

УДК 629.1, 62-523

ЭКОНОМИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГЕ

Филушов Юрий Петрович¹, профессор, доктор технических наук

e-mail: filushov@mail.ru

Палагушкин Борис Владимирович¹, профессор, доктор технических наук

e-mail: 9134889132@mail.ru

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Abstract. Доклад посвящён методам управления явнополюсным синхронным двигателем транспортного средства на электрической тяге. Рассматривается способ оптимизации энергопотребления за счёт рационального регулирования тока посредством векторного управления. Особое внимание уделено законам, посредством которых обеспечивается управление при минимизации потерь в обмотках и минимизации реактивной мощности явнополюсного синхронного двигателя. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие эффективность предлагаемых решений для увеличения КПД, диапазона регулирования скорости и механической мощности, при ограничении тока и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Материал будет полезен инженерам и преподавателям в области электротранспорта.

Ключевые слова: явнополюсная синхронная машина с постоянными магнитами, закон управления, минимизация потерь, минимизация реактивной мощности.

ECONOMICAL CONTROL OF THE SYNCHRONOUS MOTOR OF VEHICLE ON ELECTRIC TRAIN

Yuri P. Filyushov¹, Professor, Doctor of Technical Sciences

e-mail: filushov@mail.ru

Boris V. Palagushkin¹, Professor, Doctor of Technical Sciences

e-mail: 9134889132@mail.ru

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The report is devoted to methods of controlling a single-pole synchronous motor of an electric vehicle. A method for optimizing energy consumption through rational regulation of current through vector control is considered. Special attention is paid to the laws by which control is ensured while minimizing losses in the windings and minimizing the reactive power of a single-pole synchronous motor. The simulation results are presented, confirming the effectiveness of the proposed solutions for increasing efficiency, speed and power control range, while limiting the current and voltage supplied to the motor windings. The material will be useful for engineers and teachers in the field of electric transport.

Keywords: synchronous machine with salient poles an permanent magnets control law, minimum loss, minimum reactive power.

Введение

В настоящее время широко распространены транспортные средства на электрической тяге. Электрическая тяга применяется в водном и железнодорожном транспорте, электромобилях и летательных аппаратах. В качестве тягового двигателя удачно используются синхронные машины с постоянными магнитами. Не имея скользящих контактов и не затрачивая энергию на возбуждение, такие двигатели выгодно отличаются от других электрических машин. Появление дешёвых высококоэрцитивных магнитов, создающих сильные магнитные поля в малых габаритах, обеспечивает широкое распространение синхронных машин в различных областях техники [1]. Особенностью 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 [2]. Несмотря на простую конструкцию явнополюсной синхронной машины, нелинейная зависимость электромагнитного момента от тока, в силу различной магнитной проводимости продольной и поперечной оси, значительно усложняет решение задач синтеза экономичного управления.

В настоящее время векторное управление синхронной машиной с постоянными магнитами в пространстве системы вращающихся координат d, q получило наиболее широкое применение. Управление формируют током по поперечной оси. Такой способ позволяет исключить нелинейность в структуре двигателя, обеспечивая высокую точность регулирования. Имея простой алгоритм, такое управление не обеспечивает минимальные потери в явнополюсном двигателе при формировании электромагнитного момента. Значительное увеличение реактивной мощности при росте нагрузки ограничивает диапазон регулирования в области высоких скоростей, снижая эффективность использования мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Рост потокоцепления статора при росте нагрузки увеличивает потери в стали.

Известно техническое решение, представленное в описании заявки на патент Японии № 2006 - 121855, где экономичное управление формируется с помощью карты памяти, в которую заносятся результаты экспериментальных исследований работы явнополюсного двигателя в условиях минимума тока при различной нагрузке. Другое решение, представлено в патентном документе RU № 2397601, где сигналы задания токов в системе вращающихся координат формируются посредством аппроксимации нелинейных функций [3]. Применение карты памяти и аппроксимации нелинейных функций снижает точность управления синхронным двигателем, не обеспечивая формирование максимального электромагнитного момента при различном ограничении тока, что негативно сказывается на эффективности процессов преобразования энергии.

Постановка задачи

В работе ставится задача сравнить эффективность законов экономичного управления явнополюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами относительно его работы при управлении током по поперечной оси. Под экономичным управлением понимается закон управления при минимальном токе и закон управления при минимизации реактивной мощности синхронного двигателя.

Математическое описание синхронной машины

Математическое описание [4] трёхфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами СДПМ, представлено в пространстве системы вращающихся координат d, q :



$$\begin{aligned}\frac{d\Psi}{dt} &= -\mathbf{R}\mathbf{I} - p\omega\mathbf{D}\Psi + \mathbf{U}, \\ \Psi &= \mathbf{L}\mathbf{I} + \mathbf{N}; J \frac{d\omega}{dt} = m - m_c, \\ \Psi &= \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \mathbf{N} = \begin{bmatrix} \Psi_0 \\ 0 \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (1)$$

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

$$m = \frac{3}{2}p[\Psi_0 i_q - (L_q - L_d)i_q i_d], \quad (2)$$

$$P = m\omega = \frac{3}{2}p\omega\Psi\cos(\varphi); Q = \frac{3}{2}p\omega(\psi_d i_d + \psi_q i_q) = \frac{3}{2}p\omega\Psi\sin(\varphi), \quad (3)$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}; \Psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2},$$

$$\Delta P = 1.5r i^2; P_{cm} = 1.5Z \Psi^2 p^{1.5} \omega^{1.5}, \quad (4)$$

где $\Psi, \mathbf{I}, \mathbf{U}$ – векторы потокосцепления, тока и напряжения;

$\mathbf{R}, \mathbf{L}$ – матрицы сопротивлений и индуктивностей,

L_d, L_q – полные индуктивности двигателя продольной и поперечной оси;

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),

P – механическая мощность;

ΔP – потери в меди,

P_{cm} – потери в магнитопроводе определены по эмпирической формуле Штейнметца [5], которая, при достаточно точном приближении, соответствует выражению (5);

Z – коэффициент характеризует материал и конструкцию магнитопровода;

φ – угол, определяет положение вектора тока относительно ЭДС от потокосцепления статора.

При небольшом изменении потокосцепления в воздушном зазоре нелинейностью характеристики намагничивания можно пренебречь. В противном случае насыщение магнитной системы двигателя можно учитывать способом, предложенным в работе [6]. Вектора тока и напряжения ограничены по модулю областью допустимых значений. Напряжение двигателя формируется посредством широтно-импульсной модуляции, при оптимальной частоте коммутации силовых ключей. Закон управления электрической машиной можно характеризовать зависимостью электромагнитного момента от положения вектора тока μ , которое определяет величины проекций тока в системе вращающихся координат d, q . На рисунке 1 показана векторная диаграмма синхронной машины.

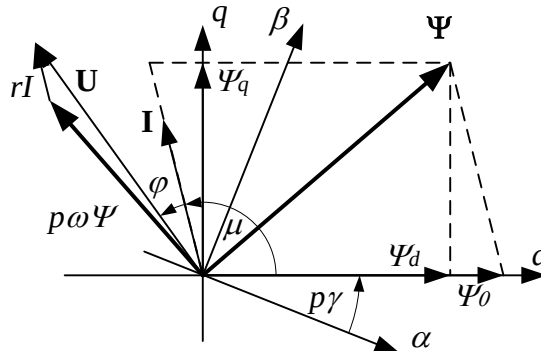


Рисунок 1 – Векторная диаграмма синхронной машины с постоянными магнитами

Угол μ отражает положение вектора тока $\mathbf{I}$ относительно потока постоянных магнитов Ψ_0 . Угол γ определяет положение ротора двигателя относительно неподвижной системы координат α, β .

На примере явнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами рассмотрим возможность его работы при различных законах экономичного управления. Параметры двигателя часового режима работы S2 управления током по поперечной оси отражены в таблице 1. Величина тока I_n определена условиями допустимого нагрева двигателя в течении одного часа работы.

Таблица 1. Параметры двигателя часового режима работы S2 при управлении током по поперечной оси

$P, \text{кВт}$	$m, \text{Нм}$	$\omega, \text{рад/с}$	$I_n, \text{А}$	$U_n, \text{В}$	$R, \text{Ом}$	$L_d, \text{мГн}$	$L_q, \text{мГн}$	$\Psi_0, \text{Вб}$	p	$\cos(\varphi)$
10	63	164	247	41	0.002	0.042	0.0905	0.021	8	0.7

В работе сделан анализ предельных энергетических характеристик двигателя в зависимости от положения вектора тока μ при его ограничении на уровне I_n и ограничении напряжения источника питания на номинальном уровне. Для этой цели, на основании уравнений (1), определена зависимость предельной скорости $\omega_{\max}$ от величины напряжения U , подводимого к обмоткам двигателя, при различных значениях проекций i_d, i_q вектора тока $\mathbf{I}$ установившегося режима работы:

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

$$\omega_{\max} = \frac{\sqrt{(U^2 - r^2 i^2) \Psi^2 + r^2 (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)^2 - r(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)}}{p \Psi^2}. \quad (6)$$

$$F(\mu) = \frac{\Delta P}{m} \quad (6)$$

где i, Ψ – модули векторов тока и потокосцепления статора,

$F(\mu)$ – функции энергетического состояния, характеризует отношение потерь в меди ΔP к электромагнитному моменту m . Изменение энергетических характеристик синхронной машины с постоянными магнитами в зависимости от положения вектора тока показано на рисунке 2.

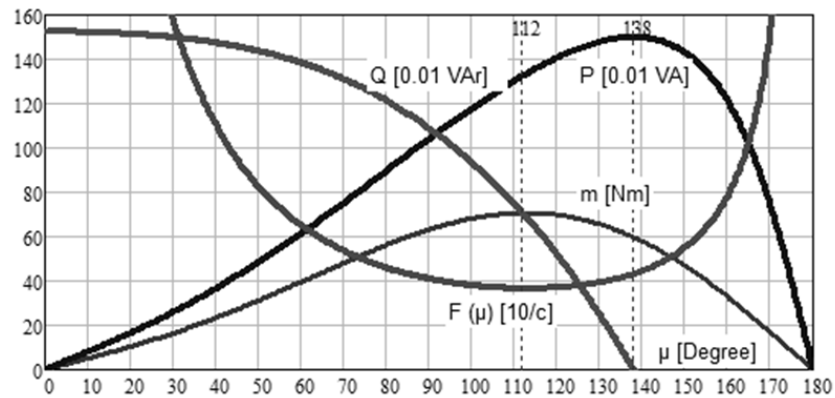


Рисунок 2 – Изменение энергетического состояния синхронной машины с постоянными магнитами в зависимости от положения вектора тока при ограничении напряжения и тока

Из представленного рисунка следует, что при изменении положения μ вектора тока, в условиях ограничения напряжения и тока, основные энергетические характеристики электрической машины (электромагнитный момент, механическая мощность, реактивная мощность, функция энергетического состояния) существенно изменяются. Функция электромагнитного момента на рисунке 2 имеет явно выраженный экстремум при определённом положении вектора тока. Этому положению соответствует минимум функции $F(\mu)$ энергетического состояния (6). Условие максимальной механической мощности, передаваемой на движение электротранспорта, достигается при минимизации реактивной мощности и другом положении вектора тока.

Закон управления током по поперечной оси определён постоянным значением угла $\mu = \pi/2$ относительно продольной оси d . В настоящее время этот закон управления синхронной машины с постоянными магнитами получил наиболее широкое распространение во всем мире. В этих условиях, в соответствии с рисунком 2, реактивная и механическая мощности практически равны. Имея наиболее простой алгоритм, такое управления обеспечивает линейную зависимость электромагнитного момента от задания. Подставив значения проекций вектора тока в уравнения (2), (3) и (6), получены функции предельных характеристик синхронной машины в зависимости от тока при ограничении напряжения [7]. Состояние синхронной машины (1) определено следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\pi}{2}; \quad \Psi_d = \Psi_0; \quad \Psi_q = L_q I; \quad \Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}, \\ m &= \frac{3}{2} p I \Psi_0; \quad P = m \omega; \quad Q = p \omega \frac{3}{2} L_q I^2, \\ U &= \sqrt{r^2 I^2 + 2 p \omega r \Psi_0 I + \omega^2 p^2 \Psi^2}, \\ \omega &= \frac{\sqrt{(U^2 - r^2 I^2) \Psi^2 + r^2 (\Psi_0 I)^2 - r (\Psi_0 I)}}{p \Psi^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Экономичное управление по минимуму тока

Значения угла, определяющего положения вектора тока относительно потока постоянных магнитов Ψ_0 , доставляющее минимальные потери в меди, можно определить посредством функции энергетического состояния $F(\mu)$, характеризующей отношение потерь в меди P_n к электромагнитному моменту [8]. Значение этой функции зависит от величины и положения вектора тока. Условие, обеспечивающее минимум тока

явнополюсного синхронного двигателя, соответствует максимальному электромагнитному моменту m при различных значениях тока, определено посредством минимизации функции $F(\mu)$ энергетического состояния:

$$F(\mu) = \frac{\frac{3}{2} r i^2}{m} = \frac{r}{p \left[\frac{\Psi_0}{i} \cos \mu + (L_d - L_q) \cos \mu \sin \mu \right]} \quad (8)$$

$$\frac{\partial F(\mu)}{\partial \mu} = 0, \quad (9)$$

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

$$i_d = I \cos(\mu_{opt}); \quad i_q = I \sin(\mu_{opt})$$

Приравняв к нулю частную производную функции $F(\mu)$ (8), определены условия (9), позволяющие сформировать закон управления по минимуму тока. Подставив значения проекций тока i_d, i_q , отвечающих условиям (9), в уравнения (2), (3) и (6) получены функции угловой скорости, электромагнитного момента, реактивной мощности и мощности, затрачиваемой на перемещение машины, в зависимости от тока при ограничении напряжения. Реализации закона управления по минимуму тока (потерь в меди) предложено в работе [9], где рассмотрен способ управления, обеспечивающий линейное изменение электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами.

Экономичное управление при минимизации реактивной мощности

Повышение эффективности работы источника питания путём минимизации реактивной мощности Q , циркулирующей в обмотках двигателя, позволит передать исполнительному механизму большую мощность и увеличить максимальную скорость синхронного двигателя при ограничении тока и напряжения источника питания. Функция положения вектора тока μ , обеспечивающая выполнение условия минимизации реактивной Q мощности (4), определена в следующем виде:

$$Q = p\omega \frac{3}{2} [(L_d \cos \mu)^2 + L_q (\sin \mu)^2] I^2 + \Psi_0 I \cos \mu, \quad (10)$$

$$Q = 0; \mu_{opt} = \arccos \left[- \frac{\Psi_0 - \sqrt{4(L_d - L_q)^2 L_q I^2 + \Psi_0^2}}{2(L_d - L_q)I} \right],$$

Подставив проекции тока i_d, i_q , отвечающих условиям (10) в уравнения (2), (3) и (6), получены функции угловой скорости, электромагнитного момента $m(i)$, реактивной мощности $Q(i)$ и мощности P , затрачиваемой на перемещение машины, от тока в условиях ограничения напряжения при минимизации реактивной мощности.

В патентном документе RU № 2 829 487 представлен закон управления [10], позволяющий реализовать эти условия, обеспечивая линейность канала управления в статических и динамических режимах. Применение нелинейных регуляторов обеспечивает линейную зависимость вектора входных величин от задания. В качестве вектора выходных величин выступает электромагнитный момент и соотношение регулируемых переменных, доставляющее условия минимизации реактивной мощности. Линеаризация управления позволяет использовать методы подчинённого регулирования для синтеза регуляторов внутренних и внешних контуров. Возможность значительного форсирования управления, при ограничении напряжения, позволяет реализовать более высокое быстродействие всей системы, которое достигается за счёт сохранения условия минимизации реактивной мощности в динамических процессах. В таблице 2 приведены предельные оценки работы двигателя управлением (7) током по поперечной оси (способ 1), в условиях (9)



минимизации потерь в меди (способ 2) и при минимизации реактивной мощности (10) в условиях ограничения модуля вектора напряжения и тока на уровне 247 А часового режима работы S2.

Таблица 2

way	P , Kwat	m , Нм	ω , rad/c	I_n , А	U , V	Q , Kvar	ΔP , wat	P_{cm} , wat	Ψ , Weber	Ψ_d , Weber	$\cos\varphi$
1	10.0	63	164	247	41	11	258	68.3	0.031	0.021	0.7
2	13.3	71	188	247	41	6	258	63.4	0.027	0.017	0.89
3	15	60	251	247	41	0	258	54.8	0.02	0.013	1

Из представленных в таблице 2 результатов следует, при одинаковом значении тока потери в меди ΔP равны.

Заключение

В работе показано, что управление по минимуму тока явнополюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами улучшает эффективность использования мощности, подводимой к обмоткам двигателя, улучшая процессы электромеханического преобразования энергии. При ограничении тока и напряжения, за счёт более эффективного преобразования энергии, электромагнитный момент можно увеличить на 12%, скорость на 14,6%, мощность, передаваемая исполнительному механизму, увеличить на 33%, энергетическая характеристика $\cos(\varphi)$ увеличивается на 27% относительно управления током по поперечной оси. При минимизации реактивной мощности механическую мощность, передаваемую исполнительному механизму, можно увеличить на 50% относительно управления током по поперечной оси, а скорость двигателя, при ограничении напряжения и тока, увеличивается на 52%.

Список литературы.

1. Чернышев А. Ю. Электропривод переменного тока / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 – 213 стр.
2. 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.
3. Патент № 2397601, Рос. Федерация RU № 2397601; МПК H02P 21/00 (2006.01), H02P 21/12 (2006.01), H02P 27/06 (2006.01): Устройство векторного управления синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов: заявл. 26.09.06; опубл. 20.08.20, Бюл. N 23. Китанака Хидетоси (JP). Патентообладатель Мицубиси Электрик Корпорейшен (JP).
4. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. — М.: Высш. шк., 1991. — 430 с.
5. Steinmetz C. P. On the law of hysteresis // Proc. IEEE. 1984 Vol. 72, no. 2 P. 197–221. doi: 10.1109/PROC.1984.12842.
6. Хамитов Р. Н. Программа «Модель системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, учитывающая нелинейность характеристики намагничивания». Свидетельство о регистрации электронного ресурса: № 22381 от 14 декабря 2016 / Р. Н. Хамитов, Ю. П. Филюшов. – М.: ОФЭРНИО, 2016.
7. Филюшов Ю.П. Анализ законов управления явнополюсной синхронной машиной рудничного электровоза / Ю. П. Филюшов, А.А. Воевода, В. Ю. Филюшов // Известия



Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. С. 32 – 40.

8. Филюшов Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине/ Ю. П. Филюшов, В. Ю. Филюшов // Электричество. – 2011.– № 8.– С. 57 – 62.

9. Патент № 2805989 Рос. Федерация МПК H02P 21/22 (2016.01), H02P 21/12 (2006.01), СПК H02P 21/22 (2023.08), H02P 21/12 (2023.08); Способ управления синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов: заявл. 29.03.22; опубл. 24.10.23, Бюл. N 30. Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Заявитель ФГБОУ СГУВТ.

