

УДК 504.61:532.542:536.252

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4091

Шифр специальности ВАК: 05.09.03

Анализ законов управления явнополюсной синхронной машиной рудничного электровоза

Ю.П. Филюшов^{1✉}, А.А. Воевода², В.Ю. Филюшов²

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, 630099, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск

✉ filushov@mail.ru

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска эффективного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами рудничного электровоза в условиях ограничения тока и напряжения, подводимого к его обмоткам от автономного источника питания. **Целью** работы ставится задача анализа законов управления, обеспечивающих увеличение пробега рудничного электровоза на одной зарядке аккумулятора при увеличении его скорости движения. **Объектом** исследования являются законы управления явнополюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами рудничного электровоза. Исследовались законы управления током по поперечной оси, управление по минимуму тока и управление при минимизации реактивной мощности явнополюсной синхронной машины. **Методы** исследования основаны на анализе состояния электрической машины при различном формировании управления электроприводом рудничного электровоза. Рассматривались основные предельные показатели электрической машины при ограничении напряжения и тока. Для каждого закона управления результаты математического моделирования отражены в графическом и табличном виде. **Результаты** анализа закона управления током по поперечной оси демонстрируют значительное увеличение реактивной мощности при росте нагрузки. В часовом режиме работы реактивная мощность превышает активную мощность, затрачиваемую на движение электровоза. При ограничении тока и напряжения управление по минимуму тока позволяет увеличить электромагнитный момент на 12,7 % в часовом режиме работы. Максимальная скорость двигателя увеличивается на 13 %. Максимальная мощность, затрачиваемая на движение электровоза, увеличивается на 33 %. Реактивная мощность снижается на 29 %. При минимизации реактивной мощности, несмотря на снижение электромагнитного момента в часовом режиме работы на 4,8 %, максимально возможная скорость двигателя увеличивается на 53 %, мощность, затрачиваемая на движение электровоза – на 50 %.

Ключевые слова: Явнополюсная синхронная машина с постоянными магнитами, анализ законов управления, минимизация тепловых потерь, минимизация реактивной мощности.

Для цитирования: Филюшов Ю.П., Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Анализ законов управления явнополюсной синхронной машиной рудничного электровоза // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 32–40. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4091

UDC 504.61:532.542:536.252

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4091

Control laws of a salient pole synchronous machine in a mine electric locomotive

Yu.P. Filyushov^{1✉}, A.A. Voevoda², V.Yu. Filyushov²

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ filushov@mail.ru

Abstract

Relevance. The need to find effective control of a traction synchronous motor with permanent magnets in a mining electric locomotive under conditions of limitation of current and voltage supplied to its windings from an autonomous power source. **Aim.** To choose a control law that ensures an increase in a mine electric locomotive mileage on a battery charge with its speed growth. **Object.** Control laws of a salient pole synchronous motor with permanent magnets of a mining electric locomotive; laws of current control along the transverse axis; control by the current minimum and control by minimizing the reactive power of a salient pole synchronous machine. **Methods.** Analysis of the state of the electric machine with different formation of control of an electric drive in the mine electric locomotive. The main limiting indicators of an electric machine with voltage and current limitation were considered. For each control law, the results of mathematical modeling are shown in graphical and tabular form. **Results.** The analysis of the current control law along the transverse axis demonstrates a significant increase in reactive power with increasing load. In an hourly mode of operation, the reactive power exceeds the active power spent on the movement of the electric locomotive. When limiting the current and voltage, the minimum current control allows you to increase the electromagnetic torque by 12.7% in hourly operation. The maximum engine speed is increased by 13%. The maximum power spent on the electric locomotive movement increases by 33%. Reactive power is reduced by 29%. With reactive power minimization, despite the decrease in the electromagnetic torque in the hourly mode of operation by 4.8%, the maximum possible engine speed increases by 53%, the power spent on the electric locomotive movement increases by 50%.

Keywords: Salient pole synchronous machine with permanent magnets, analysis of control laws, minimization of heat losses, minimization of reactive power.

For citation: Filyushov Yu.P., Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Control laws of a salient pole synchronous machine in a mine electric locomotive. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 32–40. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4091

Введение

Одним из наиболее важных звеньев в комплексной механизации подземной добычи руды является процесс её перемещения от забоя до поверхности, включая операции выпуска, погрузки, доставки в пределах очистного забоя и транспортировки по магистральным выработкам до ствола шахты. На доставку руды приходится около 50 % всех затрат по её добыче. В настоящее время электровозная откатка является основным видом транспорта по главным откаточным выработкам. Применяемые при этом электровозы различны по типу и характеристикам. Область применения шахтных электровозов напрямую связана с уровнем их взрывозащиты. Тяговый электропривод рудничного электровоза работает в опасных условиях наличия пыли и рудничного газа (метана). Питание электровоза от контактной линии, в условиях загазованности, опасно при эксплуатации. Поэтому около 70 % электровозов в угольных шахтах питаются от аккумуляторных батарей. До недавнего времени электроприводы рудничных электровозов в основном строились на базе электродвигателей постоянного тока [1, 2]. Для управления использовались командоаппараты с несколькими ступенями регулирования. Основным недостатком применения машин постоянного тока является наличие щеточно-коллекторного узла, обуславливающего возникновение искрения, снижение надёжности и безопасности. Электровозы комплектуются оборудованием с уровнем рудничной взрывозащиты РВ (рудничное взрывобезопасное). Поэтому электродвигатели постоянного тока оснащаются взрыво-

защитной оболочкой, обеспечивающей защиту от возгорания или возникновения искры внутри корпуса. Совокупность существующих недостатков требует создания более безопасных электроприводов и систем управления.

Основное внимание при создании новых шахтных электровозов уделяется повышению скорости движения, тяговых и тормозных усилий, увеличению энергоёмкости аккумуляторных батарей, обеспечивающих больший пробег электровоза на одной зарядке аккумулятора.

Современные тяговые электроприводы рудничных электровозов глубоко интегрированы с системой управления электровоза в целом. Повышение безопасности рудничного производства связано с применением на электровозах бесконтактных тяговых электродвигателей, работающих от аккумулятора. Появление дешёвых высококоэрцитивных магнитов, создающих сильные магнитные поля в малых габаритах, определяет применение на электровозах тяговых синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Не имея скользящих контактов и не расходуя энергию на возбуждение, СДПМ выгодно отличается от других электрических машин [3, 4].

Особенностью синхронных машин с высококоэрцитивными магнитами является значительная магнитная проводимость поперечного потока по сравнению с проводимостью продольного потока при совпадении осей полюсов ротора и фазных обмоток статора [5]. Несмотря на простую конструкцию явнополусной синхронной машины, различная магнитная проводимость продольной и попе-

речной оси затрудняет решение задачи управления. Транзисторная система широтно-импульсной модуляции обеспечивает формирование необходимого напряжения для реализации требуемых законов, исключая аварийные ситуации и перегрев тягового электродвигателя локомотива. Использование микропроцессорной техники позволяет без усложнения конструкции применять сложные законы управления электроприводом, обеспечивающего экономичное движение электровоза.

В настоящее время электромагнитный момент явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами формируют по наиболее простому закону векторного управления током по поперечной оси [6, 7], рассматривая двигатель в пространстве системы вращающихся координат d, q [8, 9]. Обеспечивая линейную зависимость электромагнитного момента от задания, управление током по поперечной оси оказывается достаточно простым. Но такое управление тяговым двигателем не обеспечивает минимальные потери в меди и не позволяет увеличить скорость электровоза при естественном ограничении напряжения источника питания.

Известен закон формирования электромагнитного момента явнополюсным СДПМ по минимуму тока, обеспечивающий минимальные потери в меди двигателя. Несмотря на низкие потери в меди, такой закон управления не лишён определённых недостатков. Рост реактивной мощности при увеличении нагрузки не позволяет эффективно использовать мощность, подводимую к обмоткам двигателя [10–12], ограничивает диапазон регулирования в области больших скоростей, увеличиваются потери в стали.

Формирование электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами при минимизации реактивной мощности, в силу увеличения потерь в меди, не нашло своего применения. Вместе с тем, несмотря на увеличение тепловых потерь, закон управления при минимизации реактивной мощности имеет определённые достоинства. Минимизация реактивной мощности при ограничении тока и напряжения позволяет передать большую мощность на движение электровоза, увеличить максимальную скорость двигателя и снизить потери в стали.

Рассмотренные законы управления СДПМ имеют свои достоинства и недостатки. При ограничении тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя, работающего от автономного источника питания, важной энергетической характеристикой выступает величина максимальной мощности, которую можно передать на движение электровоза. Косвенно эта характеристика определяет расстояние, которое может проехать электровоз на одной зарядке аккумулятора. Поэтому задача выбора за-

кона управления явнополюсной синхронной машиной с постоянными магнитами для реализации в электроприводе рудничного электровоза по энергетическим показателям качества является неоднозначной.

Целью работы ставится сравнение характеристик явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами при управлении током по поперечной оси при минимуме тепловых потерь и при минимизации реактивной мощности двигателя рудничного электровоза в условиях ограничения напряжения и тока.

Постановка задачи

Ставится задача анализа законов управления явнополюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами электропривода рудничного электровоза по энергетическим критериям качества.

Математическое описание трёхфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами

Решение поставленной задачи рассматривается на примере трёхфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами СДПМ, представленного в пространстве [13–15] системы вращающихся координат d, q :

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\mathbf{R}\mathbf{I} - p\omega\mathbf{D}\Psi + \mathbf{U}, \quad (1)$$

$$\Psi = \mathbf{L}\mathbf{I} + \mathbf{N}, \quad J \frac{d\omega}{dt} = m - m_c,$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} \psi_0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix},$$

$$m = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p \psi i \cos(\varphi), \quad (2)$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad \psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}, \quad u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2},$$

$$Q = \frac{3}{2} p \omega (\psi_d i_d + \psi_q i_q) = \frac{3}{2} p \omega \psi i \sin(\varphi), \quad (3)$$

$$\Delta P = 1,5 r i^2, \quad \Delta CT = 1,5 \psi^2 \omega^{1,5}, \quad (4)$$

где $\Psi, \mathbf{I}, \mathbf{U}$ – векторы потокосцепления, тока и напряжения; $\mathbf{R}, \mathbf{L}$ – матрицы сопротивлений и индуктивностей; ψ_0 – приведённое к обмоткам двигателя значение потока постоянных магнитов; $\mathbf{N}$ – матрица-столбец, характеризующая ориентацию системы относительно потока ψ_0 постоянных магнитов; $\mathbf{D}$ – матрица поворота; J – приведённый к валу двигателя момент инерции; m_c – момент статического сопротивления; ω – скорость вращения

ротора; p – число пар полюсов; m – электромагнитный момент; Q – реактивная мощность (3); ΔP – потери в меди; ΔCT – потери в стали при достаточно точном приближении [16] сводятся к одной простой эмпирической формуле (4), где коэффициент Z характеризует магнитные свойства стали. Векторы тока и напряжения ограничены по модулю областью допустимых значений. Напряжение двигателя формируется узлом векторной ШИМ при оптимальной частоте коммутации силовых ключей [17].

На рис. 1 показана векторная диаграмма СДПМ в системе вращающихся координат d и q . Углы β и μ отражают положение вектора потокосцепления Ψ и тока I статора относительно потока постоянных магнитов Ψ_0 , угол φ определяет положение вектора ЭДС от потокосцепления статора относительно вектора тока, обозначенного на рис. 1 как E . При некотором допущении $\cos(\varphi)$ не отличается от стандартной оценки, обусловленной фазовым сдвигом основной гармоники напряжения питающей сети относительно синусоидального тока статора.

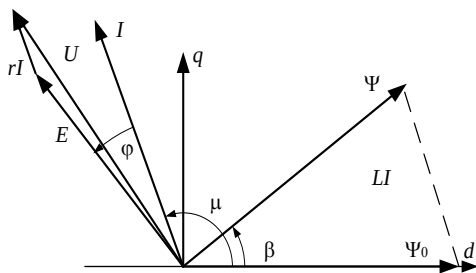


Рис. 1. Векторная диаграмма синхронной машины с постоянными магнитами

Fig. 1. Vector diagram of a permanent magnets synchronous machine

Анализ работы синхронной машины с постоянными магнитами в условиях ограничения напряжения источника питания $u=u_{\max}$ выполняется для сравнения энергоэффективных законов управления тяговым двигателем. При различных значениях тока i определены предельные значения угловой скорости ω , электромагнитного момента m , тепловых потерь ΔP , потерь в стали ΔCT , реактивной мощности Q и мощности $m\omega$, передаваемой на движение электровоза.

Для этой цели, в соответствии с (1), определён квадрат напряжения, подводимого к обмоткам двигателя:

$$u^2 = r^2 i^2 + 2r\omega p(i_q \Psi_d - i_d \Psi_q) + p^2 \omega^2 \Psi^2. \quad (5)$$

Проекции вектора потокосцепления статора выражены через ток:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + \Psi_0, \\ \Psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \quad (6)$$

Реализация управления осуществляется посредством алгоритма, обеспечивающего желаемое изменение проекций вектора тока при формировании электромагнитного момента в соответствии с выбранным законом. Определив положение вектора тока или его проекций i_d, i_q при том или ином законе управления, всегда можно определить значение электромагнитного момента (2), максимальное значение скорости при ограничении напряжения (5), тепловые потери, потери в стали (4) и величину реактивной мощности (3).

Характеристики двигателя

при управлении током по поперечной оси

Рассмотрим возможности работы СДПМ при управлении током по поперечной оси на примере трёхфазного явнополусного синхронного двигателя в условиях ограничения напряжения. Параметры двигателя рудничного электровоза при управлении током по поперечной оси часового режима работы S2 представлены в табл. 1. Ограничение тока рассматривается на уровне $i = \sqrt{2} I_\phi$ часового режима.

При управлении током по поперечной оси $i_d=0$, $i_q=i$ положение вектора тока относительно продольной оси d определено углом $\mu=\pi/2$. Подставив проекции вектора тока в уравнения (2), (3), (6), получаем функции электромагнитного момента и реактивной мощности:

$$m(i) = \frac{3}{2} p \Psi_0 i; \quad Q(i) = \frac{3}{2} p \omega L_q i^2. \quad (7)$$

Уровень ограничения напряжения (5) записан следующим образом:

$$u_{\max}^2 = r^2 i^2 + 2r p \omega \Psi_0 i + p^2 \omega^2 (\Psi_0^2 + L_q^2 i^2). \quad (8)$$

Решив уравнение (8) относительно ω , определили максимальную скорость двигателя в зависимости от тока при ограничении напряжения источника питания:

$$\omega(i) = \frac{\sqrt{(\Psi_0^2 + L_q^2 i^2) u_{\max}^2 - r^2 L_q^2 i^4 - r i \Psi_0}}{p (\Psi_0^2 + L_q^2 i^2)}. \quad (9)$$

Таблица 1. Параметры двигателя рудничного электровоза в часовом режиме работы

Table 1. Parameters of a mining electric locomotive engine in hourly operation mode

P_n , кВт (kW)	M , Нм (Nm)	ω , рад/с (rad/s)	I_ϕ , А (A)	U_ϕ , В (V)	R , Ом (Ohm)	L_d , мГн (mH)	L_q , мГн (mH)	Ψ_0 , Вб (Wb)	p
10	63	164	175	29	0,0282	0,0426	0,0905	0,0213	8

При ограничении модуля напряжения $u_{\max}=41$ установленные функции (7) и (9) управления током по поперечной оси представлены в графическом виде на рис. 2. Из рисунка хорошо видно значительное снижение максимальной скорости $\omega(i)$ двигателя при увеличении тока, рост реактивной мощности $Q(i)$ и мощности $m(i)\omega(i)$, передаваемой на движение электровоза [18].

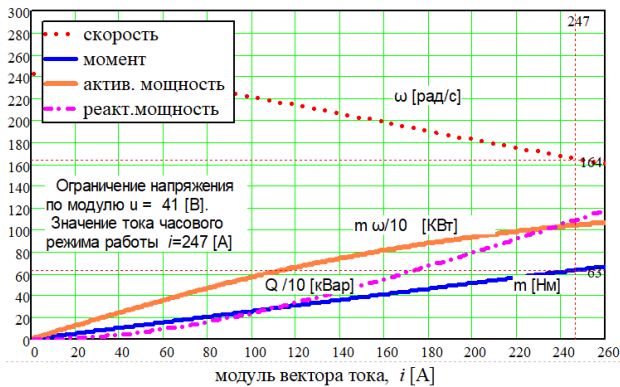


Рис. 2. Зависимость скорости, момента, активной и реактивной мощности от тока при управлении синхронной машиной током по поперечной оси

Fig. 2. Dependence of speed, torque, active and reactive power on current under control of a synchronous machine with current along the transverse axis

Основные показатели состояния электрической машины при управлении током по поперечной оси, ограничении напряжения $u_{\max}=41$ [В] и модуле тока, равном $i=247$ А, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Состояние синхронной машины при управлении током по поперечной оси при ограничении тока и напряжения

Table 2. State of a synchronous machine during current control along the transverse axis with current and voltage limitation at the nominal level

$m\omega$, кВт (kW)	Q , кВар (kVar)	ω , рад/с (rad/s)	m , Нм (Nm)	ΔCT , Вт (W)	ΔP , Вт (W)	I , А (A)	U , В (V)	$\cos(\varphi)$	η
10	11	164	63	41	258	247	41	0,69	0,97

В часовом режиме работы реактивная мощность Q превышает активную мощность $m\omega$, затрачиваемую на движение электровоза. При ограничении напряжения и тока значительная величина реактивной мощности не позволяет эффективно использовать мощность, подводимую к обмоткам двигателя. Возможность изменения угловой скорости двигателя ω при ограничении напряжения существенно снижается.

Характеристики двигателя при работе в условиях минимума тока

Рассмотрим условия работы двигателя электровоза при минимизации тепловых потерь. Тепловые потери можно характеризовать посредством функции энергетического состояния $F(\mu)$, определяющей отношение тепловых потерь к электромагнитному моменту [19], в зависимости от модуля вектора тока и его положения, характеризуемого углом μ относительно потока постоянных магнитов. В силу различного магнитного сопротивления потоков продольной и поперечной осей положение вектора тока при минимизации потерь в меди будет изменяться в зависимости от тока. Для определения положения вектора тока $\mu(i)$, доставляющего минимум тепловых потерь, минимизируем функцию энергетического состояния $F(\mu)$:

$$F(\mu) = \frac{\Delta P}{m}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial F(\mu)}{\partial \mu} = 0.$$

Зависимость положения вектора тока μ_{opt} от его модуля i определена следующим уравнением:

$$\mu_{opt}(i) = \pi \pm a \cos \left(\frac{\Psi_0 - \sqrt{8(L_d - L_q)^2 i^2 + \Psi_0}}{4(L_d - L_q)i} \right). \quad (11)$$

На основании (11) определены проекции вектора тока:

$$i_d(i) = i \cos(\mu_{opt}), \quad i_q(i) = i \sin(\mu_{opt}), \quad (12)$$

и потокосцепления (6). На основании (6) и (12) определён электромагнитный момент (2) и квадрат напряжения (5). Так как модуль напряжения $u_{\max}$ источника питания ограничен, квадрат напряжения равен:

$$u_{\max}^2 = p^2 \omega^2 (\Psi_0^2 + L_q^2 i_q^2 + L_d^2 i_d^2 + 2L_d \Psi_0 i_d) + 2r i_q (\Psi_0 + (L_d - L_q) i_d) \omega + r^2 i^2.$$

При решении этого уравнения относительно скорости получена функция максимально возможной скорости от тока при ограничении напряжения:

$$\omega(i) = \frac{\sqrt{(u_{\max}^2 - r^2 i^2) \alpha(i) + r^2 i_q^2 + \beta(i)^2} - r i_q (\Psi_q - \Psi_d)}{p \alpha(i)}, \quad (13)$$

где

$$\alpha(i) = L_d^2 i_d^2 + L_q^2 i_q^2 + 2L_d i_d \Psi_0 + \Psi_0^2, \quad \beta(i) = \alpha(i) - 2\Psi_d \Psi_q.$$

Энергетическая эффективность η работы двигателя выражена посредством функции $F(\mu)$ энергетического состояния (10):

$$\eta = \frac{\omega m}{\omega m + \Delta P} = \frac{\omega}{\omega + F(\mu)}. \quad (14)$$

Уравнение (14) определяет КПД двигателя. На основании зависимости положения вектора тока (11) от модуля тока определены проекции вектора тока (12) и проекции вектора потокоцепления (6), которые позволяют установить функции электромагнитного момента (2), максимальной угловой скорости (13), реактивной мощности (3) и мощности $m(i)\omega(i)$, затрачиваемой на движение электроваза в зависимости от тока при минимизации потерь в меди в условиях ограничения напряжения $u=u_{\max}$, подводимого к обмоткам двигателя. Эти функции отражены на рис. 3.

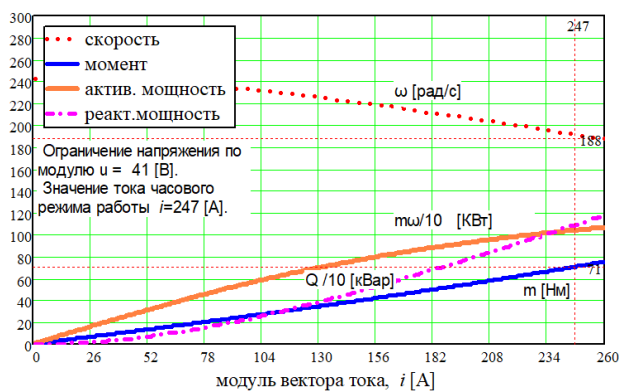


Рис. 3. Зависимость скорости, момента, активной и реактивной мощности от тока при управлении по минимуму тока

Fig. 3. Speed, torque, active and reactive power dependence on current under control by minimum of current

Основные показатели состояния электрической машины при минимизации тепловых потерях в условиях ограничения напряжения $u_{\max}=41$ [В] и модуле тока, равно $i=247$ А, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Состояние синхронной машины при минимизации потерь в меди в условиях ограничения тока и напряжения часового режима работы
 Table 3. State of the synchronous machine while minimizing copper losses under conditions of current and voltage limitation of hourly operation

$m\omega$, кВт	Q , кВар	ω , рад/с	m , Нм	ΔCT , Вт	ΔP , Вт	I , А	U , В	$\cos(\varphi)$	η
13,2	7,8	188	70	37,8	258	247	41	0,89	0,97

Такое представление позволяет сравнить характеристики СДПМ при минимуме тока с характеристиками синхронной машины управления током по поперечной оси. В соответствии с табл. 3, отража-

ющей показатели часового режима работы при ограничении тока и напряжения, электромагнитный момент увеличен на 12,7 %, угловая скорость вращения двигателя – на 13 %, активная мощность, передаваемая исполнительному механизму, увеличивается на 32 % относительно управления током по поперечной оси, характеристики которого представлены в табл. 2.

Характеристики двигателя при минимизации реактивной мощности

Рассмотрим условия передачи исполнительному механизму явнополусной синхронной машины с постоянными магнитами максимальной мощности при ограничении тока $i_{\max}$ и напряжения $u_{\max}$, подводимого к обмоткам двигателя. Эти условия определены путём преобразования уравнения для квадрата напряжения (1) к следующему виду:

$$u^2 = r^2 i^2 + \frac{4}{3} r \omega m + p^2 \omega^2 \psi^2,$$

$$u_{\max}^2 i_{\max}^2 \cos^2(\varphi) = r^2 i_{\max}^4 \cos^2(\varphi) + \frac{4}{3} r i_{\max}^2 \cos^2(\varphi) \omega m + \frac{4}{9} \omega^2 m^2. \quad (15)$$

Решение уравнения (15) относительно мощности, передаваемой на движение локомотива, при ограничении напряжения и тока:

$$\omega m = \frac{3}{2} i_{\max} \cos(\varphi) \times$$

$$\times \left(\sqrt{u_{\max}^2 - r^2 i_{\max}^2 \sin^2(\varphi)} - r i_{\max}^2 \cos(\varphi) \right)$$

показывает зависимость мощности от угла φ . При угле φ , равном нулю (3), реактивная мощность Q также равна нулю [20], обеспечивая передачу максимальной мощности на перемещение электроваза при установленных ограничениях:

$$\frac{\partial(\omega m)}{\partial \varphi} = 0, \quad \varphi = 0, \quad \omega m = \frac{3}{2} (i_{\max} u_{\max} - r i_{\max}^2).$$

Приравняв уравнение (3) к нулю, определяем проекции вектора тока i_d , i_q в зависимости от его модуля i при минимизации реактивной мощности:

$$i_d(i) = -\frac{\Psi_0 - \sqrt{4i^2 L_q (L_q - L_d) + \Psi_0^2}}{2(L_q - L_d)}, \quad i_q(i) = \sqrt{i^2 - i_d^2}. \quad (16)$$

На основании проекции вектора тока (16), в соответствии с (2)–(5), получены функции максимальной угловой скорости при ограничении напряжения:

$$\omega(i) = \frac{u_{\max} - r i}{p \psi},$$

момента $m(i)$, реактивной мощности $Q(i)$ и активной мощности $m(i)\omega(i)$ в зависимости от тока при ограничении напряжения источника питания, которые представлены на рис. 4.

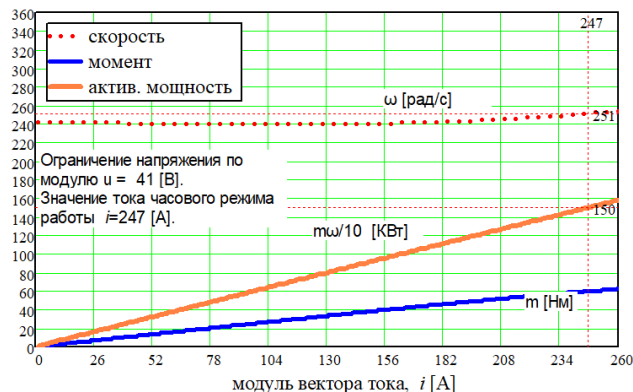


Рис. 4. Зависимость скорости, момента, активной и реактивной мощности от тока при минимизации реактивной мощности

Fig. 4. Speed, torque, active and reactive power dependence on current under minimization of reactive power

Основные показатели состояния электрической машины при минимизации реактивной мощности, ограничении напряжения $u_{\max}=41$ [В] и модуле тока, равном $i=247$ А, часового режима работы, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Состояние синхронной машины при минимизации реактивной мощности в условиях ограничения тока и напряжения часового режима работы

Table 4. State of a synchronous machine when minimizing reactive power under conditions of current and voltage limitation of hourly operation

$m\omega$, кВт (kW)	Q , кВар (kVar)	ω , рад/с (rad/s)	M_n , Нм (Nm)	ΔCT , Вт (W)	ΔP , Вт (W)	I , А (A)	U , В (V)	$\cos(\phi)$	η
15	0	251	60	17,3	258	247	41	1	0,98

Из сравнения результатов, приведённых в табл. 2 и 4, следует, что максимальная мощность, затрачиваемая на перемещение электроваза при минимизации реактивной мощности, относительно

управления током по поперечной оси часового режима работы, увеличивается на 50 %, несмотря на снижение электромагнитного момента на 4,8 %. При этом максимально возможная скорость двигателя увеличивается на 53 %. Столь высокие показатели объясняются более эффективным использованием мощности, подводимой к обмоткам двигателя. За счёт увеличения максимальной скорости двигателя энергетическая эффективность η в часовом режиме работы увеличивается [21] на 1 %.

Заключение

В статье рассмотрены энергетические характеристики явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами управления током по поперечной оси, управления при минимизации тепловых потерь и управления при минимизации реактивной мощности. Сравнение функции электромагнитного момента $m(i)$, угловой скорости $\omega(i)$, реактивной мощности $Q(i)$ и мощности $m(i)\omega(i)$, затрачиваемой на движение электроваза в зависимости от тока, показывает, что управление током по поперечной оси не отличается высокими энергетическими показателями. В часовом режиме работы реактивная мощность превышает величину мощности, затрачиваемой на движение электроваза. Работа двигателя при минимизации потерь в меди даёт лучшие результаты. Электромагнитный момент в часовом режиме работы увеличен на 12,7 %. Максимальная скорость двигателя увеличивается на 13 %. Максимальная мощность, затрачиваемая на движение электроваза, увеличена на 33 %. Реактивная мощность снижается на 29 %.

Хорошие результаты даёт управление при минимизации реактивной мощности. Несмотря на снижение электромагнитно момента на 4,8 % часового режима работы, максимально возможная скорость двигателя увеличена на 53 %, при этом максимальная мощность, затрачиваемая на движение электроваза, увеличена на 50 %. Столь эффективная работа двигателя объясняется наиболее полным использованием мощности, подводимой к его обмоткам. За счёт увеличения скорости, энергетическая эффективность η в часовом режиме работы увеличивается на 1 %. Высокие энергетические показатели обуславливают увеличение пробега электроваза на одной зарядке аккумулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wang Y., Liu J.X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation // Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2015. – V. 15. – P. 45–50.
- Locomotive wheel slip detection based on multi rate state identification of motor load torque / S. Wang, J. Xiao, J. Huang, H. Sheng // Journal of the Franklin Institute. – 2016. – V. 353. – Iss. 2. – P. 521–540.
- Senseless PMSM Drive Implementation by Introduction of Maximum Efficiency Characteristics in Reference Current Generation / Z. Plantić, T. Marčić, M. Beković, G. Štumberger // Energies. – 2019. – V. 12 (18). – 3502. DOI: 10.3390/en12183502

4. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short_circuited rotor / A.E. Evstratov, V.M. Zavyalov, A.V. Grigoryev, I.Y. Semykina // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016 – V. 11. – № 7. – P. 4391–4398.
5. Смирнов А.Ю. Особенности проектирования и анализа высокоскоростных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // *Электротехника и энергетика: Известия Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеевой*. – 2013 – № 4 (101). – С. 231–235.
6. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // *Siemens Zeitschrift*. – 1971. – № 10. – P. 757–760.
7. High performance rectifier/multilevel inverter based BLDC motor drive with PI controller / M.S. Hasan, F.S. Almakhturi, M.D. Albakhait, A.I. Jaber // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012005.
8. Filushov Yu.P., Simakov G.M., Filushov V.Yu. The formation of energy-efficient control of a high-speed AC electric drive // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – 2016. – V. 721. – P. 118–120.
9. Electrical steels and their evaluation for automobile motors / S. Kunihiro, U. Masanori, Y. Soichiro, O. Yoshihiko // *World electric vehicle journal*. – 2019. – V. 10 (2). – 31. DOI: 10.3390/wevj10020031
10. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М: Энергия, 1964. – 527 с.
11. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // *International Journal of Modelling, Identification and Control*. – 2016. – V. 26. – Iss. 1. – P. 68–78.
12. PWM strategy for equal distribution of losses between low-voltage cells in an MV frequency converter / Y. Kazemirova, A. Anuchin, A. Kovyazin, M. Lashkevich, D. Aliamkin, S. Grishin // 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – Torino, Italy, 2020. – P. 1–6.
13. Enhancement mathematical model of BLAC motor drive using rotation coordinate for better output performance / I.J. Alzubaydy, R.A. Gaib, R.A. Mejeed, A.A. Hajer // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2019. – V. 14. – P. 837–845.
14. Obed A.A., Saleh A.L., Kadhim A.K. Speed performance evaluation of BLDC motor based on dynamic wavelet neural network and PSO 128 algorithm // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2019. – V. 10 (4). – P. 1742–1750.
15. Curuvua B., Lihua C., Fan X. Enhanced gate driver with variable turn on and turn off speeds. – 2019. – № 2019-01-0608. – SAE Technical Paper. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0608>.
16. Filushov Yu. P., Filushov V.Yu. Control of a synchronous machine while minimizing heat losses under conditions of minimum reactive power // *Russian electrical engineering*. – 2013. – V. 84. – № 12. – P. 712–717.
17. Number of poles pairs effects on electromagnetic torque permanent magnet synchronous motor / A. Usoltsev, G.L. Demidova, D.V. Lukichev, S. Bratnikov // 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, 2019. – P. 1–5.
18. Filushov Yu.P., Simakov G.M., Filyshov V.Yu. Energy-efficient control of synchronous machine // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. – 2014. – V. 7. – P. 837–842.
19. A device for vector control of a synchronous motor by excitation from permanent magnets: Patent (RU) No. 2,307,601, N02R2100. Application: No. 2009115655/09, Published: 20.08.2018 Byul. No. 23.
20. Simakov G.M., Filushov Yu.P. Comparative evaluations of the energy properties of an asynchronous electric drive-in transient processes // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – V. 88. – № 5. – P. 296–302.
21. Dianov A., Anuchin A. Adaptive maximum torque per ampere control of sensorless PM motor drives // *Proc. 23rd Int. Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. – Harbin, China, 2019. – P. 1–6.

REFERENCES

1. Wang Y., Liu J.X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, vol. 15, pp. 45–50.
2. Wang S., Xiao J., Huang J., Sheng J. Locomotive wheel slip detection based on multirate state identification of motor load torque. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, vol. 353, Iss. 2, pp. 521–540.
3. Plantić Z., Marčić T., Beković M., Štumberger G. Senseless PMSM drive implementation by introduction of maximum efficiency characteristics in reference current generation. *Energies*, 2019, vol. 12 (18), 3502. DOI: 10.3390/en12183502.
4. Evstratov A.E., Zavyalov V.M., Grigoryev A.V., Semykina I.Y. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short circuited rotor. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11 (7), pp. 4391–4398.
5. Smirnov A.Yu. *Osobennosti proektirovaniya i analiza vysokoskorostnykh sinkhronnykh mashin s postoyannymi magnitami na rotore* [Features of design and analysis of high-speed synchronous machines with permanent magnets on the rotor]. *Electrical Engineering and power engineering: Izvestiya Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4 (101), pp. 231–235.
6. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen [The principle of field orientation is the basis of transvector control of rotary field machines]. *Siemens Zeitschrift*, 1971, no. 10, pp. 757–760.
7. Hasan M.S., Almakhturi F.S., Albakhait M.D., Jaber A.I. High Performance Rectifier/Multilevel Inverter Based BLDC Motor Drive with PI Controller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012005.
8. Filushov Yu.P., Simakov G.M., Filushov V.Yu. The formation of energy-efficient control of a high-speed AC electric drive. *11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 2016, vol. 721, pp. 324–329.
9. Kunihiro S., Masanori U., Soichiro Y., Yoshihiko O. Electrical steels and their evaluation for automobile motors. *World electric vehicle journal*, 2019, vol. 10 (2). DOI: 10.3390/wevj10020031.
10. White D. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical energy conversion]. Moscow, Energiya Publ., 1964. 527 p.

11. Ye W., Shen W., Zheng J., Honnery D., Dayawansa D. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 26, Iss. 1, pp. 68–78.
12. Kazemirova Y., Anuchin A., Kovyazin A., Lashkevich M., Aliamkin D., Grishin S. PWM strategy for equal distribution of losses between low-voltage cells in an MV frequency converter. *55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Torino, Italy, 2020. pp. 1–6.
13. Alzubaydy I.J., Gaib R.A., Mejeed R.A., Hajer A.A. Enhancement mathematical model of BLAC motor drive using rotation coordinate for better output performance. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, vol. 14, pp. 837–845.
14. Obed A.A., Saleh A.L., Kadhim A.K. Speed performance evaluation of BLDC motor based on dynamic wavelet neural network and PSO 128 algorithm. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, vol. 10 (4), pp. 1742–1750.
15. Shreiner R., Medvede A., Polyakov V. Estimation of energy saving resources of salient pole synchronous electric drive in continuous operating periodic duties. *Proceedings of the IEEE. IX International Conference on Power Drives Systems ICPDS' 2016*. Perm, October, 2016. pp. 139–145.
16. Filushov Yu.P., Filushov V.Yu. Control of a synchronous machine under minimizing heat losses in conditions of minimum reactive power. *Russian electrical engineering*, 2013, vol. 84, no. 12, pp. 712–717.
17. Usoltsev A., Demidova G.L., Lukichev D.V., Bratchikov S. Number of poles pairs effects on electromagnetic torque permanent magnet synchronous motor. *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, 2019. pp. 1–5.
18. Filushov Yu.P., Simakov G.M., Filyushov V.Yu. Energy-efficient control of synchronous machine. *12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings*, 2014, vol. 7, pp. 837–842.
19. Kitionaka H. A device for vector control of a synchronous motor by excitation from permanent magnets. Patent No. 2,307,601, N02R2100, 2018.
20. Simakov G.M., Filushov Yu.P. Comparative evaluations of the energy properties of an asynchronous electric drive in transient processes. *Russian Electrical Engineering*, 2017. vol. 88, no. 5, pp. 296–302.
21. Dianov A., Anuchin A. Adaptive maximum torque per ampere control of sensorless PM motor drives. *Proc. 23rd Int. Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China, 2019. pp. 1–6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Петрович Филюшов, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики Сибирского государственного университета водного транспорта, Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33. filushov@mail.ru

Александр Александрович Воевода, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. voevoda@corp.nstu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1604-2796>

Владислав Юрьевич Филюшов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. filiushov.vladislav@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-2316-5935>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy P. Filyushov, Dr. Sc., Professor, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkin street, Novosibirsk, 630099, Russian Federation. filushov@mail.ru

Alexander A. Voevoda, Dr. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. voevoda@corp.nstu.ru

Vladislav Yu. Filyushov, Cand. Sc., Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. filiushov.vladislav@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.02.2023

Поступила после рецензии: 23.10.2023

Принята к публикации: 22.11.2023

Received: 20.02.2023

Revised: 23.10.2023

Accepted: 22.11.2023