

Филушов Юрий Петрович¹, доктор техн. наук, ведущий инженер, **Воевода Александр Александрович**², доктор техн. наук, профессор, **Палагушкин Борис Владимирович**³, доктор техн. наук, профессор, **Филушов Владислав Юрьевич**², аспирант

¹Федеральное государственное унитарное предприятие ПО «Север», Россия, 630027, г. Новосибирск, ул. Объединения, 3.

²Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

³Сибирский государственный университет водного транспорта, Россия, 630005, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

E-mail: filushov@mail.ru

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНОЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация: Актуальность работы обусловлена желанием улучшить эффективность электромеханического преобразования энергии в электроприводе переменного тока. Известное решение формирования электромагнитного момента синхронной машины с постоянными магнитами током по поперечной оси характеризуется существенным ростом реактивной мощности при увеличении нагрузки и скорости, что определяет рост потерь в стали, ограничивает максимальную скорость и не обеспечивает минимум тепловых потерь в явнopolюсной машине. Регулирование энергетических свойств электропривода вносит нелинейность в структуру управления, ухудшая его динамические свойства, не позволяя адекватно парировать возмущение по нагрузке, что негативно влияет на точность регулирования, снижая производительность технологических процессов.

Целью работы является линеаризация системы управления, обеспечивающего наряду с формированием электромагнитного момента регулирование энергетических свойств явнopolюсной синхронной машины с постоянными магнитами.

Метод. Для формирования управления применен метод обратной модели с линеаризацией по выходу. При синтезе многомерного управления использованы элементы математического аппарата алгебры Ли, где в качестве понятия векторного поля рассматривается фазовое пространство электрической машины.

Результаты. Электрическая машина представлена в виде нелинейного многомерного объекта, в котором выходными величинами являются электромагнитный момент и показатель, характеризующий энергетические свойства электропривода. Выполнена линеаризация системы управления явнopolюсной синхронной машины. На основании методологии комплексного подхода к синтезу многомерного управления обеспечен апериодический характер формирования электромагнитного момента при одновременном регулировании энергетических свойств электропривода. Решения для управляющих воздействий и выходных величин получены в аналитическом виде.

Выводы. Предлагаемое управление может быть использовано как в прецизионном электроприводе металлообрабатывающего и горного производства, так и в электроприводе транспорта с автономным источником питания, где в условиях ограничения напряжения и тока важно передать исполнительному механизму большую мощность и обеспечить большую скорость за счет регулирования реактивной мощности.

Ключевые слова: Электропривод, явнopolюсная синхронная машина, энергетические свойства, реактивная мощность, многомерное управление, линеаризация, диффеоморфизм, скобки Ли.

Информация о статье: принята 14 августа 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-44-51

Введение

Точность движения исполнительного механизма по заданной траектории зависит от точности формирования электромагнитного момента и быстродействия электропривода. Электромагнитный момент машины переменного тока характеризуется векторным произведением тока и потокосцепления, которое описывается гладкой нелинейной функцией [1]. Линеаризация основана на разложении нелинейной

функции в окрестности точки основного режима в ряд Тейлора. Такой подход определяет управление в системе вращающихся координат при стабилизации потокосцепления статора, ротора или потокосцепления в воздушном зазоре. По аналогии с машиной постоянного тока, обеспечивая высокое быстродействие, электромагнитный момент формируется с высокой точностью [2]. Но изменение электромагнитного момента в этих условия не отличается

экономичностью, поскольку поддерживать потокосцепление на уровне номинальной величины при различной нагрузке двигателя энергетически нецелесообразно [3]. Электропривод, являясь энергосиловой установкой, должен отвечать как динамическим, так и энергетическим требованиям. Регулирование энергетических свойств электропривода требует изменение потокосцепления, нарушая линейную зависимость электромагнитного момента от тока, ухудшая его динамические свойства. Неадекватное парирование возмущений ведет к погрешности регулирования и, в конечном счете, к снижению производительности технологического процесса. Известные решения параметрической линеаризации не обеспечивают желаемую динамику процессов по управлению и возмущению, снижая точность движения исполнительного механизма по заданной траектории. Поэтому такие электроприводы используются в системах, не требующих точности регулирования.

На примере явнополусной синхронной машины с постоянными магнитами (СДПМ) рассматривается линеаризация структуры управления при регулировании энергетических свойств электропривода. Выбор синхронной машины с постоянными магнитами обусловлен ее широким распространением в промышленности. Не имея скользящих контактов и не расходуя энергию на возбуждение, она выгодно отличается от других электрических машин. Особенностью машин с высококоэффициентными магнитами является большая магнитная проводимость поперечного потока по сравнению с проводимостью продольного потока при совпадении осей полюсов ротора и фазных обмоток статора, порождая реактивный момент и внося нелинейность в регулирование выходных величин электропривода [4]. Поэтому электромагнитный момент синхронной машины формируют током по поперечной оси [5], зарубежные аналоги системы МТРА (Maximum Torque per Ampere), рассматривая управление в фазовом пространстве системы вращающихся координат [6]. Такое решение определено простой зависимостью электромагнитного момента от управляющих воздействий и исключает образование реактивного момента. Для явнополусной синхронной машины управление током по поперечной оси не обеспечивает минимум тепловых потерь. С ростом нагрузки и скорости наблюдается значительный рост реактивной мощности, увеличение потери в стали, снижение эффективности управляющих воздействий и ограничение диапазона регулирования в области больших скоростей [7]. Для эффективного использования электрической машины и источника питания следует регулировать энергетические свойства электропривода [8], обеспечивая линейную зависимость выходных величин от задания.

Постановка задачи управления

Ставится задача линеаризации системы управления явнополусной синхронной машиной при регулировании энергетических свойств электропривода. Для решения многоцелевой задачи используют комплексный подход к синтезу управления, рассматривая электрическую машину в виде нелинейного

многомерного объекта. В качестве выходных величин выступают электромагнитный момент и отношение реактивной мощности к скорости, характеризующее эффективность использования мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Синтез управления осуществляется методом обратной модели с линеаризацией по выходу. Путем определенного регулирования фазы и модуля тока достигается линейность структуры управления при формировании электромагнитного момента и регулировании реактивной мощности. Задание энергетических свойств электропривода определено технологическими требованиями. Аперриодический характер изменения выходных величин явнополусной синхронной машины обеспечит прогнозируемость и точность регулирования траектории движения исполнительного механизма. Регулирование реактивной мощности дает возможность расширить диапазон изменения скорости в области больших частот и передать исполнительному механизму большую мощность в условиях ограничения напряжения и тока.

Математическое описание

Для одновременного изменения энергетических свойств и электромагнитного момента электрическая машина рассматривается в виде двухмерной системы [9], в которой токи и потокосцепления нелинейно связаны (2) с выходными величинами вектора \mathbf{Y} . Модель СДПМ описывается уравнениями Кирхгофа. Для наглядного формирования управления состояние электрической машины представлено в фазовом пространстве системы вращающихся координат d, q :

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

$$J \frac{d\omega}{dt} = m - m_c; \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} m \\ Q/\omega \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \mathbf{N} = \begin{bmatrix} \psi_0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$m = p \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = p \frac{3}{2} \psi i \cos(\phi);$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (2)$$

$$Q = p\omega \frac{3}{2} (\Psi_d i_d + \Psi_q i_q) =$$

$$p\omega \frac{3}{2} \psi i \sin(\phi); \psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}, \quad (3)$$

$\mathbf{\Psi}, \mathbf{I}, \mathbf{U}$ - вектор потокосцепления, тока и напряжения; \mathbf{R}, \mathbf{L} - матрицы сопротивлений и индуктивностей, Ψ_0 - приведенное 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 - приведенный 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), ϕ - угол, определяет положение вектора тока относительно ЭДС от потокосцепления статора. При некотором допущении $\cos(\phi)$

не отличается от стандартной оценки, обусловленной фазовым сдвигом основной гармоники напряжения питающей сети относительно синусоидального тока статора. Значение вектора управления \mathbf{U} ограничено по модулю u_{ogr} областью допустимого управления U , позволяющего сформировать предписанные значения выходных величин вектора \mathbf{Y} . Измеряемыми величинами являются токи, нелинейно связанные с вектором выходных величин гладкими скалярными функциями (2). Напряжение двигателя формируется узлом векторной ШИМ при оптимальной частоте коммутации силовых ключей. Частота коммутации достаточно высокая, что позволяет пренебречь временем задержки ШИМ на переключение транзисторов. Идентификатор состояния позволяет определить значения неизмеряемых переменных [10]. Его структура не рассматривается – полагают, что используются хорошо известные решения [11]. Рассмотренные допущения освобождают от изложения более строгой модели СДПМ, которая не столько помогает решению задачи управления, сколько затрудняет его.

Синтез многомерного управления СДПМ

Постановка задачи управления определена тем, что при регулировании энергетических свойств явнополюсной синхронной машины структура управления становится нелинейной, что не позволяет адекватно парировать возмущения, снижая точность движения исполнительного механизма по заданной траектории. Для ее решения рассматривается комплексный подход к синтезу многомерного управления явнополюсного СДПМ с применением метода обратной модели с линеаризацией по выходу [12]. Формирование электромагнитного момента и независимое регулирование энергетических свойств электропривода выполняется за счет определенного изменения величины и положения вектора тока.

При организации управления использованы элементы математического аппарата алгебры Ли. Этот аппарат применяется для линейных по управлению нелинейных объектов (*аффинных*) [13]. Производные Ли удобно использовать для непрерывных дифференцируемых функций некоторого класса объектов, к которому относятся и электрические машины. Понятие векторного поля соответствует фазовому пространству СДПМ. С помощью этого инструмента рассмотрена разрешимость задачи управления. Осуществив преобразование, основную систему уравнений (1) можно привести к общему нормальному виду (4), где в качестве регулируемых переменных выступают токи. Используя скобки Ли (6), можно составить матрицу (5) управляемости \mathbf{V} и определить ее ранг:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}}{dt} &= \mathbf{L}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{I} + \mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U} \\ (4) \quad \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -r & -L_q p \omega \\ L_d p \omega & -r \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p \omega N^T u & 1 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}\mathbf{U} &= \begin{bmatrix} u_d \\ u_q + p \omega \Psi_0 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\mathbf{V} = |\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B} \quad ad_F \mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}| = |\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B} \quad -(\mathbf{L}^{-1})^2 \mathbf{A}\mathbf{B}|, \quad (5)$$

$$ad_F \mathbf{L}^{-1}\mathbf{B} = \frac{d\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}}{dt} \mathbf{F} - \mathbf{L}^{-1}\mathbf{B} \frac{d\mathbf{F}}{dt}; \det \mathbf{V} \neq 0; \mathbf{F} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{I}, \quad (6)$$

Ранг матрицы \mathbf{V} соответствует числу уравнений основной системы (4), что говорит о ее полной управляемости [14]. Поскольку вектор \mathbf{Y} выходных величин (2) многомерной системы нелинейно зависит от вектора регулируемых переменных \mathbf{I} , линеаризация системы возможна при существовании диффеоморфизма в допустимой области значений регулируемых переменных [15]. Вектор \mathbf{Y} скалярных функций (2) будет являться диффеоморфизмом в том случае, если якобиан является не особым (т.е. не обращается в нуль какой-либо точке допустимой области управления). Диффеоморфизм (8) определен с помощью производной Ли (7):

$$\Phi_1 = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{I}^T} = \begin{bmatrix} -\Psi_q & \Psi_d \\ \Psi_d & \Psi_q \end{bmatrix}; \Psi_d > \frac{1}{2} \Psi_0, \quad (7)$$

$$\mathbf{Y} = \Phi_1 \mathbf{I}; \quad \mathbf{I} = \Phi_1^{-1} \mathbf{Y}, \quad (8)$$

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{I}^T} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \Psi^T} \frac{d\Psi}{dt} = \Phi \frac{d\mathbf{I}}{dt}, \quad (9)$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \mathbf{L},$$

$$\Phi_2 = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \Psi^T} = \begin{bmatrix} i_q & -i_d \\ i_d & i_q \end{bmatrix}; \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \Psi^T} \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \Phi_2 \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt},$$

Якобиан (7) может быть равен нулю в том случае, если в отсутствии нагрузки продольный ток статора существенно размагничивает постоянные магниты. Но такой режим не является рабочим и не входит в область допустимых значений тока. Для организации управления определена связь (9) производных вектора выходных величин и регулируемых переменных [16]. Умножая слева левую и правую часть уравнения (4) на матрицу Φ (9), можно осуществить переход к эквивалентной системе новых регулируемых переменных (10):

$$\Phi \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \Phi (\mathbf{L}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{I} + \mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U}), \quad (10)$$

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K}\mathbf{I} + \omega p \mathbf{D} \mathbf{N} + \mathbf{L}\Phi^{-1} \frac{\mathbf{Y}_{ref}}{T_z}; \quad \mathbf{K} = \mathbf{A} + \mathbf{L}\Phi^{-1}\Phi_1 T_z^{-1}, \quad (11)$$

$$\mathbf{Y}_{ref} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{ref} \\ Q_{ref}/\omega \end{bmatrix}; \frac{d\mathbf{Y}}{dt} = -\frac{\mathbf{Y}}{T_z} + \frac{\mathbf{Y}_{ref}}{T_z} \quad (12)$$

$$m = m_{ref} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_z}} \right). \quad (13)$$

Нелинейное управление (11) сформировано таким образом, чтобы изменение выходных величин (12) имело апериодический характер. Быстродействие системы характеризует параметр времени T_z , который определяет ограничение полосы пропускания внутренних контуров регулируемых переменных. Его выбор зависит от возможности источника питания и влияния помех [17]. Задание электромагнитного момента в совокупности с показателем энергетических свойств (12), связывающим реактивную мощность и скорость, определяет модуль и положение векторов, при котором формируются выходные величины [18–21]. В результате синтеза эквивалентная система (10) при управлении (11) становится линейной (12) относительно задания

Таблица 1. Параметры исследуемой машины

Table 1. Machine parameters

P _n [Вт]	M _n [Нм]	ω [рад/с]	I _ф [А]	Ψ_0 [Вб]	R [Ом]	L _q [Гн]	L _d [Гн]	cos(φ)	U _л [В]	η	p
31570	256	124	74	0.78	0.44	0.0072	0.0045	0.8	380	0.813	2

вектора \mathbf{Y}_{ref} , обеспечивая аperiodический характер изменения выходных величин (2). На рис. 1 представлена структура схемы многомерного управления СДПМ. В систему включен замкнутый контур скорости, формирующий задание электромагнитного момента для демонстрации подчиненного регулирования на базе предлагаемого управления. Задание электромагнитного момента ограничено его максимальным значением m_{max} при ограничении тока. Не усложняя задачу линеаризации, в работе не рассматривают связь показателя $\cos(\varphi)$ с другими энергетическими оценками [22], принимая задание реактивной мощности Q за равное нулю. Выбраны Π – регуляторы внешних и внутренних контуров, это позволяет наглядно отразить структурный синтез многомерного управления. Измеряя токи, напряжение и угловую скорость, идентификатор состояния вычисляет в мгновенные значения проекций вектора потокоцепления. Параметры исследуемой машины приведены в таблице 1.

Определенный выбор элементов матрицы \mathbf{K} регулятора (11) формирует компенсационные связи и определяет ограничение полосы пропускания внутренних контуров. Для исключения статической ошибки следует применять ПИ – регуляторы в контуре скорости и тока, это позволяет менее требовательно подойти к компенсации внутренних связей [23]. В результате структурных преобразований линейная эквивалентная форма (12) системы (4) отражает характер изменения выходных величин. Изменение электромагнитного момента представлено выражением (13).

Экспериментальные исследования.

Для проверки аналитических решений выполнено экспериментальное исследование модели управления СДПМ с внешним контуром скорости. Параметры двигателя приведены в таблице 1. Задание скорости $\omega = 190$ [рад/с] в условиях ограничения напряжения источника питания на уровне 311 [В] превышает номинальное значение скорости на 40%. Линейность структуры управления подтверждается на рис. 2 аperiodическим характером изменения электромагнитного момента. Его величина ограничена на уровне 200 [Нм]. При достижении заданной скорости набрасывается нагрузка. Величина модуля напряжения не выходит из заданных ограничений. В силу применения Π –регуляторов наблюдается просадка скорости под действием нагрузки. На рис. 3 показано изменение токов и потокоцеплений в системе вращающихся координат при минимизации реактивной мощности. Несмотря на изменение положения вектора тока, при регулировании энергетических свойств электропривода, формирование выходных величин явнополюсной машины осуществляется линейно от задания. Снижение потокоцепления статора достигает 0.5 величины потока постоянных магнитов, что определяет расширение диапазона регулирования в области больших скоростей.

Совпадение фазных значений тока на рис. 4 и первой гармоники напряжения подтверждает выполнение условий минимизации реактивной мощности. Время формирования электромагнитного момента соответствует $5T_z$. Полученные результаты достигнуты за счет комплексного подхода к синтезу

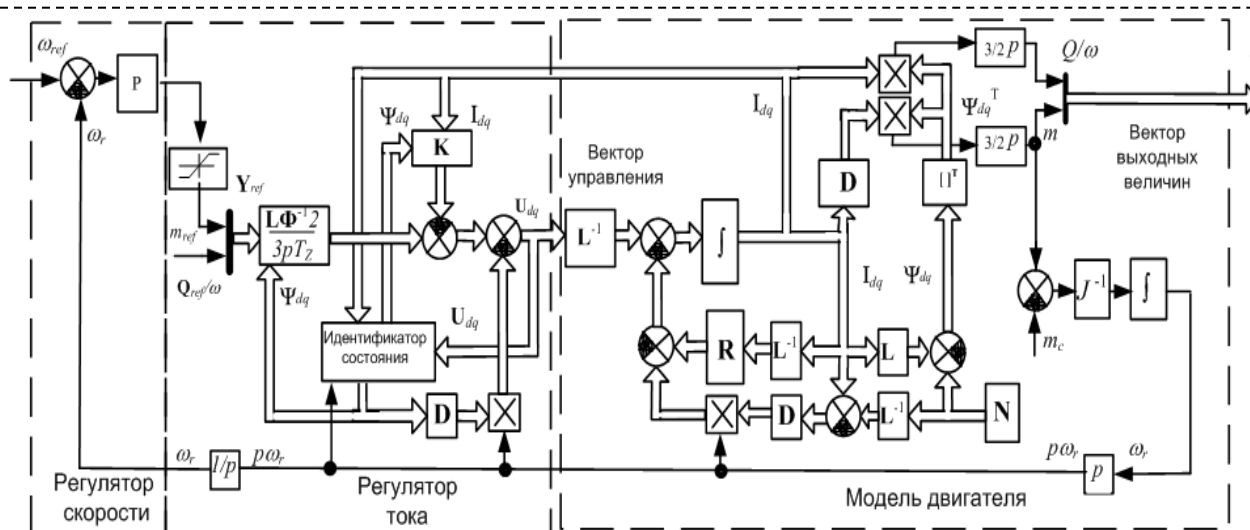


Рис. 1. Структура многомерного управления синхронной машиной с Π – регуляторами

Fig. 1. Multidimensional control structure of synchronous machine with Π – regulators

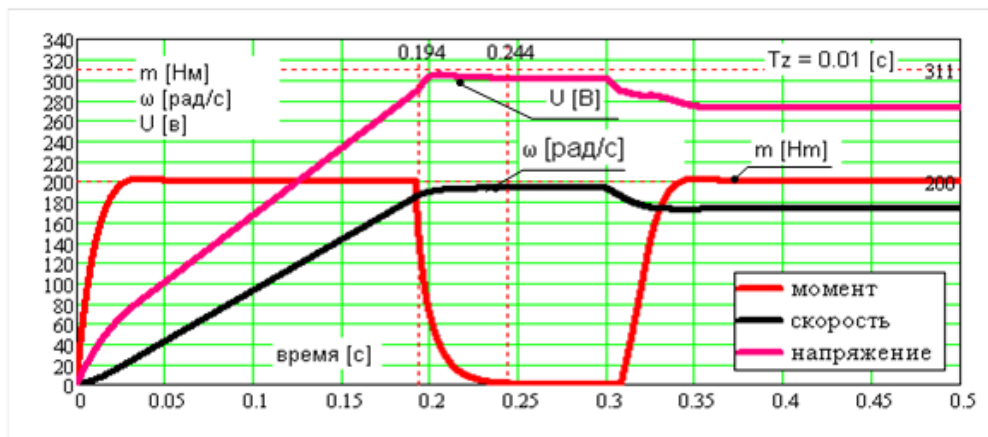


Рис. 2. Переходные процессы в линейаризованной системе управления электропривода с явнополюсной синхронной машиной при минимизации реактивной мощности

Fig. 2. Transients in linearized electric drive control system with a salient-pole synchronous machine under minimization of reactive power

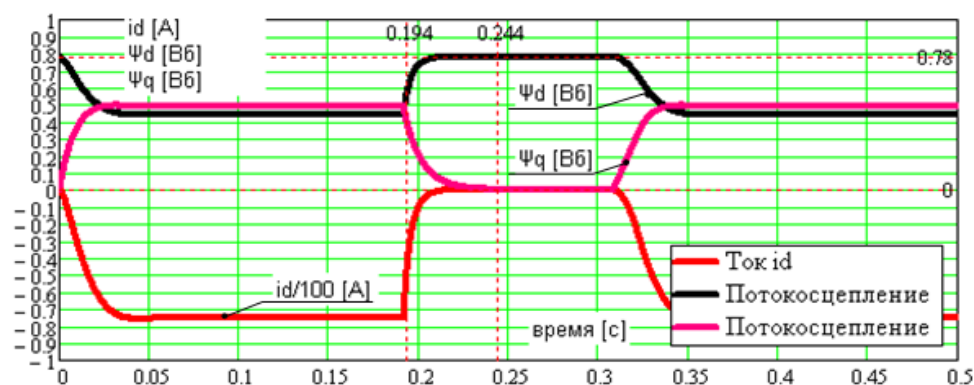


Рис. 3. Формирование токов и потокосцеплений при изменении состояния синхронной машины

Fig. 3. Formation of currents and current connections when changing the state of the synchronous machine

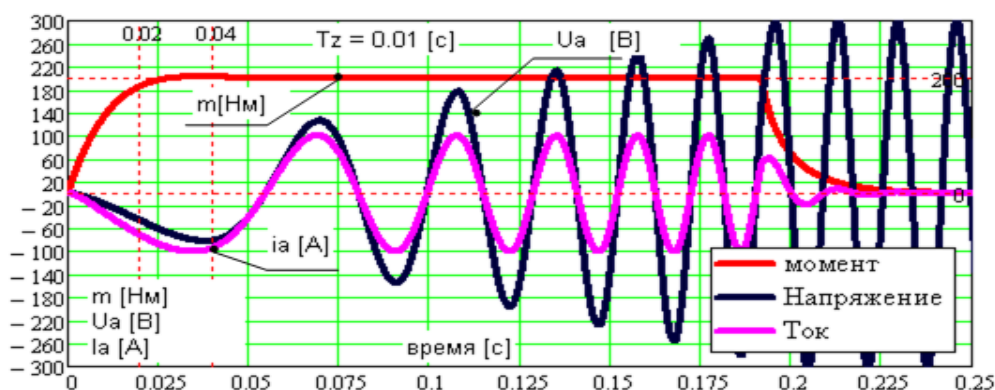


Рис. 4. Фазные значения тока и основной гармоники напряжения в условиях $\cos(\varphi) = 1$

Fig. 4. Phase values of current and first voltage harmonic under $\cos(\varphi) = 1$

многомерного управления, обеспечивающего линейаризации системы формирования электромагнитного момента при регулировании энергетических свойств явнополюсной синхронной машины с постоянными магнитами электропривода переменного тока.

Закключение

Решена задача линейаризации структуры многомерного управления явнополюсной синхронной

машины с постоянными магнитами, обеспечивающего наряду с формированием электромагнитного момента регулирование энергетических свойств электропривода. Для ее решения электрическая машина представлена в виде многомерного объекта, в котором выходными величинами являются электромагнитный момент и показатель, характеризующий энергетические свойства СДПМ при различной скорости и нагрузке. Применена методология комплексного подхода к синтезу управления.

Формирование управляющих воздействий осуществлено методом обратной модели с линеаризацией по выходу, используя элементы математического аппарата алгебры Ли, где в качестве понятия векторного поля рассматривается фазовое пространство электрической машины. Решение системы дифференциальных уравнений для выходных величин получено в аналитическом виде. Результаты моделирования подтверждают полученные для явнополюсной синхронной машины аналитические решения.

Рассмотренная линеаризация структуры управления синхронной машины с постоянными магнитами может быть использован как в прецизионном электроприводе металлообрабатывающего производства, так и в электроприводе транспорта с автономным источником питания, где в условиях ограничения напряжения и тока важно передать исполнительному механизму большую мощность и обеспечить большую скорость за счет регулирования реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Вейнгер А.М., Гусев А.С., Тартаковский Ю.С. О возможности регулируемого электропривода с синхронным двигателем // *Электричество*. – 1971. – № 9. – С. 60-64.
- 2 Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением. Автоматизированный электропривод / под ред. В.А. Дартау, Ю.П. Павлов, В.В. Рудаков. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.
- 3 Simakov G.M., Filushov Yu.P., Filushov V.Yu. Combined Control of an Asynchronous Machine with Squirrel – Cage Rotor // 2016 13th International Scientific – Technical Conference APEIE – 39281 / pp. 175-179.
- 4 Смирнов А.Ю. Особенности конструирования и анализа высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // *Электротехника и электроэнергетика: Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева* – 2013 – № 4 (101) . – С. 231-235.
- 5 Управление вентильными электроприводами постоянного тока / под ред. О.В. Слежановский., Е.Л. Лебедев, В. Е. Неймарк. – М.: Энергия, 1970. – 202 с.
- 6 Zhenyu Yu, Application Report, SPRA524, Digital Signal Processing Solutions March 1999, Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns. 1999. – pp. 24 – 28.
- 7 Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Schroder, P.– Berlin: Springer, 2001. – S. 1172.
- 8 Востриков А.С. Филюшов Ю.П., Прохоренко Е.В. Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2018. – Том 70. – №1. – С. 39-50.
- 9 Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Управление синхронной машиной при минимизации тепловых потерь в условиях минимума реактивной мощности // *Электротехника*. – 2013. – № 12. – С. 57-63.
- 10 Vladimir V. Pankratov, Yelena A. Zima. New off - line identification method of induction motor parameters // *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002: Workshop Proceedings*, 2002. Vol.2. – Novosibirsk, Russia: Novosibirsk state technical university, 2002. – pp. 85-87.
- 11 Гаврилин А.Н., Кладиев С.Н., Глазырин А.С., Боловин Е.В., Полищук В.И. Идентификация параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным около резонансным частотам // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 158-177
- 12 Воевода А.А., Филюшов Ю.П. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом // *Вестник Рязанского государственного технического университета*. – 2017. – № 61. – С. 88-95.
- 13 Алгебры Ли и группы Ли / под ред. Серр Ж. – П.: Москва. Мир, 1969. – 231с.
- 14 Справочник по теории автоматического управления. / под ред. А.А. Красовского – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. – 712 с.
- 15 Theory Nonlinear and Multivariable System. Automatic Control. / Kim D.P. – Seol: Harnol, 2000. T2. – 558 p.
- 16 Филюшов В.Ю. Линеаризация нелинейного трехканального динамического объекта обратной связью // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2017. – Том 66. – №1 – С. 43-49.
- 17 Принцип построения быстродействующих следящих систем и регуляторов /А.Я. Лернер. – М.: Энергоатомиздат, 1961. – 168 с.
- 18 Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине // *Электричество*. 2011. – № 8. – С. 57-62.
- 19 Симаков Г.М., Филюшов Ю.П. Анализ энергетических характеристик электропривода переменного тока в переходных процессах // *Первая Всероссийская научно – практическая конференция. Энергетика и энергосбережение: теория и практика*. – Кемерово, 2015. – С. 34-37.
- 20 Simakov G.M., Filushov, Yu.P. Energy– efficient control of synchronous machine // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. IEEE Catalog Number CFP14471PRT. Vol. 7. pp. 153-158.
- 21 Филюшов, Ю.П. Состояние и оценка качества работы электропривода переменного тока // *Силовая электроника*. – 2013. – № 1. – С. 36-39 .
- 22 Симаков, Г.М., Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю. Формирование энергетически эффективных законов управления быстродействующим электроприводом переменного тока // *Седьмая научно-практическая конференция молодых ученых: Электротехника, энергетика, машиностроение*. – Новосибирск, 2015. – С. 58-62
- 23 Усынин Ю.С., Шишков А.Н., Лохов С.П., Журавлев А.М. Параметрическая оптимизация частотно – регулируемых электроприводов // *Вестник Южно–Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37. – С. 30-33.

Yuri P. Filushov¹, C. Sc. in Engineering, leading engineer designer. **Alexander A. Voevoda**², Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Boris V. Palagushkn**³, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Vladislav Yu. Filushov**², graduate student

¹ FSUE "Sever", Russian Federation, 630027, Novosibirsk, street Association 3.

² Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Ave, 20.

³ Siberian State University of Water Transport. Russian Federation, 630005, Novosibirsk, Schetinkina st. main building 33

LINEARIZATION OF A CONTROL SYSTEM OF SALIENT-POLE SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS IN THE REGULATION OF THE ENERGY CHARACTERISTICS

Abstract: *The relevance of the work is due to the desire to improve energy efficiency while maintaining the dynamic characteristics of the AC drive. The known solution for the formation of the electromagnetic torque of a synchronous machine with permanent magnets by a current along the transverse axis is characterized by a significant increase in reactive power with an increase in load and speed, which determines the increase in losses in steel, limits the maximum speed and does not provide a minimum of thermal losses in a salient-pole machine. Regulation of the energy properties of the electric drive introduces nonlinearity into the control structure, worsening its dynamic properties, not allowing to adequately counteract the load disturbance which adversely affects the accuracy of regulation, reducing the performance of technological processes. Therefore, the dynamic properties characterizing the efficiency of the AC drive depend on the solution of the linearization problem.*

The aim of the work is the linearization of the control system, which provides, along with the formation of the electromagnetic moment, the regulation of the energy properties of a salient-pole synchronous machine with permanent magnets.

Method. *The method of inverse model with output linearization is applied for control formation. Elements of the mathematical apparatus of the Lie algebra are used in the synthesis of multidimensional control, where the phase space of the electric machine is considered as the concept of the vector field.*

Results. *The electric machine is presented in the form of a multidimensional object, in which the output values are the electromagnetic torque and the indicator characterizing the energy properties of the electric drive. The linearization of the control system of a salient-pole synchronous machine is performed. On the basis of the methodology of an integrated approach to the synthesis of multidimensional control, the aperiodic nature of the formation of the electromagnetic moment is provided with simultaneous regulation of the energy properties of the electric drive. Solutions for control actions and output values are obtained in the analytical form.*

Summary. *The proposed control can be used both in the precision electric drive of metalworking production, and in the vehicle electric drive with an autonomous power source, where in conditions of voltage and current limitation it is important to transfer to the executive mechanism more power and provide greater speed by regulating reactive power.*

Keywords: *Electric motor, salient-pole synchronous machine, energy properties, reactive power, multidimensional control, linearization, diffeomorphisms, Lie brackets.*

Article info: received August 14, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-44-51

REFERENCES

- 1 Vejnger A.M., Gusev A.S., Tartakovskij Yu.S. O vozmozhnosti reguliruемого электропривода с синхронным двигателем // *Elektrichestvo*. – 1971. – № 9. – S. 60-64.
- 2 Teoreticheskie osnovy postroeniya chastotnykh электроприводов с векторным управлением. Avtomatizirovannyj электропривод/ pod red. V.A. Dartau, Yu.P. Pavlov, V.V. Rudakov. – M.: Energiya, 1980. – 184 s.
- 3 Simakov G.M., Filushov Yu.P., Filushov V.Yu. Combined Control of an Asynchronous Machine

with Squirrel – Cage Rotor // 2016 13th International Scientific – Technical Conference APEIE – 39281 / pp. 175-179.

- 4 Smirnov A.Yu. Osobennosti konstruirovaniya i analiza vysokooborotnykh синхронных машин с postoyannymi magnitami na rotore // *Elektrotehnika i elektroenergetika: Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* – 2013 – № 4 (101) . – S. 231-235.

- 5 Upravlenie ventil'nymi elektroprivodami postoyannogo toka / pod red. O.V. Slezhanovskij., E.L. Lebedev, V. E. Nejmark. – M.: Energiya, 1970. – 202 s.
- 6 Zhenyu Yu, Application Report, SPRA524, Digital Signal Processing Solutions March 1999, Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns. 1999. – pp. 24 – 28.
- 7 Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Schroder, P.– Berlin: Springer, 2001. – S. 1172.
- 8 Vostrikov A.S. Filyushov Yu.P., Prohorenko E.V. Mnogokriterial'nyj sintez mnogomernogo upravleniya elektroprivodom peremennogo toka // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – Tom 70. – №1. – S. 39-50.
- 9 Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Upravleniya sinhronnoj mashinoj pri minimizacii teplovyh poter' v usloviyah minimuma reaktivnoj moshchnosti // Elektrotehnika. – 2013. – № 12. – S. 57-63.
- 10 Vladimir V. Pankratov, Yelena A. Zima. New off - line identification method of induction motor parameters // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2002: Workshop Proceedings, 2002. Vol.2. – Novosibirsk, Russia: Novosibirsk state technical university, 2002. – pp. 85-87.
- 11 Gavrilin A.N., Kladiev S.N., Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Polishchuk V.I. Identifikaciya parametrov mekhanicheskoy sistemy vibracionnogo elektromagnitnogo aktivatora po granichnym okolozonansnym chastotam // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2019. – T. 330. – No 4. – S. 158-177
- 12 Voevoda A.A., Filyushov Yu.P. Sintez algoritma upravleniya mnogokanal'nym ob'ektom // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017.– № 61. – S. 88-95.
- 13 Algebrы Li i gruppy Li / pod red. Serr ZH. – P.: Moskva. Mir, 1969. – 231s.
- 14 Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. / pod red. A.A. Krasovskogo – M.: Nauka.

Библиографическое описание статьи

Филошов Ю.П., Воевода А.А., Палагушкин Б.В., Филошов В.Ю. Линеаризация системы управления явнополюсной синхронной машиной с постоянными магнитами при регулировании энергетических характеристик // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 5 (145). – С. 44-51.

Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1987. – 712 s.

15 Theory Nonlinear and Multivariable System. Automatic Control. / Kim D.P. – Seol: Harnol, 2000. T2. – 558 p.

16 Filyushov V.Yu. Linearizaciya nelinejnogo trekhkanal'nogo dinamicheskogo ob'ekta obratnoj svyaz'yu // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – Tom 66. – №1 – S. 43-49.

17 Princip postroeniya bystrodejstvuyushchih sledyashchih sistem i regulyatorov /A.YA. Lerner. – M.: Energoatomizdat, 1961. – 168 s.

18 Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Optimizaciya elektromagnitnyh processov v sinhronnoj mashine // Elektrichestvo. 2011. – № 8. – S. 57-62.

19 Simakov G.M., Filyushov Yu.P. Analiz energeticheskikh karakteristik elektroprivoda peremennogo toka v perekhodnyh processah // Pervaya Vserossiyskaya nauchno – prakticheskaya konferenciya. Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika. – Kemerovo, 2015. – S. 34-37.

20 Simakov G.M., Filushov, Yu.P. Energy– efficient control of synchronous machine // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. IEEE Catalog Number CFP14471PRT. Vol. 7. pp. 153-158.

21 Filyushov, Yu.P. Sostoyanie i ocenka kachestva raboty elektroprivoda peremennogo toka // Silovaya elektronika. – 2013. – № 1. – S. 36-39 .

22 Simakov, G.M., Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Formirovanie energeticheski effektivnyh zakonov upravleniya bystrodejstvuyushchim elektroprivodom peremennogo toka // Sed'maya nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyh uchenykh: Elektrotehnika, energetika, mashinostroenie. – Novosibirsk, 2015. – S. 58-62

23 Usynin Yu.S., Shishkov A.N., Lohov S.P., ZHuravlev A.M. Parametricheskaya optimizaciya chastotno – reguliruemyyh elektroprivodov // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – 2012. – № 37. – S. 30-33.

Reference to article

Filushov Yu.P. Voevoda A.A., Palagushkn B.V., Filushov V.Yu. Linearization of a control system of salient-pole synchronous machine with permanent magnets in the regulation of the energy characteristics. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 5 (145), pp. 44-51.