

Улучшенное подключение и назначение демпфирования на основе пассивного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами

Мохамед Аззи ^{a,b,*}, Лотфи Багли^a, Эхсан Джамшидпур^a, Фатифат Тхунтонг^b, Нуреддин Такорабет^a

^a Университет Лотарингии, Грин, Нанси, F54000, Франция

^b Научно-исследовательский центр возобновляемой энергии, кафедра подготовки преподавателей электротехники, факультет технического образования, Технологический университет имени короля Монгкута в Северном Бангкоке, 1518, улица Прачарат 1, Вонгсаванг, Бангсуэ, Бангкок 10800, Таиланд

Аннотация

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (PMSM) широко используются в высокопроизводительных приводных системах благодаря своей высокой эффективности и динамическим характеристикам. Однако управление ими остается сложной задачей из-за нелинейной динамики, вариаций параметров и неизмеримых внешних помех, особенно колебаний крутящего момента нагрузки. В данном исследовании предлагается усовершенствованная схема пассивного управления с учетом взаимосвязи и демпфирования (IDA-PBC), разработанная в рамках гамильтонового управления портами (PCH), для решения этих задач. В систему встроен нелинейный наблюдатель помех, предназначенный для оценки и компенсации в реальном времени суммарных несогласованных помех, возникающих из-за неопределенности параметров и внешних нагрузок. Кроме того, для производства желаемых заданных значений тока в нелинейной системе привода используется стратегия управления на основе плоскостности, обеспечивающая точное отслеживание изменяющихся во времени команд скорости. Такой комплексный подход сохраняет энергетическую структуру системы, позволяя проводить систематический анализ устойчивости и повышая надёжность. Предложенная схема управления также отличается низкой сложностью за счет ограниченного числа настраиваемых параметров, что облегчает ее практическую реализацию. Результаты моделирования и экспериментальных исследований в различных условиях эксплуатации демонстрируют эффективность и устойчивость предложенного метода. Сравнительный анализ с традиционным пропорционально-интегральным (PI) управлением и стандартными стратегиями IDA-PBC подтверждает его способность справляться с помехами и поддерживать динамические характеристики.

Ключевые слова: управление энергией Гамильтона; пассивное управление с назначением взаимосвязей и демпфирования (IDA-PBC); электроприводы; синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM); регулирование скорости

0 Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (PMSM) зарекомендовали себя как ведущая технология в системах электропривода благодаря своей высокой эффективности, повышенной удельной мощности, превосходной динамической характеристике и низким требованиям к техническому обслуживанию. Их широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как электромобили, аэрокосмическая отрасль и возобновляемая энергетика, подчеркивает их решающую роль в эволюции современных электромеханических систем [1]. Несмотря на эти преимущества, синхронные двигатели с постоянными магнитами также обладают значительными сложностями управления, обусловленные их нелинейной динамикой. Эти нелинейности в основном вызваны изменяющимися во времени параметрами системы и непредсказуемыми помехами крутящего момента нагрузки, что может привести к ухудшению характеристик, колебаниям напряжения в звене постоянного тока и даже потенциальной неустойчивости в системе привода [2,3].

Достижение высокоэффективного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при обеспечении устойчивости и сохранении простоты реализации остается актуальной исследовательской задачей. Традиционные стратегии управления, такие как PI-регулирование, часто недостаточны для преодоления неопределенностей системы и динамических изменений. Для решения этих проблем был исследован широкий спектр передовых нелинейных стратегий управления, включая управление скольльзящим режимом [4], модельное прогнозирующее управление [5] и управление активным подавлением помех [6]. Эти методы продемонстрировали улучшенные динамические характеристики и повышенную устойчивость в условиях неопределенности. Тем не менее, многие из этих подходов включают сложные законы управления или требуют точного моделирования и настройки системы, что может ограничивать их применимость в реальных промышленных условиях.

В этом контексте стратегии управления на основе энергии привлекают все больше внимания благодаря своему систематическому и физически обоснованному подходу к управлению нелинейными системами. Разработанная в рамках теории управления [7,8], IDAPBC продемонстрировала эффективность в различных приложениях, включая роботизированные системы [9-11], летательные аппараты, такие как БПЛА и платформы вертикального взлета и посадки [12,13], а также передовые энергетические системы, включающие микросети переменного/постоянного тока и силовую электронику [14,15]. Ключевое преимущество методологии PCH заключается в ее способности сохранять энергетическую структуру системы в замкнутой конфигурации. Используя структуру IDA-PBC, можно проектировать регуляторы, обеспечивающие пассивность системы, используя при этом функцию энергии замкнутой системы непосредственно в качестве функции Ляпунова. Это облегчает как синтез регулятора, так и анализ устойчивости. В недавних исследованиях IDA-PBC эффективно применялась к приводам PMSM для управления скоростью при известных и неизвестных условиях крутящего момента нагрузки [16-19]. Однако эти подходы, как правило, предполагают точное знание параметров системы и не в полной мере учитывают реальные неопределенности, такие как изменяющиеся во времени нагрузки или смещение параметров.

Исходя из этих соображений, в данной статье предлагается новый подход к управлению, который объединяет нелинейный наблюдатель помех с IDA-PBC структурой для повышения надёжности и динамических характеристик систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. Основные результаты заключаются в следующем:

- повышенная устойчивость. В систему встроены нелинейный наблюдатель помех для оценки суммарных несогласованных помех, включая изменения параметров и внешние моменты нагрузки, что позволяет осуществлять компенсацию с опережением;
- простота и практичность. Структура управления остается относительно простой, с ограниченным числом настраиваемых параметров, что облегчает практическую реализацию;
- структура на основе гамильтониана. Сохраняет структуру PCH, которая поддерживает систематический анализ устойчивости и согласованность на основе энергии.
- улучшенные динамические характеристики. Объединяет производные желаемых переменных состояния для достижения более оперативной переходной реакции и более точного отслеживания изменяющихся во времени опорных величин, что имеет решающее значение для высокопроизводительных приводов PMSM.

Структура статьи: сначала приводится краткий обзор моделирования управления с использованием гамильтоновой энергии, выбранной стратегии управления и проектирования наблюдателя состояния. Затем предоставляется подробная модель системы привода синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM). Далее основная часть статьи посвящена предлагаемому подходу

к управлению с использованием гамильтоновой энергии, который дополнен онлайн-оценкой параметров с помощью наблюдателя состояния.

В заключение, предложенная стратегия управления подтверждается результатами моделирования и экспериментальными данными при различных условиях эксплуатации, а также проводится сравнение с классической стратегией управления на основе PI-регуляторов. Это сопровождается подробным обсуждением, содержащим углубленный анализ эффективности предложенного подхода.

1. Гамильтоново моделирование и управление синхронным двигателем с постоянными магнитами

1.1. Пассивное управление с назначением взаимосвязей и демпфирования: IDA-PBC

Методология IDA-PBC (также известная как управление энергией Гамильтона) предлагает структурированный и физически обоснованный подход к синтезу нелинейных регуляторов. Ее основной принцип заключается в формировании желаемой функции запасенной энергии, также называемой функцией Гамильтона $H_d(x)$, которая достигает своего минимума в желаемой точке равновесия или опорной точке $sta_{tex,ref}$, при сохранении энергетического баланса на протяжении всей динамики системы. Первоначально разработанная для систем с гамильтоновым управлением портами (PCH), представленных в канонической форме (1), структура IDA-PBC была строго формализована, где подробно описана пошаговая процедура построения, а также необходимые условия для матриц взаимосвязей и рассеяния.

Первоначально разработанная для систем с гамильтоновым управлением портами (PCH), представленных в канонической форме (1), структура IDA-PBC была строго формализована, где подробно описана пошаговая процедура построения, а также необходимые условия для матриц взаимосвязей и рассеяния.

Хотя структура IDA-PBC изначально была разработана для систем, которые естественным образом обладают гамильтоновой структурой, ее применимость распространяется на более широкий класс нелинейных систем, выходящих за рамки формализма PCH, как показано в [7,8]. Общая форма системы PCH задается следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = [J - R] \cdot \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x) \cdot u + \zeta \\ y = g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

where y is the output variable, $u(t)$ is the input control variable, J is an interconnection matrix such that $J = -J^T$, R is the dissipation matrix (positive matrix, $R = R^T \geq 0$), $H(x)$ is the energy function, also referred to as the Lyapunov function, $g(x)$ is the plant's port characteristic matrix, and $\xi(t)$ is the disturbance variable.

Соответственно, желаемая динамика замкнутой системы в рамках модели IDA-PBC выражается следующим образом:

$$\dot{x} = [J_d - R_d] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (2)$$

where J_d is the desired interconnection matrix, $J_d = -J_d^T$; R_d is the desired dissipation matrix, $R_d = R_d^T \geq 0$; and H_d is the desired energy function.

Для синтеза управляющего воздействия и необходимо обеспечить эквивалентность между желаемой динамикой замкнутой системы (2) и фактическим представлением разомкнутой системы (1). Это приводит к следующему соответствующему уравнению:

$$[J_d - R_d] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = [J - R] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u + \zeta \quad (3)$$

Впоследствии мы можем вывести следующий закон управления:

$$u = g^{-1}(x) \left([J_d - R_d] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} - [J - R] \frac{\partial H(x)}{\partial x} - \zeta \right) \quad (4)$$

Используя принципы теории Ляпунова, методология IDA-PBC обеспечивает достижение глобальной асимптотической сходимости управляющей выходной переменной [7,8].

1.2 Усовершенствованное пассивное управление с назначением межсоединений и демпфирования: IDA-PBC

В реальных условиях эксплуатации желаемая точка равновесия для такой системы, как привод с постоянными магнитами, вряд ли останется постоянной, а будет изменяться со временем в ответ на различные условия эксплуатации, такие как колебания нагрузки или изменение заданных параметров скорости. Кроме того, очень медленные изменения могут быть нежелательны для приложений, требующих быстрого реагирования. Для решения этой задачи мы вводим понятие ошибки слежения, обозначаемой как $e = x_{ref} - x$. Эта ошибка представляет собой отклонение между фактическим состоянием системы и желаемой, изменяющейся во времени, точкой равновесия. Кроме того, скорость изменения ошибки слежения, $\dot{e}$, также имеет значение для проектирования системы управления.

Учитывая непостоянный характер желаемой точки равновесия, гамильтоново управление с обратной связью может быть дополнительно выражено следующим образом:

$$\dot{e} = [J_d - R_d] \frac{\partial H_d(e)}{\partial e} \quad (5)$$

Мы установили, что желаемая точка равновесия, обозначаемая x_{ref} , демонстрирует глобальную экспоненциальную устойчивость. Это гарантирует, что состояния системы x экспоненциально сходятся к x_{ref} независимо от начальных условий. Важно отметить, что x_{ref} служит эталонной траекторией для фактического вектора состояния x , и его эволюция определяется исключительно внешними воздействиями или помехами. В результате x_{ref} остается независимым от внутренней динамики системы, что приводит к следующей формулировке:

$$\frac{\partial H_d(e)}{\partial e} = - \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \quad (6)$$

Затем динамику замкнутой системы, учитывая изменяющийся во времени характер опорной траектории, можно переформулировать в рамках РСН следующим образом:

$$\dot{X} = [J_d - R_d] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} + \dot{X}_{ref} \quad (7)$$

Новый закон управления u можно рассчитать следующим образом:

$$u = g^{-1}(x) \left([J_d - R_d] \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} + \dot{x}_{ref} - [J - R] \frac{\partial H(x)}{\partial x} - \zeta \right) \quad (8)$$

Этот модифицированный закон управления явно учитывает нестатическое поведение желаемого состояния, тем самым повышая способность системы отслеживать динамические эталонные траектории, сохраняя при этом пассивную структуру исходной формулировки управления (рис. 1).

1.3 Модель приводной установки с PMSM

Исследуемая система состоит из трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами (PMSM) без явно выраженных полюсов, питаемой от инвертора напряжения (VSI). Схематическое изображение системы представлено на рис. 2. Динамическое поведение системы может быть описано во вращающейся системе координат d-q с использованием следующих уравнений:

$$L_d = L_q = L \quad T_e = p\phi i_q \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} (v_d - Ri_d + p\omega Li_q - v_{td}) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} (v_q - Ri_q - p\omega Li_d - p\omega\phi - v_{tq}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_m} (p\phi i_q - T_l - f\omega) \end{cases} \quad (10)$$

$$\underbrace{[J_d - R_d] \cdot \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} + \frac{dx_{ref}}{dt}}_{\text{Control Law}} = \underbrace{[J - R] \cdot \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x) \cdot u + \zeta}_{\text{Plant}}$$

Рис. 1. Концепция управления энергией гамильтониана или пассивного управления.

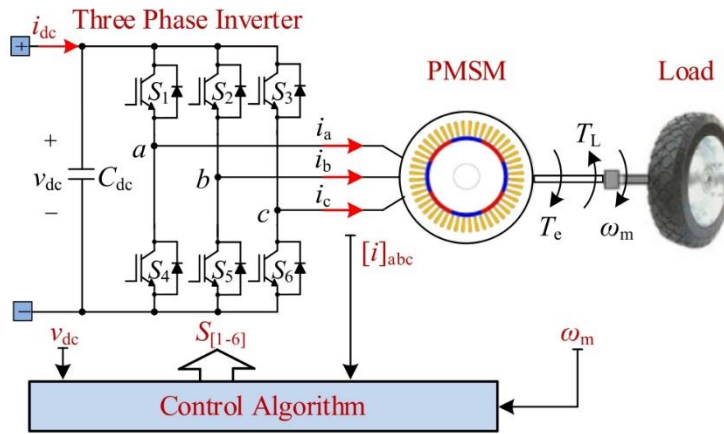


Рис. 2. Трехфазная система привода PMSM.

где v_d и v_q — прямое и квадратурное напряжения двигателя (V), i_d и i_q — прямые и квадратурные токи двигателя (A), p — число пар полюсов, ω — механическая угловая частота (рад/с), ϕ — потокосцепление постоянного магнита (Wb), T_e — электромагнитный момент (Nm), T_l — момент нагрузки (Nm), f — коэффициент трения (Нмс/рад), J_m — момент инерции ротора (Kgm^2), R — сопротивление двигателя (Ом), L_d и L_q — индуктивности по осям d и q (Гн) соответственно.

v_{td} и v_{tq} представляют собой соответственно падение напряжения (V) по осям d и q в синхронном двигателе с постоянными магнитами (PMSM) и инверторе. Эти падения напряжения объясняют различные потери мощности, возникающие во время работы двигателя.

Для переформулирования системы управления PMSM в форме РСН, как описано в уравнении (1), мы определяем переменную состояния, вход и выход следующим образом:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix}; \zeta = \begin{bmatrix} -\frac{v_{id}}{L} \\ -\frac{v_{iq}}{L} \\ -\frac{T_1}{J_m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{and } u = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}; g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Функция энергии His определяется следующим образом:

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x \quad (12)$$

где положительно определённая диагональная матрица Q определяется следующим образом:

$$Q = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & J_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

Следовательно, $H(x)$ можно записать следующим образом:

$$H(x) = \frac{1}{2} (Li_d^2 + Li_q^2 + J_m \omega^2) \quad (14)$$

Градиент функции Гамильтона по переменным состояния задается формулой:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial x_1} \\ \frac{\partial H}{\partial x_2} \\ \frac{\partial H}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Li_d \\ Li_q \\ J_m \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lx_1 \\ Lx_2 \\ J_m x_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Следовательно, матрица взаимосвязей J и матрица демпфирования R могут быть сформулированы следующим образом:

$$J - R = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L^2} & \frac{p\omega}{L} & 0 \\ -\frac{p\omega}{L} & -\frac{R}{L^2} & \frac{-p\phi}{LJ_m} \\ 0 & \frac{p\phi}{LJ_m} & -\frac{f}{J_m^2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \frac{p\omega}{L} & 0 \\ -\frac{p\omega}{L} & 0 & \frac{-p\phi}{LJ_m} \\ 0 & \frac{p\phi}{LJ_m} & 0 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} \frac{R}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f}{J_m^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Наконец, полное представление пространства состояний привода синхронного двигателя с постоянными магнитами в форме гамильтоновой системы выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L^2} & \frac{p\omega}{L} & 0 \\ -\frac{p\omega}{L} & -\frac{R}{L^2} & \frac{-p\phi}{LJ_m} \\ 0 & \frac{p\phi}{LJ_m} & -\frac{f}{J_m^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Li_d \\ Li_q \\ J_m\omega \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_{ld}}{L} \\ -\frac{v_{lq}}{L} \\ -\frac{T_l}{J_m} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{18}$$

1.4 Предлагаемый адаптивный гамильтонов закон управления

Вектор заданного значения X_{ref} приближается к вектору состояния X . В результате вектор состояния ошибки отслеживания может быть выражен следующим образом:

$$e = X_{\text{ref}} - X = \begin{bmatrix} x_{1\text{ref}} - x_1 \\ x_{2\text{ref}} - x_2 \\ x_{3\text{ref}} - x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \tag{19}$$

Желаемая функция энергии Гамильтона определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
H_d(x) &= \frac{1}{2} e^T Q e \\
H_d(x) &= \frac{1}{2} (Le_1^2 + Le_2^2 + J_m e_3^2)
\end{aligned} \tag{20}$$

Затем градиент H_d выражается следующим образом:

$$\frac{\partial H_d(x)}{\partial x} = - \begin{bmatrix} Le_1 \\ Le_2 \\ J_m e_3 \end{bmatrix} \tag{21}$$

Для того, чтобы найти $J_d - R_d$, необходимо сначала определить матрицы управления J_c и R_c таким образом, чтобы:

$$J_d = J_c + J; R_d = R_c + R \tag{22}$$

Впоследствии мы придали J_c и R_c ту же структуру, что и J и R .

$$J_c = \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_j}{L} & 0 \\ -\frac{k_j}{L} & 0 & \frac{-k_j}{LJ_m} \\ 0 & \frac{k_j}{LJ_m} & 0 \end{bmatrix}; R_c = \begin{bmatrix} \frac{K_{r1}}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{r1}}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{r2}}{J_m^2} \end{bmatrix} \tag{23}$$

где K_{r1} , K_{r2} и K_j — коэффициенты усиления регулятора демпфирования.

Таким образом, уравнение (7) можно выразить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} -\frac{R+K_{r1}}{L^2} & \frac{p\omega+k_i}{L} & 0 \\ -\frac{p\omega+k_i}{L} & -\frac{R+K_{r1}}{L^2} & -\frac{p\phi+k_j}{LJ_m} \\ 0 & \frac{p\phi+k_j}{LJ_m} & -\frac{f+K_{r2}}{J_m^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Le_1 \\ Le_2 \\ J_m e_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_{1ref} \\ \dot{x}_{2ref} \\ \dot{x}_{3ref} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Наконец, согласно (8), закон управления можно решить и выразить следующим образом:

$$K_j = \frac{[T_l + J_m \dot{x}_{3ref} + K_{r2}(\omega_{ref} - \omega) + f\omega_{ref} - p\phi i_{qref}]}{(i_{qref} - i_q)}$$

$$V_d = v_{td} + L\dot{x}_{1ref} + K_{r1}(i_{dref} - i_d) + Ri_{dref} - LK_j(i_{qref} - i_q) - Lp\omega i_{qref}$$

$$V_q = v_{tq} + L\dot{x}_{2ref} + K_j(\omega_{ref} - \omega) + K_{r1}(i_{qref} - i_q) + Ri_{qref} + LK_j(i_{dref} - i_d) + p\omega_{ref}\phi + pLi_{dref}\omega \quad (25)$$

1.5 Оценка нелинейных параметров на основе наблюдателя состояния

Как уже обсуждалось ранее, эффективность методологии пассивного управления с назначением межсоединений и демпфирования (IDA-PBC) в значительной степени зависит от точности модели системы и ее параметров. Эти параметры, включая внутренние потери в синхронном двигателе с постоянными магнитами (PMSM) и связанном с ним инверторе напряжения (VSI), играют решающую роль в формировании поведения замкнутой системы [20]. Однако эти потери по своей природе изменяются во времени и сильно зависят от условий эксплуатации, что делает предположение о постоянных параметрах неподходящим для широкого спектра реальных вариантов моделирования.

Для учета этих вариаций в структуру системы управления включены дополнительные члены, отражающие падение напряжения, v_{td} и v_{tq} , представляющие собой суммарные внутренние потери PMSM и инвертора. Хотя эти члены повышают точность модели и смягчают ухудшение характеристик управления из-за неучтенной динамики, они сами по себе являются переменными и должны оцениваться в режиме реального времени для обеспечения стабильной работы как в переходном, так и в стационарных режимах.

Более того, поскольку внешний момент нагрузки обычно неизвестен и подвержен изменениям, его оценка в реальном времени также имеет важное значение для достижения надёжного управления. С этой целью в [21,22] был введен нелинейный наблюдатель помех, совместимый со структурой гамильтониана с портовым управлением (PCH), лежащей в основе структуры IDA-PBC. Этот наблюдатель позволяет оценивать в реальном времени как параметрические потери, так и внешние помехи, тем самым повышая надёжность управления и расширяя эксплуатационную надёжность системы привода в широком диапазоне условий.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = h(x, u) - \beta(x, u)\hat{p} - Se_x \\ \dot{\hat{p}} = K\dot{e}_x + SK\hat{e}_x - \beta^T(x, u)e_x \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} e_x = \hat{x} - x \\ K_i = -A\beta^T(x, u) \end{cases} \quad (27)$$

where x is the measured state parameter, $\hat{x}$ is the estimated state parameter, p is the unknown parameters, $\hat{p}$ is the estimated unknown parameters, h and β are the nonlinear functions of state variables x and u respectively, then S and A are positive definite matrices.

Наблюдатель состояния за развитием PMSM:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \dot{\hat{v}}_d = \frac{v_d - Ri_d}{L} + pi_q\omega - S_1 e_{i_d} - \frac{\hat{p}_1}{L} \\ \dot{\hat{x}}_2 = \dot{\hat{v}}_q = \frac{v_q - Ri_q - p\omega\varphi}{L} - pi_d\omega - S_2 e_{i_q} - \frac{\hat{p}_2}{L} \\ \dot{\hat{x}}_3 = \dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{J} (p\varphi i_q - f\omega) - S_3 e_{\omega} - \frac{\hat{p}_3}{J} \\ \dot{\hat{p}}_1 = \dot{\hat{v}}_{1d} = \frac{e_{i_d}}{L} + K_1 L \dot{e}_{i_d} + K_1 S_1 L e_{i_d} \\ \dot{\hat{p}}_2 = \dot{\hat{v}}_{1q} = \frac{e_{i_q}}{L} + K_2 L \dot{e}_{i_q} + K_2 S_2 L e_{i_q} \\ \dot{\hat{p}}_3 = \dot{\hat{T}}_l = \frac{e_{\omega}}{J} + K_3 J \dot{e}_{\omega} + K_3 S_3 J e_{\omega} \end{cases} \quad (28)$$

2. Регулятор скорости и производства желаемой заданной частоты

The differential flatness approach as detailed in references [23], is employed to compensate for speed tracking errors and to generate the current reference (i_{qref}). Within this framework, the rotor speed is selected as the flat output $y = \omega$, enabling the system states to be parameterized in terms of the flat output and its derivatives $\omega = f(y)$. Accordingly, the control input is identified as $u = i_q$.

Considering the wider bandwidth of the inner current loop compared to the external speed loop, we can assume that $i_{qref} = i_q$, based on Eq. (10) the control variable i_{qref} can be represented as an inverse dynamics term, formulated as follows:

$$i_{qref} = \frac{J_m \dot{\omega} + f\omega + \hat{T}_l}{p\varphi} \quad (29)$$

где $\hat{T}_l$ — расчетный крутящий момент, полученный с помощью наблюдателя.

Следующие уравнения описывают принципы обратной связи, позволяющие осуществлять показательное отслеживание заданных значений:

$$\left(\dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega} \right) + K_{p\omega} (\omega_{ref} - \omega) + K_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt = 0 \quad (30)$$

где K_{pm} и K_{im} — параметры устройства управления.

Желаемый характеристический полином можно задать следующим образом:

$$\begin{aligned} P &= s^2 + 2\omega_{n1} \zeta_{n1} s + \omega_{n1}^2 \\ K_{p\omega} &= 2\zeta_{n1} \omega_{n1}; K_{i\omega} = \omega_{n1}^2 \end{aligned} \quad (31)$$

где ζ_{n1} и ω_{n1} — желаемый коэффициент демпфирования и собственная частота.

Из (28) мы можем получить:

$$\varepsilon = \dot{\omega} = \dot{\omega}_{\text{ref}} + K_{p\omega}(\omega_{\text{ref}} - \omega) + K_{i\omega} \int (\omega_{\text{ref}} - \omega) dt \quad (32)$$

Уравнение (27) стало:

$$i_{\text{qref}} = \frac{J_m \varepsilon + f \omega + \hat{T}_1}{p\varphi} \quad (33)$$

Наконец, в силу особенностей выведенного закона управления с обратной связью, нам необходимо создать команду управления скоростью для инвертора. Мы ограничиваем заданные профили, чтобы сгладить переходы между стационарными режимами, поскольку нас интересует система с плавным пуском. Планирование траектории движения затем описывается следующим образом:

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{\omega_{\text{com}}}{1 + \frac{2\xi_{n2}s}{\omega_{n2}} + \frac{s^2}{\omega_{n2}^2}} \quad (34)$$

где ξ_{n2} и ω_{n2} - желаемый коэффициент демпфирования и собственная частота.

3. Контрольный вывод

3.1 Анализ устойчивости

Для оценки устойчивости предлагаемой замкнутой системы в качестве кандидата на роль функции Ляпунова выбирается желаемая функция Гамильтона:

$$V(e) = H_d(e) > 0 \quad (35)$$

Производная этой функции по времени выражается следующим образом:

$$\dot{V}(e) = \frac{\partial H_d(e)}{\partial e} \dot{e} = [-Qe]^T [J_d - R_d] [-Qe] \quad (36)$$

Для дальнейшего анализа свойств системы мы используем характеристики управляющих матриц. Матрица J_d является антисимметричной, удовлетворяющей условию $J_d = -J_d^T$, что приводит к:

$$[-Qe]^T [J_d] [-Qe] = 0 \quad (37)$$

$$\dot{V}(e) = -[-Qe]^T [R_d] [-Qe] < 0 \quad (38)$$

Из (35) и (38) следует, что:

$$V(e) > 0 ; \quad \dot{V}(e) < 0 \quad (39)$$

Согласно теории устойчивости Ляпунова, функция H_d строго убывает со временем, обеспечивая глобальную асимптотическую устойчивость точки равновесия. Это подтверждает устойчивость замкнутой системы при предложенной стратегии управления IDA-PBC [7,8].

3.2 Схема управления

Для обеспечения оптимального регулирования скорости контур регулирования скорости должен быть спроектирован с соответствующей частотой среза, которая адаптируется к динамике системы. Эта частота среза выбирается таким образом, чтобы удовлетворять условию:

$$\omega_{n2} \ll \omega_{n1} \ll \omega_s$$

где ω_s представляет собой постоянную частоту переключения силовой электроники. Кроме того, для достижения критически затухающего реагирования системы и устранения колебательного поведения коэффициенты затухания устанавливаются равными $\zeta_{n1} = \zeta_{n2} = 1$.

Полная схема управления приводом PMSM показана на рис. 3. Опорный ток i_{qref} выводится с помощью метода дифференциального управления плоскостностью в сочетании с обратной динамикой, как это было сформулировано в главе 2. Этот опорный сигнал ограничен допустимым диапазоном тока машины, определяемым ее номинальными пределами:

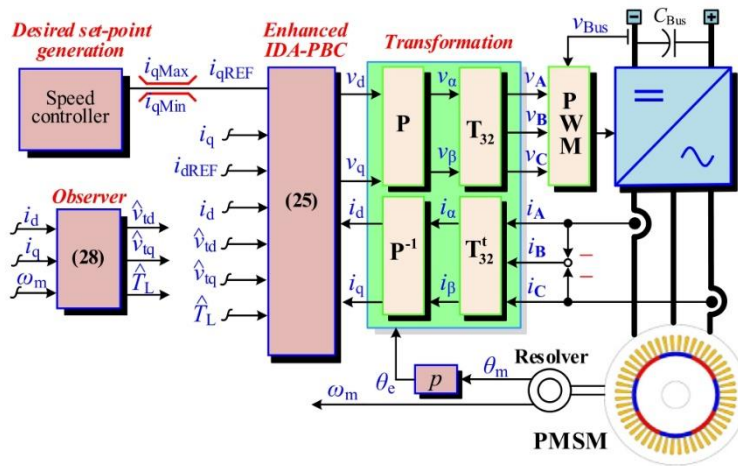


Рис. 3. Предложенный усовершенствованный IDA-PBC с наблюдателями состояния привода PMSM.

$$i_{qMin} < i_{qref} < i_{qMax}$$

Впоследствии усовершенствованный алгоритм IDA-PBC вычисляет соответствующие опорные напряжения v_d и v_q , обеспечивая точное отслеживание желаемой реакции системы.

4 Моделирование управления

Для оценки эффективности предложенных стратегий управления системой привода PMSM были смоделированы варианты с использованием среды Matlab/Simulink. Были рассмотрены два различных варианта моделирования:

4.1 Сценарий нарушения крутящего момента

В первом варианте моделирования ступенчатое изменение момента нагрузки от 0 до 3 (Нм) происходит в момент времени 0,5 с при сохранении постоянной скорости 2000 (об/мин). Этот вариант предназначен для оценки способности регулятора подавлять помехи и поддерживать точное регулирование скорости при внезапных изменениях момента.

4.2 Вариант эталонной скорости

Во втором варианте моделирования в 0,5 с происходит ступенчатое изменение скорости с 1500 об/мин до 3000 об/мин, при этом крутящий момент остается постоянным.

4.3 Обсуждение результатов

На рис. 4 показан приложенный момент нагрузки и соответствующее ему расчетное значение, полученное с помощью предложенного наблюдателя. Расчетное значение точно соответствует фактическому профилю крутящего момента, демонстрируя точность и быстродействие наблюдателя в динамических условиях.

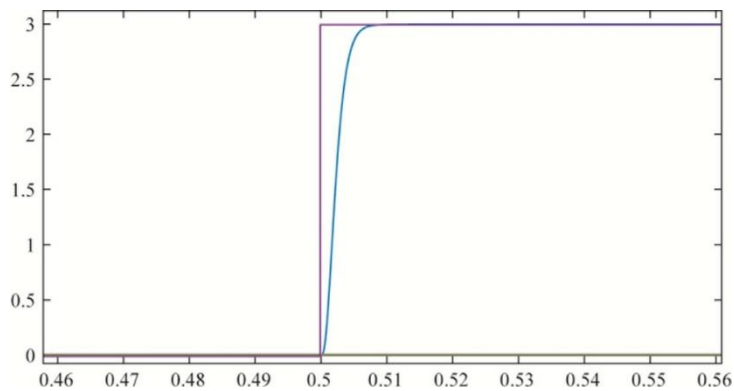


Рис. 4. Зависимость эталонного (пурпурный) и расчетного (синий) крутящего момента нагрузки (Н·м) от времени в условиях помех крутящего момента.

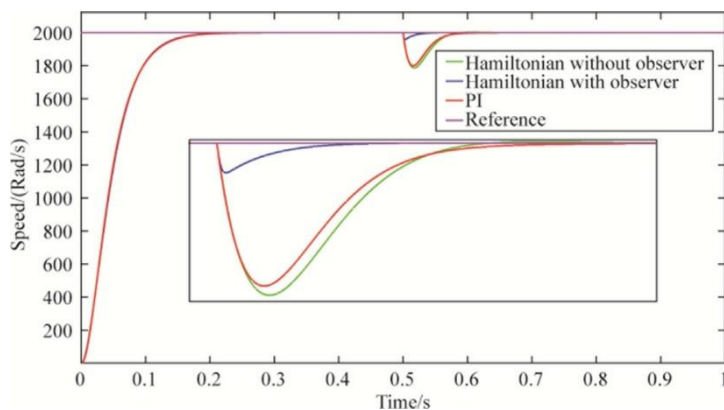


Рис. 5. Скорость (об/мин) в зависимости от времени для различных стратегий управления с увеличенным фрагментом, иллюстрирующим переходный процесс скорости и помех крутящего момента.

На рис. 5 показана реакция скорости при различных стратегиях управления после воздействия помех в виде крутящего момента нагрузки. Управление на основе гамильтониана без оценки крутящего момента нагрузки демонстрирует характеристики, сопоставимые с характеристиками обычного PI-регулятора, при этом оба метода показывают заметное падение скорости. В отличие от этого, при интеграции оценки крутящего момента нагрузки контроллер значительно уменьшает падение скорости, обеспечивая более оперативное восстановление и лучшее подавление помех. Однако это улучшение сопровождается небольшим превышением заданной скорости, что характерно для более агрессивной динамики компенсации, как показано на рис. 6 и 7, где изображены соответствующие реакции электромагнитного момента и напряжения статора. Эти реакции наглядно демонстрируют более уверенное поведение управления с более быстрым временем реакции.

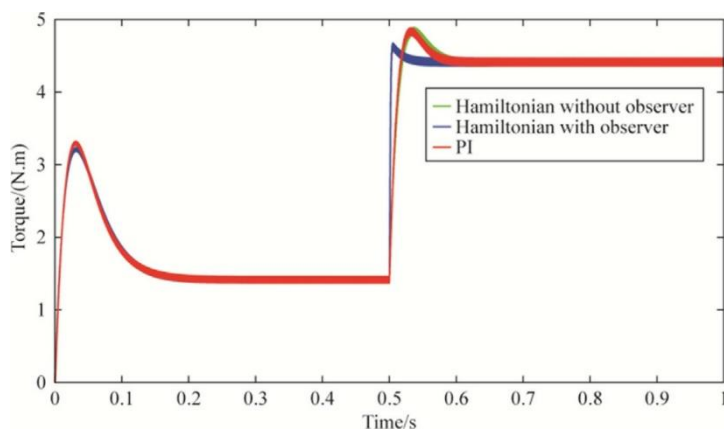


Рис. 6. Крутящий момент (Н·м) в зависимости от времени для различных стратегий управления, вариант моделирования помех крутящего момента.

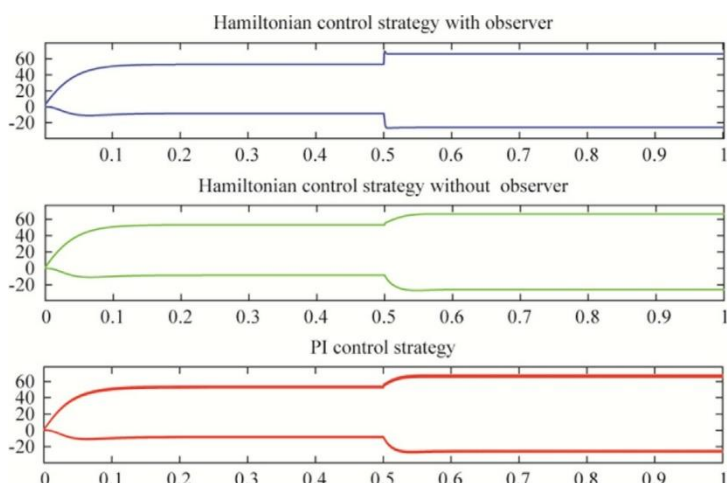


Рис. 7. Прямое и квадратурное напряжения (V) в зависимости от времени, вариант моделирования помех крутящего момента.

В случае ступенчатого изменения заданного значения скорости (рис. 8-10), выполненного без внешних помех крутящего момента, все три стратегии управления демонстрируют сопоставимое динамическое поведение. Реакции отслеживания скорости хорошо согласуются с заданным значением, показывая минимальное перерегулирование и быстрое время установления. Это указывает на то, что в номинальных условиях обычный PI-контроллер и обе стратегии на основе гамильтониана обеспечивают удовлетворительную производительность.

5 Экспериментальная проверка

Экспериментальный стенд, используемый для проверки предложенной стратегии управления (рис. 11), построен на основе трехфазного синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM). Двигатель питается от полностью управляемого трехфазного инвертора напряжения (VSI), управление которым осуществляется в режиме реального времени с помощью платформы dSPACE MicroLabBox. Эта платформа оснащена двухъядерным процессором с частотой 2 ГГц и поддерживает частоту ШИМ-переключения 20 кГц.

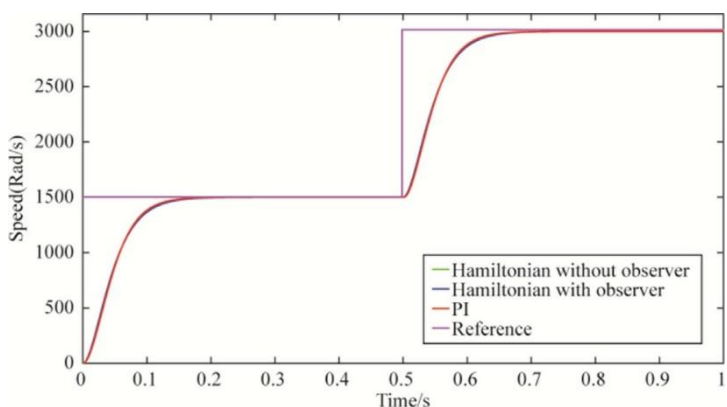


Рис. 8. Скорость (об/мин) в зависимости от времени для различных стратегий управления, вариант моделирования изменения заданной скорости.

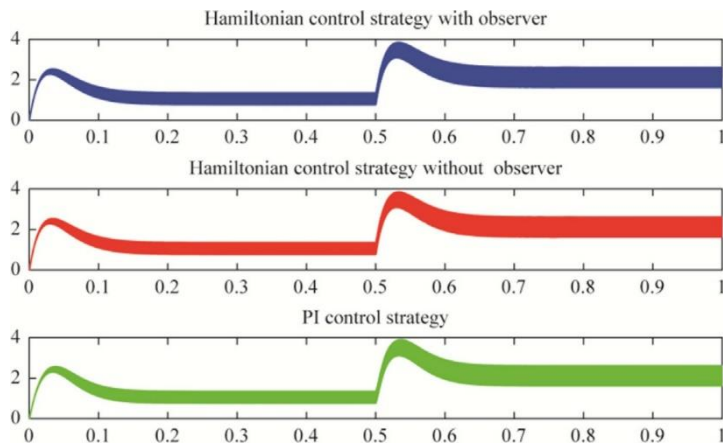


Рис. 9. Зависимость крутящего момента (Н·м) от времени при изменении заданного значения скорости.

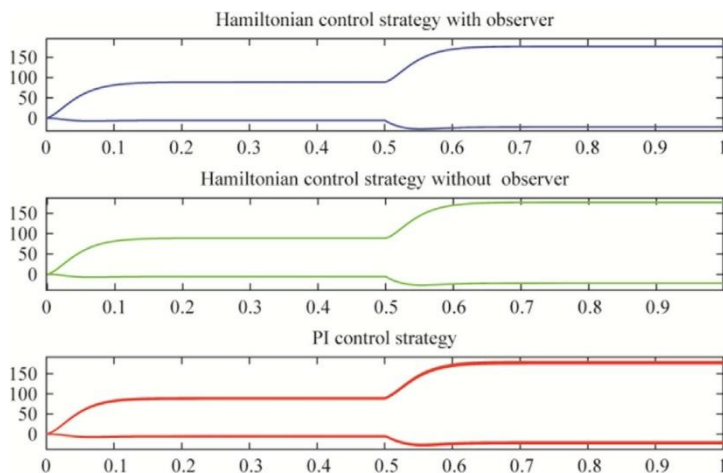


Рис. 10. Зависимость прямого и квадратурного напряжений (В) от времени, сценарий изменения заданного значения скорости.

PMSM механически соединен с нагрузочной машиной, что позволяет точно имитировать различные условия нагрузки. Кроме того, к нагрузочной машине через автоматический выключатель подключается настраиваемая резистивная нагрузка, позволяющая вносить ступенчатые изменения нагрузки во время испытаний. Такая структура позволяет оценивать производительность системы как в стационарном, так и в динамическом режимах работы.

5.1 Анализ чувствительности параметров

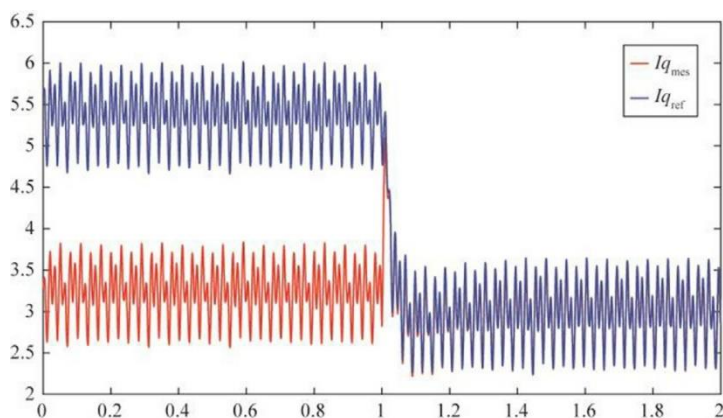


Рис. 12. Текущая эффективность отслеживания при наличии неопределенностей моделирования с активацией наблюдателя в момент времени $t = 1$ с.

На рис. 12 показано переходное поведение тока по квадратурной оси i_q и его опорного значения i_{qref} во время работы системы управления скоростью в рамках предложенной структуры IDA-PBC, дополненной нелинейным наблюдателем. Для оценки устойчивости стратегии управления в реалистичных условиях эксплуатации были введены неопределенности моделирования, включая эффекты мертвого времени инвертора и изменения внутреннего сопротивления двигателя. Первоначально управление работает в режиме моделирования с разомкнутым контуром, где заметны отклонения между i_q и i_{qref} , в основном из-за влияния этих неопределенностей. При $t = 1$ с активируется нелинейный наблюдатель состояния и параметров. Текущий ток немедленно начинает точнее отслеживать заданное значение, подчеркивая роль наблюдателя в компенсации несоответствий параметров и помех. Результаты подтверждают, что сочетание IDA-PBC с онлайн-наблюдателем не только обеспечивает точное отслеживание заданного значения, но и значительно повышает устойчивость системы к изменениям параметров и внешним помехам, обеспечивая стабильную работу даже в неидеальных условиях.

Для оценки эффективности предложенной стратегии управления были рассмотрены два различных варианта, аналогичные тем, которые использовались на этапе моделирования. Во всех случаях наблюдатель падения напряжения оставался активным. Параметры управления, использованные в экспериментах, приведены в таблице 1.

5.2 Вариант эталонной скорости

Для оценки динамических характеристик отслеживания регулятора вводится постепенное изменение заданного значения скорости при сохранении постоянного момента нагрузки (рис. 13-15).

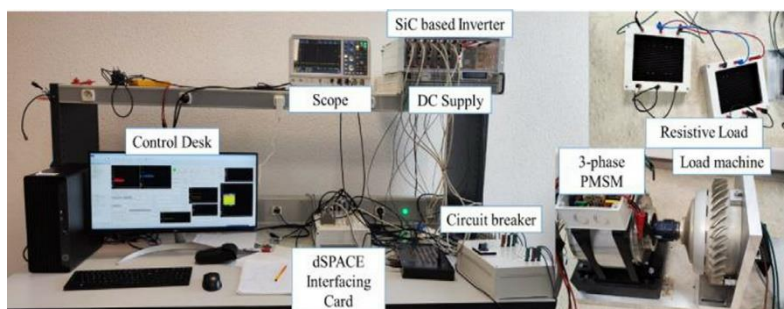


Рис. 11. Платформа испытательного стенда.

Таблица 1. Параметры управления.

Symbol	Value
K_{r1}	10
K_{r2}	0.01
ω_{n1}	65
ω_{n2}	40
S_i	2500
K_i	200

5.3 Вариант моделирования нарушения крутящего момента

Во втором экспериментальном варианте моделирования в 0,4 с вводится постепенное изменение момента нагрузки, при этом скорость вращения ротора остается постоянной. Цель этого теста — оценить способность регулятора подавлять помехи и поддерживать точное регулирование скорости при внезапных изменениях нагрузки. Кроме того, он направлен на вклад оценщика момента нагрузки в повышение общей производительности и устойчивости системы управления в условиях работы в реальном времени (рис. 16-19).

5.4 Обсуждение результатов

На рис. 16 показан экспериментально приложенный момент нагрузки, а также соответствующее ему расчетное значение, полученное с помощью предложенного наблюдателя. Точное соответствие между расчетным и фактическим профилями момента подтверждает точность и быстродействие наблюдателя в условиях работы в реальном времени.

На рис. 17 представлена экспериментальная зависимость скорости от различных стратегий управления после постепенного изменения момента нагрузки. Как при использовании традиционного PI-регулятора, так и при управлении на основе гамильтониана без оценки момента нагрузки наблюдается заметное снижение скорости. В отличие от этого, интеграция наблюдателя момента нагрузки значительно повышает подавление помех, эффективно минимизируя отклонение скорости и обеспечивая более оперативное возвращение к заданному значению. Улучшение характеристик сопровождается небольшим перерегулированием, что свидетельствует о более эффективном корректирующем воздействии. На рисунках 18-19 показан электромагнитный момент, а также прямое и квадратурное напряжения, демонстрирующие перерегулирование момента, которое способствует быстрому восстановлению желаемой скорости.

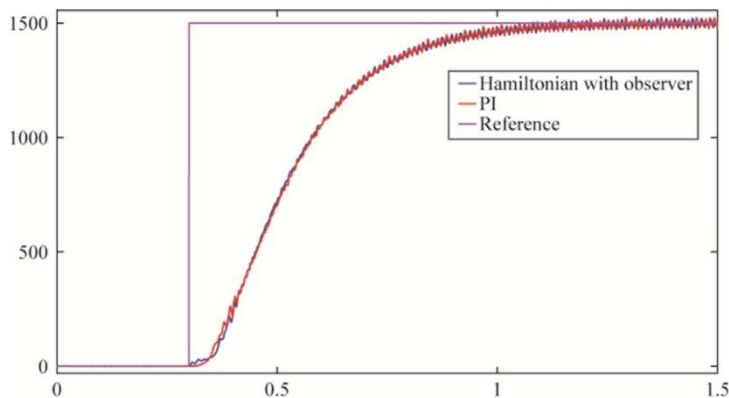


Рис. 13. Скорость (об/мин) в зависимости от времени для различных стратегий управления, вариант моделирования изменения заданной скорости.

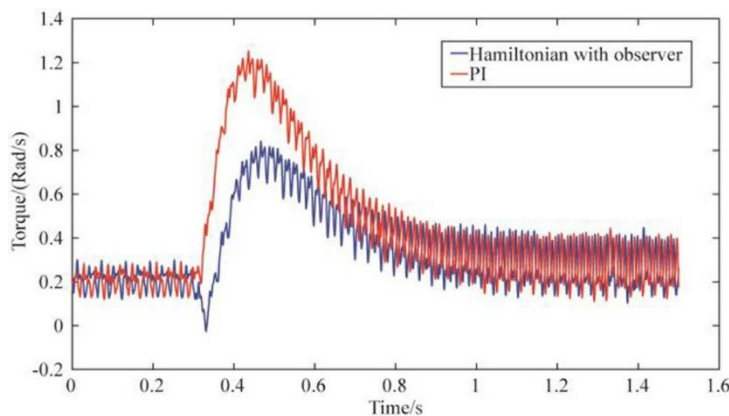


Рис. 14. Крутящий момент (Н·м) в зависимости от времени, вариант моделирования изменения заданного значения скорости.

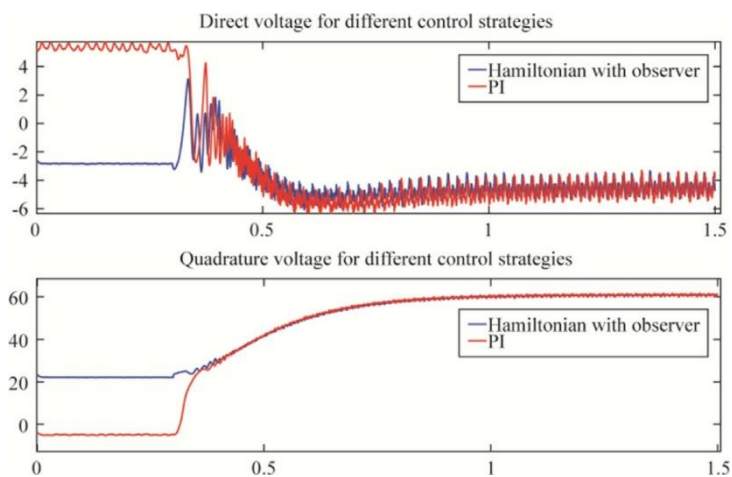


Рис. 15. Зависимость постоянного и квадратурного напряжений (V) от времени, вариант моделирования изменения заданного значения скорости.

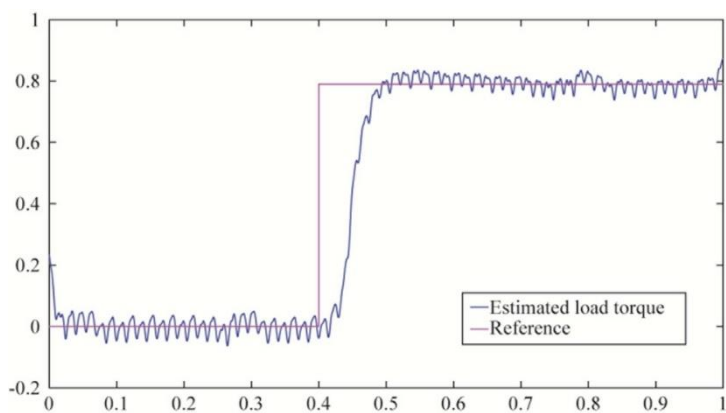


Рис. 16. Зависимость эталонного (пурпурный) и расчетного (синий) крутящего момента нагрузки (Н·м) от времени в условиях помех крутящего момента.

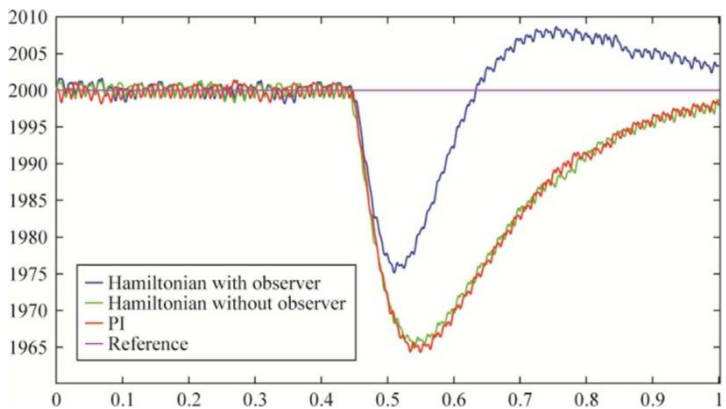


Рис. 17. Скорость (об/мин) в зависимости от времени для различных стратегий управления, увеличенный фрагмент варианта моделирования переходного процесса скорости и помех крутящего момента.

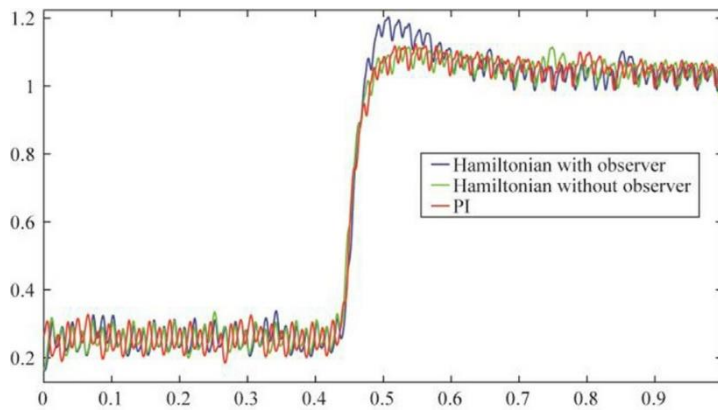


Рис. 18. Крутящий момент (Н·м) в зависимости от времени, вариант моделирования помех крутящего момента.

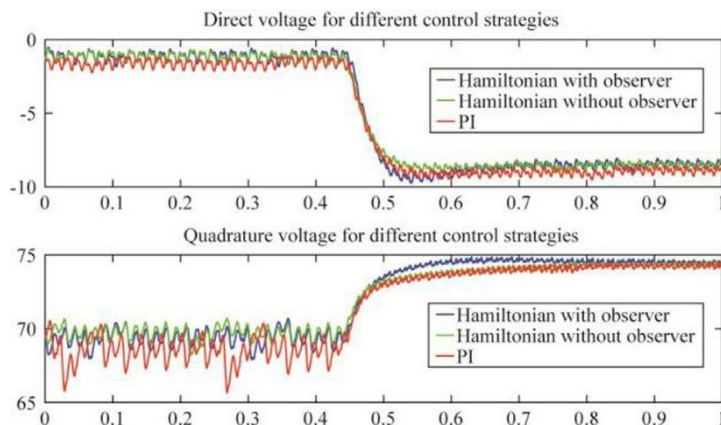


Рис. 19. Прямое и квадратурное напряжения (V) в зависимости от времени, вариант моделирования помех крутящего момента.

В варианте моделирования, включающем ступенчатое изменение заданного значения скорости (при отсутствии помехи нагрузки), все две стратегии управления демонстрируют сопоставимые динамические характеристики, как показано на рис. 13. Экспериментальные результаты подтверждают эффективное отслеживание скорости с минимальным перерегулированием и быстрым временем установления, что указывает на то, что в номинальных условиях PI-регулятор и стратегия Гамильтона с улучшенным наблюдателем обеспечивают удовлетворительные результаты. Кроме того, на рис. 14 показано, что гамильтоновский регулятор с наблюдателем обеспечивает более плавную реакцию на крутящий момент с уменьшенным перерегулированием и более оперативным установлением по сравнению с PI-контроллером, что дополнительно подтверждает его превосходную динамическую реакцию и устойчивость.

Используя возможности измерения времени выполнения в Control Desk, было установлено, что время вычислений для обеих стратегий, гамильтониана и классического PI-регулятора, оказалось схожим. Увеличение времени вычислений из-за активации наблюдателя в режиме реального времени было минимальным, увеличившись с 6,2 до 6,7 микросекунд.

6. Заключение

В данной статье представлена усовершенствованная стратегия пассивного управления с учетом межсоединений и демпфирования для приводов синхронных двигателей с постоянными магнитами. Благодаря интеграции нелинейного наблюдателя помех в рамках гамильтоновой модели с управлением портами, метод эффективно компенсирует неопределенности параметров и внешние помех, повышая устойчивость системы.

Схема управления сохраняет энергетическую структуру для систематического анализа устойчивости и использует производные траектории для улучшения динамических характеристик, включая быстрые переходные процессы и точное отслеживание. Несмотря на эти возможности, она сохраняет простую структуру с небольшим количеством настраиваемых параметров, что облегчает применение в режиме реального времени.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований подтверждают эффективность стратегии в различных условиях, при этом сравнение производительности с PI-регулятором и стандартным IDA-PBC показывает улучшенную обработку помех и точность отслеживания. Хотя подход разработан для машин без явно выраженных полюсов, он может быть адаптирован к другим структурам синхронных двигателей с постоянными магнитами за счет соответствующего выбора матрицы взаимосвязей, что указывает на направления для дальнейших исследований.

О вкладе авторов в проект CRediT

Мохамед Аззи: написание оригинального проекта, концептуализация, исследование, проверка, программное обеспечение. **Лотфи Багли:** написание, рецензирование и редактирование, концептуализация, авторский надзор, программное обеспечение. **Эхсан Джамшидпур:** концептуализация, написание - рецензирование и редактирование, контроль. **Фатифат Тхунтонг:** концептуализация, привлечение финансирования, написание-рецензирование и редактирование, контроль. **Нуреддин Такорабет:** концептуализация, привлечение финансирования, написание текста - рецензирование и редактирование, контроль.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Благодарности

Данная работа частично финансировалась в рамках международного исследовательского партнерства «Электротехника – Тайско-французский исследовательский центр (EE-TFRC)» в рамках проекта Лотарингский университет (LUE) в сотрудничестве между Университетом Лотарингии (Франция) и Технологическим университетом имени короля Монкута в Северном Бангкоке (2021-2024/2025-2028 годы), частично Национальным исследовательским советом Таиланда (NRCT) в рамках гранта на продвижение исследовательских групп (программа для старших научных сотрудников) под номером гранта N42A 680561, а также частично Национальным научным фондом Таиланда (NSRF) через подразделение управления программами развития человеческих ресурсов и институционального развития, исследований и инноваций в рамках исследовательского проекта под номером гранта B41G680025.

Список используемой литературы

- [1] С.А. Салех, Э. Озкоп, Б. Нахид-Мобаракех, А. Рубаай, К.М. Муттаки, С. Прадхан, Защита на основе живучести для систем электропривода — часть II: трехфазные синхронные двигатели с постоянными магнитами, IEEE Trans.Ind.Appl.59 (2023)2760-2771.
- [2] П. Лиутанакул, А.-Б. Аван, С. Пирфедеричи, Б. Нахид-Мобаракех, Ф. Мейбоди-Табар, Линейная стабилизация шины постоянного тока, питающей нагрузку постоянной мощности: общий подход к проектированию, IEEE Trans.Power Electron.25 (2010) 475-488.

- [3] А.А.А. Радван, Й.-А.-Р.-И. Мохамед, Моделирование, анализ и стабилизация микросетей переменного тока с питанием от преобразователя при высокой степени проникновения нагрузок, подключенных к преобразователю, *IEEE Trans.Smart Grid* 3 (2012) 1213-1225.
- [4] Ц. Фэй, Й. Дэн, Х. Ли, Дж. Лю, М. Шао, Минимизация пульсаций скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе модельного прогнозирующего и итеративного обучения, *IEEE Access* 7 (2019) 31791-31800.
- [5] Х.Сира-Рамирес, Х.Линарес-Флорес, К.Гарсиа-Родригес, М.А.Контрерас-Ордас, О контроле синхронного двигателя с постоянными магнитами: подход к управлению с активным подавлением возмущений, *IEEE Trans.Contr.Syst.Technol.*22 (2014)2056-2063.
- [6] Л. Вэйцзе, Л. Дунлян, В. Цюсюань, З. Сяодань, Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами в скользящем режиме, в: Доклад на 26-й Китайской конференции по управлению и принятию решений (CCDC), IEEE, Чанша, Китай, 2014, стр. 4555-4559.
- [7] Р. Ортега, А. ван дер Шафт, Б. Машке, Г. Эскобар, Управление на основе пассивности с учетом взаимосвязи и демпфирования для гамильтоновых систем с портовым управлением, *Automatica* 38 (2002) 585-596.
- [8] Р. Ортега, А. Лория, П. Дж. Никлассон, Х. Сира-Рамирес, Управление системами Эйлера-Лагранжа на основе пассивности: механические, электрические и электромеханические приложения, *Communications and Control Engineering*, Springer, Лондон, 1998.
- [9] М. Герреро-Санчес, Х. Абаунза, П. Кастильо, Р. Лозано, К. Гарсия-Бельтран, А. Родригес-Паласиос, Управление микролетательным аппаратом на основе пассивности с использованием единичных кватернионов, *Appl.Sci.*7 (2016) 13.
- [10] М.-Э. Герреро-Санчес, О. Эрнандес-Гонсалес, Г. Валенсия-Паломо, Ф.-Р. Лопес-Эстрада, А.-Э. Родригес-Мата, Дж. Гарридо, Фильтрованное управление IDA-PBC на основе наблюдателя для отслеживания траектории квадрокоптера, *IEEE Access* 9 (2021) 114821-114835.
- [11] К.Д.Гарсиа-Бельтран, Э.М.Миранда-Араужо, М.Э.Герреро-Санчес, Г.Валенсия-Паломо, О.Эрнандес-Гонсалес, С.Гомез-Пенате, Законы управления на основе пассивности для беспилотного парашютного летательного аппарата, *Asian J.Control* 23(2021)2087-2096.
- [12] М.Э.Герреро-Санчес, Ю.Эрнандес-Гонсалес, Дж.Валенсия-Паломо, Д.А.Меркадо-Равелл, Ф.Р.Лопес-Эстрада, Х.А.Ойо-Монтаньо, Надежный IDA-PBC для недоуправляемых систем с матрицей инерции, зависящей от неуправляемых координат: применение к БПЛА, несущему груз, *Nonlinear Dyn.*105(2021) 3225-3238.
- [13] Х.Э.Дюран-Дельфин, К.Д.Гарсиа-Бельтран, М.Э.Герреро-Санчес, Г.Валенсия-Паломо, О.Эрнандес-Гонсалес, Моделирование и управление на основе пассивности для конвертируемого самолета с неподвижным крылом и вертикальным взлетом и посадкой, *Appl.Math Comput.*461 (2024) 128298.
- [14] М.Аззи, Л.Багли, Э.Джамшидпур, Н.Такорабет, Т.-И.Сюята, П.Тхунтонг, Улучшенное гамильтоново управление для независимых от сети трехфазных инверторов с LC-фильтрами, в: Доклад на Международной конференции по материалам и энергетике: Энергетика в электротехнике (ICOME-EE), IEEE, Бангкок, Таиланд, 2024, стр. 1-4.
- [15] П.Таунтонг, П.Мунгпорн, С.Пьерфедеричи, Д.Гильберт, Н.Бизон, Адаптивное управление преобразователем топливного элемента на основе новой гамильтоновой энергетической функции для стабилизации шины постоянного тока в приложениях микросетей постоянного тока, *Математика* 8 (2020) 2035.

[16] В. Петрович, Р. Ортега, А.М. Станкович, Глобально сходящийся энергетический контроллер для синхронных двигателей с постоянными магнитами, в: Труды 38-й конференции IEEE по принятию решений и управлению (Каталожный номер 99CH36304). Доклад на конференции по принятию решений и управлению 1999 года, стр. 334-340.

[17] С. Лю, Х. Ю, Дж. Ю, Ю. Чжао, Новый метод управления скоростью на основе управляемого портами гамильтонова оператора и наблюдателя возмущений для приводов синхронных двигателей с постоянными магнитами, IEEE Access 7 (2019) 111115-111123.

[18] М. Аззи, Л. Багли, Э. Джамшидпур, Н. Такорабет, П. Таунтхонг, Подход к распределению взаимосвязей и демпфирования для синхронных двигателей с постоянными магнитами, сравнение с классическим ПИ-регулированием, в: Доклад на 3-й Международной конференции по передовой электротехнике (ICAEE), IEEE, Сиди-Бель-Аббес, Алжир, 2024, стр. 1-6.

[19] Х. Ю, З. Цзоу, С. Ю, Регулирование скорости синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе гамильтоновых систем с портовым управлением и принципа ПИ-регулирования, в: Доклад на Международной конференции IEEE по автоматизации и логистике (ICAL), IEEE, Шэньян, Китай, 2009, стр. 647-651.

[20] М.Э.Герреро-Санчес, Х.Р.Монтойя-Мора лес, Дж.Валенсия-Паломо, О.Эрнандес-Гонсалес, Надежный IDA-PBC для неразделимых систем РСН при изменяющихся во времени внешних возмущениях, Nonlinear Dyn.113 (2025) 3499-3510.

[21] В.-Х. Чен, Управление нелинейными системами на основе наблюдателя возмущений, IEEE/ASME Trans.Mechatron.9 (2004) 706-710.

[22] В.-Х.Чен, Я.Янг, Л.Гуо, С.Ли, Управление на основе наблюдателя возмущений и связанные с ним методы — обзор, IEEE Trans.Ind.Electron.63 (2016) 1083-1095.

[23] П.Тхунтонг, С.Сиккабут, Н.Пунной, П.Мунгпорн, Б.Йодвонг, П.Кумам, Н.Бизон, Б.Нахид-Мобараке, С.Пьерфедеричи, Нелинейное дифференциальное управление скоростью/крутящим моментом на основе плоскостности с использованием наблюдателей состояния приводов синхронных двигателей с постоянными магнитами, IEEE Trans.on Ind.Appl.54 (2018) 2874-2884.

Получено 1 марта 2025 г.; отредактировано 4 июня 2025 г.; принято 11 июня 2025 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

* **Ответственный автор** со стороны Университета Лотарингии, Грин, Нанси, F54000, Франция.

Адреса электронных почт: mohamed.azzi@univ-lorraine.fr (М.Аззи), lotfi.baghli@univ-lorraine.fr (Л.Багли), ehsan.jamshidpour@univ-lorraine.fr (Э. Джамшидпур), phatiphat.t@fte.kmutnb.ac.th (Ф. Тхунтонг), noureddine.takorabet@univ-lorraine.fr (Н. Такорабет).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Enhanced interconnection and damping assignment passivity-based control for PM synchronous motors>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.06.001>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd.

Это статья с открытым доступом, распространяемая по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Мохамед Аззи получил диплом инженера-электротехника в Высшей школе общественных работ Хассании (Касабланка, Марокко) в 2022 году, а также двойной диплом магистра электротехники в Центральной школе Лилля (Лилль, Франция) в 2022 году. В настоящее время он получает докторскую степень по электротехнике в Исследовательской группе по электроэнергетике Нанси, Университет Лотарингии, а также в Технологическом университете имени короля Монгкута в Северном Бангкоке (KMUTNB), Бангкок, Таиланд. Его основные научные интересы включают в себя управление и проектирование высокоскоростных отказоустойчивых приводных систем.