R_2' = 3 \left(\frac{|\vec{I}_{sq}|}{\sqrt{2}} \right)^2 R_2' = \frac{3}{2} I_{sq}^2 R_2', \text{ Вт}, \quad (4)$$

где R_2' – приведенное сопротивление роторной обмотки.

Магнитные потери складываются из двух составляющих: потерь на гистерезис, пропорциональных частоте поля, и потерь на вихревые токи, пропорциональных второй степени частоты [9, 10]. В общем случае, можно считать $p_{маг} \sim f^\alpha$, и для упрощения, ввиду относительной малости второй составляющей, принять показатель степени $\alpha = 1$. Магнитные потери пропорциональны квадрату действующего значения индукции B и частоте тока статора f_1 . По классической формуле мощность $p_{маг}$ определяется относительно значения удельной мощности нагрева $p_{1,0/50}$, Вт/кг, характеризующей потери на перемагничивание при частоте поля $f_1 = 50$ Гц и индукции $B = 1$ Тл в пересчете на массу статора m , кг:

$$p_{маг} = p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right) B^2 m_1, \text{ Вт}.$$

Из экспериментальных данных опыта холостого хода тягового двигателя АДТ-6МР установлено, что при токах намагничивания, не превышающих 100 А, насыщения стали не происходит. Если считать величину индукции пропорциональной току, можно упростить формулу:

$$p_{маг} = p_0 \left(\frac{f_1}{50} \right) \left(\frac{I_m}{I_0} \right)^2 = \frac{p_0}{2} \left(\frac{f_1}{50} \right) \left(\frac{I_{1d}}{I_0} \right)^2, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где p_0 – потери мощности в магнитопроводе в режиме холостого хода при частоте тока 50 Гц и действующем значении тока статора $I_0 = I_{xx}$:

$$p_0 = p_{xx} - 3I_{xx}^2 R_1 = 50 \text{ Вт}.$$

Из выражений (2), (4), (5) с учетом (3) можно исключить одну переменную, если выразить поперечный ток статора через величину вращающего момента и продольный ток:

$$I_{sq} = \frac{2M}{3z_p \Psi_R} \left(\frac{L_{\sigma R}}{L_m} + 1 \right) = \frac{2M}{3z_p I_{1d} L_m} \left(\frac{L_{\sigma R}}{L_m} + 1 \right). \quad (6)$$

Тогда полная мощность потерь является полиномиальной функцией продольного тока статора:

$$p = 3I_s^2 R_1 + 3 \frac{2M}{3z_p I_d L_m} \left(\frac{L \sigma r}{L_m} + 1 \right) (R_1 + R_2') + P_0 \left(\frac{f_1}{50} \right) \left(\frac{I_{1d}}{I_0} \right)^2 = a I_{sd}^2 + \frac{b}{I_{sd}^3}. \quad (7)$$

Производная мощности по продольному току статора:

$$\frac{dp}{dI_{sd}} = 2a I_{sd} - 2 \frac{b}{I_{sd}^3}.$$

Решение уравнения $\frac{dp}{dI_{sd}} = 0$ дает оптимальный продольный ток

$$I_{sd\,opt} = \sqrt[4]{\frac{b}{a}} = \sqrt[4]{\frac{\sqrt{2} M}{\sqrt{3} z_p L_m} \left(\frac{L \sigma r}{L_m} + 1 \right) \times \sqrt[4]{3(R_1 + R_2')^{0,25} \frac{3}{2} R_1 + \frac{P_0}{2} \left(\frac{f_1}{50} \right) \frac{1}{I_0^2}}}. \quad (8)$$

Исследована работа привода при выполнении расчетного рабочего цикла электротележки. Цикл содержит движение по горизонтальному асфальту с грузом от погрузочной площадки на расстояние 400 м с последующей разгрузкой, разворотом и движением обратно без груза. Теоретический вращающий момент двигателя, необходимый для преодоления трения качения порожней и груженой тележки, составляет 7 и 20 Н·м. Скорость перемещения порожней и груженой тележки принята равной 25 и 20 км/ч согласно техническому заданию. В табл. 1 приведены основные параметры, характеризующие движение тележки в расчетном цикле без учета времени на разгон и торможение:

Таким образом, за цикл будет израсходована энергия 620 кДж. В табл. 2 приведен теоретический расчет среднего значения КПД электротележки для расчетного рабочего цикла в зависимости от используемого критерия оптимизации.

Таблица 1. Параметры движения в расчетном цикле

Параметр	Движение без груза	Движение с грузом
Скорость движения, км/ч	25	20
Расстояние, м	400	400
Вращающий момент двигателя, Н·м	10	20
Частота вращения вала двигателя, об/мин	3400	2730
Мощность, кВт	3,5	5,7
Время движения, с	60	72
Энергия, кДж	210	410

Таблица 2. Сравнение эффективности способов регулирования

№	Параметр	Движение без груза	Движение с грузом
1	Оптимизация токов I_{sd}, I_{sq} согласно критерию минимума потерь мощности		
1.1	Продольный ток статора I_{sd}, A	89	126
1.2	Поперечный ток статора I_{sq}, A	134	190
1.3	Мощность потерь, кВт	0,81	1,62
1.4	Потери энергии, кДж	49	116
1.5	Средний КПД двигателя, %	79	
2	Оптимизация токов I_{sd}, I_{sq} согласно критерию минимума тока статора		
2.1	Продольный ток статора I_{sd}, A	109	155
2.2	Поперечный ток статора I_{sq}, A	109	155
2.3	Мощность потерь, кВт	0,88	1,76
2.4	Потери энергии в двигателе, кДж	63	127
2.5	Средний КПД двигателя, %	76	

Анализ результатов

На основе теоретических расчетов при некоторых средних параметрах рабочего цикла электротележки получено увеличение КПД на 3 %. Также, согласно расчетам, потери определяются величиной токов и, следовательно, значением момента. Поэтому при регулировании с постоянством момента при увеличении частоты вращения вала КПД двигателя растет. Тормозящий момент на валу двигателя изменяется под действием многих факторов: уклона дороги, характера дорожного покрытия, массы груза. Специфика тягового привода электротележки позволяет принять допущение, что частота вращения двигателя определяется номинальной скоростью движения согласно техническим требованиям либо требованиям нормативных документов, ограничивающим максимальную скорость технологического транспорта. Целесообразно осуществлять настройку системы управления для номинального режима эксплуатации – движения по горизонтальной асфальтовой поверхности со скоростью 20 км/ч. Тогда в выражении оптимального продольного тока (8) отношение $f_1/50$ можно принимать постоянным и равным 3, так как частота тока статора при этой скорости практически равна 150 Гц для используемого двигателя с тремя парами полюсов статора. По причине того, что оптимальные значения как продольного тока (7), так и поперечного тока, определяемые подстановкой (7) в (6), пропор-

циональны $M^{0,5}$, их отношение будет постоянным во всем диапазоне значений момента при определенной скорости вращения.

Выводы

1. Предложен способ задания продольного и поперечного токов статора асинхронного двигателя с обеспечением минимума потерь мощности. Исходными данными для расчета величин токов являются параметры схемы замещения и результаты опытов холостого хода и короткого замыкания.

2. Областью применения можно считать приводы, работающие в условиях постоянства тормозящего момента и преимущественно на номинальной частоте вращения, например, технологический электротранспорт.

3. Произведено сравнение КПД двигателя при использовании двух критериев оптимизации величин: с обеспечением минимума тока статора и минимума потерь мощности. Согласно расчетам, во втором случае средний КПД выше на 3 %.

Библиографические ссылки

1. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А. Б. Виноградов, Д. Б. Изосимов, С. Н. Флоренцев, Н. А. Глебов // *Электротехника*. 2010. № 12. С. 12–19.

2. Jiajia W., An Efficiency Optimization Strategy of Induction Motors for Electric Vehicles / Jiajia Wu // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, 2008, Harbin, China.

3. Manjusha, S. Efficiency optimization of induction motor drive / S. Manjusha, K. Prashant // *National conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology – NCIPET 2013*, p. 55-59.

4. Blanusa, B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drivers / B. Blanusa // *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, Meng Joo Er (Ed.), ISBN: 978-953-307-212-8, 2010.

5. *Борисевич А. В.* Практический алгоритм численного поиска для минимизации мощности потерь асинхронного двигателя // *НАУКОВЕДЕНИЕ* : интернет-журнал. 2014. Вып. 1.

6. Blanusa, B. Simple Hybrid Model for Efficiency Optimization of Induction Motor Drives with Its Experimental Validation / B. Blanusa // *Advances in Power Electronics*, 2013.

7. Dang Ho, S. On-Line Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives Using Particle Swarm Optimization Algorithm / S. Dang Ho, P. Brandstetter, C. Dinh, Thinh, C. Nguyen, B. Dinh // *AETA 2018 - Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application*, pp. 261-271.

8. *Поляков В. Н., Шрейнер Р. Т.* Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в сис-

темах частотного управления: учеб. пособие / под общ. ред. Р. Т. Шрейнера. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 256 с. ISBN 978-5-321-02525-3.

9. *Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И. Я. Браславского. М. : ACADEMIA, 2004. 202 с. : ил.

10. Shumei, C. Study on Efficiency Calculation Model of Induction Motors for Electric Vehicles / C. Shumei, L. Chen, S. liwei // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, Harbin, China, 2008.

References

1. Vinogradov A. B., Izosimov D. B., Florencev S. N., Glebov N. A. [Optimization of the efficiency of the vector control system of an asynchronous traction electric drive with an identifier of parameters]. *Electrical engineering*, 2010. No. 12. Pp. 12-19 (in Russ.).

2. Jiajia, W. An Efficiency Optimization Strategy of Induction Motors for Electric Vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, 2008, Harbin, China.

3. Manjusha, S. Efficiency optimization of induction motor drive / S. Manjusha, K. Prashant. In *National conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology – NCIPET 2013*, pp. 55-59.

4. Blanusa, B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drivers. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, Meng Joo Er (Ed.), ISBN: 978-953-307-212-8, 2010.

5. Borisevich A.V. [Practical numerical search algorithm to minimize the power of an induction motor]. *Naukovedenie*, Online Journal. 2014. Issue 1 (in Russ.).

6. Blanusa, B. Simple Hybrid Model for Efficiency Optimization of Induction Motor Drives with Its Experimental Validation. *Advances in Power Electronics*, 2013.

7. Dang Ho, S. On-Line Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *AETA 2018 - Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application*, pp. 261-271.

8. Polyakov V. N., Shrejner R. T. *Energoeffektivnyye rezhimy dvigateley peremennogo toka v sistemakh chastotnogo upravleniya: uchebnoye posobiye* [Energy-efficient modes of AC motors in frequency control systems: a training manual]. Ekaterinburg: UrFU, 2017. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-321-02525-3.

9. Braslavskij I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. *Energosberegayushij asinhronnyj elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive] M: ACADEMIA, 2004. 202 p. (in Russ.).

10. Shumei, C. Study on Efficiency Calculation Model of Induction Motors for Electric Vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 3-5, Harbin, China, 2008.

Optimization of the Engine Operation Mode at Vector Control

A.V. Morozov, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.K. Barsukov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Vector control is used to control the torque of the induction motor, it allows to generate the necessary instantaneous values of the spatial current vectors and stator voltage. The paper presents the results of studying the parameters of the asynchronous drive of a technological electric vehicle using various criteria for efficiency optimization. The minimum stator current criterion is studied which is satisfied when the projections of the current spatial vector on the axis of the synchronous reference system are equal. Also, the criterion of minimizing power losses in the motor was studied, and a method for its provision was proposed on the basis of the known experimental data on idling and short circuit, as well as the parameters of the equivalent circuit of the engine. All components of the power loss (in the stator and rotor windings and in the stator magnetic circuit) are expressed as functions of the magnetizing stator current. After that the extremum of their sum is determined. The calculation of energy costs and power losses in the motor at the rated cycle is performed. The proposed method for calculating and setting the magnetizing and transverse currents provides the average motor efficiency which is 3 percent higher than that of the minimum stator current method.

Keywords: induction motor, frequency converter, vector control, optimization.

Получено: 20.01.20