

Разработка адаптивного скользящего управления на базе нейронной сети RBF для контура скорости двигателя СДПМ авиационного электрического топливного насоса

З. Т. Нгуен¹, М. П. Белов², З. К. Нгуен³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹thang3718397@gmail.com, ²milesa58@mail.ru, ³khanhnguyen.mta@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения точности и робастности управления электрическим топливным насосом авиационных систем. Для решения данной задачи предлагается метод адаптивного управления на основе скользящего режима с использованием радиально-базисной нейронной сети (RBF). Нейронная сеть применяется для адаптации коэффициента усиления закона управления, что позволяет уменьшить эффект чаттеринга, характерный для классических алгоритмов скользящего режима. Разработан алгоритм адаптивной настройки коэффициента управления на основе аппроксимационных свойств RBF-сети. Предложенный метод не требует точного знания параметров системы и способен компенсировать неопределенности модели и внешние возмущения. Эффективность разработанного подхода подтверждается результатами моделирования, которые демонстрируют улучшение качества отслеживания заданной скорости и снижение амплитуды колебаний управляющего сигнала. Полученные результаты показывают перспективность применения нейросетевых методов адаптации параметров в системах управления авиационными электрическими топливными насосами

Ключевые слова: управление скользящего режима, RBF-нейронная сеть, авиационные электрический топливные системы, робастное управление; авиационный электрический топливный насос (АЭТН); более электрических самолётов (МЕА)

I. ВВЕДЕНИЕ

Электрификация авиационных подсистем является одним из ключевых направлений развития современных летательных аппаратов, поскольку она позволяет повысить энергетическую эффективность, уменьшить механическую сложность и улучшить надёжность эксплуатации. Одним из перспективных применений в этой области являются электрические топливные насосы, обеспечивающие более гибкое регулирование подачи топлива и лучшую интеграцию с современной архитектурой бортового электропитания. В таких системах качество управления скоростью электропривода напрямую влияет на устойчивость топливоподачи и надёжность работы всего агрегата [1].

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) представляют собой подходящее решение для авиационных электрических топливных насосов благодаря высокой удельной мощности, быстрому

электромагнитному отклику, компактности и высокому КПД [2, 3]. Однако прецизионное регулирование скорости СДПМ в реальных условиях эксплуатации остаётся сложной задачей, поскольку внешний контур скорости подвержен влиянию изменения гидравлической нагрузки, параметрической неопределённости, внешних возмущений и измерительных шумов. В случае авиационного внешнего шестерённого топливного насоса нагрузочный момент тесно связан с перепадом давления на насосе и может существенно изменяться в зависимости от режима работы системы.

Управление в скользящем режиме (SMC) широко применяется для электроприводов СДПМ благодаря выраженным робастным свойствам по отношению к согласованным возмущениям и неопределённостям модели. SMC позволяет улучшить установившуюся точность и повысить способность к подавлению медленно меняющихся возмущений за счёт включения интегральной составляющей в поверхность скольжения [3]. Однако при использовании фиксированных коэффициентов закона достижения возникает существенный компромисс: большие коэффициенты обеспечивают робастность в неблагоприятных условиях, но вызывают излишнюю колебательность управляющего сигнала, тогда как меньшие коэффициенты уменьшают колебания, но ухудшают быстродействие и помехоустойчивость.

Для преодоления этого ограничения представляется целесообразным использовать адаптивный механизм, изменяющий коэффициенты закона достижения в режиме реального времени в зависимости от текущего состояния системы. Среди подобных методов RBF-нейронные сети являются особенно привлекательными благодаря простой структуре, способности к универсальной аппроксимации и пригодности для онлайн-реализации. В большинстве известных работ RBF-сеть используется для прямой аппроксимации неизвестной динамики объекта [4]. В настоящей работе используется иной подход: нейронная сеть применяется не для компенсации всей неопределённой динамики, а только для онлайн-настройки двух коэффициентов K_1 и K_2 закона достижения в контуре скорости. Такой подход позволяет сохранить робастную структуру SMC и одновременно повысить адаптивность регулятора.

В связи с этим в статье предлагается метод управления скоростью СДПМ в скользящем режиме с адаптацией коэффициентов закона достижения на основе RBF-нейронной сети для авиационного электрического топливного насоса. Внутренний контур тока предполагается достаточно быстрым, а внешний контур скорости строится на основе интегральной поверхности скольжения. Коэффициенты K_1 , K_2 настраиваются онлайн по текущему состоянию системы, что позволяет усиливать действие регулятора при больших ошибках и снижать излишнюю жёсткость при приближении к установившемуся режиму.

II. МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СДПМ-ПРИВОДОМ

АВИАЦИОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОПЛИВНОГО НАСОСА

A. Модель контура скорости СДПМ

Во вращающейся системе координат dq электромагнитный момент СДПМ может быть записан в общем виде [5]:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\psi \cdot i_q + i_q \cdot i_d \cdot (L_d - L_q)] \quad (1)$$

где p – число пар полюсов, ψ – магнитный поток постоянного магнита, а L_d и L_q индуктивности по осям d и q . Для СДПМ с поверхностными магнитами и в условиях ориентированного по потоку управления с $i_d = 0$, электромагнитный момент упрощается до:

$$T_e = k_a \cdot i_q \quad (2)$$

где $k_a = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi$ – это постоянная крутящего момента двигателя.

Механическая кинематика вала двигателя описывается уравнением баланса крутящего момента:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e - T_L}{J} - \frac{B_\omega}{J} \cdot \omega \quad (3)$$

где J – момент инерции, T_e – электромагнитный момент, B_ω – коэффициент вязкого трения, T_L – момент нагрузки.

Положим, $a = \frac{3p\psi}{2J}$ и будем считать

$-\frac{T_L}{J} - \frac{B\omega_r}{J} = d(t)$ – составляющую неопределённым суммарным возмущением. Отсюда получаем:

$$\dot{\omega} = a i_q + d(t) \quad (4)$$

Можно видеть, что динамика СДПМ представляет собой многомерную нелинейную систему, в которой существует связь между электрической и механической частями. В задаче регулирования скорости такие параметрические неопределённости, как отклонения R , J , B , а также изменения нагрузки T_L , могут значительно ухудшить качество управления, если не применяется соответствующий механизм компенсации.

B. Модель нагрузки внешнего шестеренчатого топливного насоса

Согласно [3], момент нагрузки рассчитывается по следующей формуле:

$$T_L = \frac{B \cdot R_p^2 \cdot (P_0 - P_i)}{2} \cdot \left(\frac{\gamma_a^2 - (\gamma_a - \theta)^2}{\eta_{m_1}} + \frac{\gamma_a^2 - (\gamma_m + \theta)^2}{\eta_{m_1} \cdot \eta_{m_2}} \right) \quad (5)$$

где B – ширина зуба шестерни (мм), γ_a – центральный угол основного круга, соответствующий углу зацепления; P_0 и P_i – выходное и входное давление шестеренного насоса соответственно; η_{m_1} и η_{m_2} – механический КПД ведущего и ведомого колес соответственно, γ_m – угол давления при минимальном радиусе профиля зацепляющегося зуба.

III. КОНТРОЛЛЕР СКОльзяЩЕГО РЕЖИМА С НАСТРОЙКОЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RBF-СЕТИ

На основе модели, ориентированной на управление контуром скорости, представленной в разделе 2, целью настоящего раздела является разработка регулятора, способного обеспечивать высокое качество отслеживания скорости в условиях переменной гидравлической нагрузки и наличия параметрической неопределённости. В данном исследовании SMC может использоваться во внутреннем контуре тока для повышения робастности и улучшения качества слежения по току системы PMSM. По сравнению с PI-регулятором этот метод позволяет уменьшить влияние неопределённости параметров и перекрёстных связей в $d-q$ модели, тем самым улучшая моментную характеристику и эффективно поддерживая внешний контур регулирования скорости. Общая схема управления описана на рис. 1.

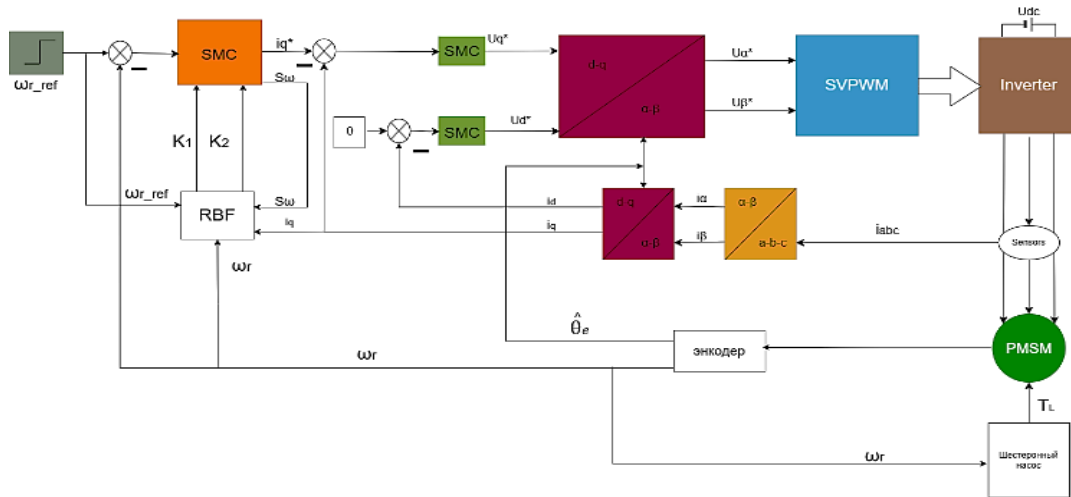


Рис. 1. Система управления СДПМ на основе RBF-SMC

В отличие от использования фиксированных коэффициентов в законе приближения, как в традиционном SMC, в данной работе предлагается применять радиально-базисную нейронную сеть для онлайн настройки двух коэффициентов K_1 и K_2 , что позволяет улучшить баланс между скоростью сходимости, робастностью к возмущениям и уровнем колебаний сигнала управления.

А. Интегральная поверхность скольжения контура скорости

Для внешнего кольца регулирования скорости погрешность тяги была определена следующим образом:

$$e_\omega = \omega - \omega_{ref} \quad (6)$$

Для повышения способности подавления возмущений и уменьшения установившейся ошибки, интегральная поверхность скольжения контура скорости выбирается в следующем виде:

$$S_\omega = \lambda \int_0^t e_\omega(\tau) d\tau + e_\omega \quad (7)$$

где $\lambda > 0$. Интегральная составляющая в выражении (7) позволяет лучше компенсировать влияние медленно изменяющихся возмущений нагрузки и протяженных ошибок моделирования, которые обычно возникают в системе привода топливного насоса.

Взяв производную по времени от выражения (7), получаем:

$$\dot{S}_\omega = \lambda e_\omega + \dot{e}_\omega \quad (8)$$

$$\dot{S}_\omega = \lambda e_\omega + \dot{\omega} - \dot{\omega}_{ref} \quad (9)$$

Подставив (4) в полученное уравнение, имеем:

$$\dot{S}_\omega = \lambda e_\omega - \dot{\omega}_{ref} + ai_d + d(t) \quad (10)$$

Выберем функцию Ляпунова в следующем виде:

$$V_\omega = \frac{1}{2} S_\omega^2 \quad (11)$$

Взяв производную по времени от приведенной выше функции, получаем:

$$\dot{V}_\omega = S_\omega \dot{S}_\omega \quad (12)$$

Подставив уравнение (10) в выше уравнение получаем:

$$\dot{V}_\omega = S_\omega [\lambda_3 e_\omega - \dot{\omega}_{ref} + ai_d + d(t)] \quad (13)$$

Для обеспечения устойчивости системы в смысле теории Ляпунова выражение (13) должно удовлетворять условию $\dot{V}_\omega \leq 0$. Поэтому полагаем:

$$\dot{S}_\omega = -K_1 S_\omega - K_2 \text{sign}(S_\omega) + d(t) \quad (14)$$

где $K_1, K_2 > 0$ отсюда получаем:

$$\dot{V}_\omega = S_\omega [-K_1 S_\omega - K_2 \text{sign}(S_\omega) + d(t)] \quad (15)$$

$$\dot{V}_\omega = -K_1 S_\omega^2 - K_2 |S_\omega| + d(t) S_\omega \quad (16)$$

Отсюда:

$$\dot{V}_\omega \leq -K_1 S_\omega^2 - K_2 |S_\omega| + |d(t)| |S_\omega| = -K_1 S_\omega^2 - (K_2 - |d(t)|) |S_\omega| \quad (17)$$

Следовательно, для достижения устойчивости уравнения согласно теории Ляпуновой, уравнение должно иметь следующий вид:

$$-K_1 S_\omega^2 - (K_2 - |d(t)|) |S_\omega| \leq 0 \quad (18)$$

Это эквивалентно тому, что нам нужно выбрать K_2 таким образом, чтобы $K_2 > d(t)$.

Подставьте уравнение (14) в уравнение (10), получаем:

$$-K_1 S_\omega - K_2 \text{sign}(S_\omega) + d(t) = \lambda e_\omega - \dot{\omega}_{ref} + ai_d + d(t) \quad (19)$$

Приведенное выше уравнение эквивалентно:

$$i_d = \frac{1}{a} [-K_1 S_\omega - K_2 \text{sign}(S_\omega) - \lambda_3 e_\omega + \dot{\omega}_{ref}] \quad (20)$$

В данном исследовании функция знака $\text{sign}(x)$ будет заменена функцией насыщения $\text{sat}(y)$ для уменьшения высокочастотных колебаний управляющего сигнала:

$$\text{sat}\left(\frac{S(x)}{\xi}\right) = \begin{cases} \text{sign}\left(\frac{S(x)}{\xi}\right) & \text{при } \left|\frac{S(x)}{\xi}\right| \geq 1 \\ \frac{S(x)}{\xi} & \text{при } \left|\frac{S(x)}{\xi}\right| < 1 \end{cases} \quad (21)$$

ξ – толщина пограничного слоя

Рассмотрим внешний контур управления скоростью с контроллером, заданным формулами (6–20). Если коэффициенты адаптации ограничены снизу значением, то переменная скользящей поверхности S_ω ограничена и сходится к 0. Кроме того, поскольку соотношение между S_ω и e_ω соответствует устойчивому линейному фильтру, ошибка отслеживания скорости также сходится к 0. Другими словами, внешний контур управления скоростью обеспечивает практическую устойчивость.

В. Механизмы адаптации коэффициентов K_1, K_2 на основе RBF-сетей

Пусть x_r – входной вектор сети RBF, выбранный в данной работе следующим образом:

$$x_r = \begin{bmatrix} \omega & \omega_{ref} & S_\omega & i_q \end{bmatrix} \quad (22)$$

Выходные данные скрытого слоя RBF записываются следующим образом:

$$\Phi(x_r) = [\phi_1(x_r) \quad \phi_2(x_r) \quad \dots \quad \phi_n(x_r)]^T \quad (23)$$

Для каждой гауссовой базисной функции форма выглядит следующим образом:

$$\phi_j(x_r) = \exp\left(-\frac{\|x_r - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (24)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, m$, c_j – центр j -го узла, $b_j > 0$ – ширина гауссовой функции, а m – количество узлов в сети.

Два коэффициента адаптации закона доступа определяются следующим образом:

$$K_1(x_r) = K_{1,0} + \Delta K_1 \quad (25)$$

$$K_2(x_r) = K_{2,0} + \Delta K_2 \quad (26)$$

где $K_{1,0} > 0$ и $K_{2,0} > 0$ – предварительно выбранные базовые значения. ΔK_1 и ΔK_2 являются выходными компонентами RBF-нейронной сети и представляются следующим образом:

$$\Delta K_1 = W_1^T \Phi(x_r) \quad (27)$$

$$\Delta K_2 = W_2^T \Phi(x_r) \quad (28)$$

При этом W_1, W_2 – это векторы весов, которые необходимо обновлять в режиме онлайн.

Выражение (27–28) показывает, что сеть RBF косвенно регулирует динамику сходимости поверхности скольжения через K_1, K_2 . При большой ошибке или резком изменении нагрузки контроллер может автоматически усиливать степень воздействия; напротив, когда система приближается к установившемуся состоянию, коэффициенты настраиваются на более

подходящий уровень для уменьшения колебаний управляющего сигнала.

С. Закон обновления весов и механизм ограничений

Весовые коэффициенты сети RBF обновляются в режиме онлайн по следующим адаптивным законам:

$$\dot{W}_1 = G_1 \Phi(x_r) S_\omega^2 - \sigma_1 \hat{W}_1 \quad (29)$$

$$\dot{W}_2 = G_2 \Phi(x_r) |S_\omega| - \sigma_2 \hat{W}_2 \quad (30)$$

где G_1 и G_2 – положительно определённые матрицы скоростей обучения, а $\sigma_1 > 0$ и $\sigma_2 > 0$ – коэффициенты sigma-модификации. Член $\sigma_1 \hat{W}_1$, $\sigma_2 \hat{W}_2$ вводится для ограничения явления дрейфа параметров, особенно на этапах малой ошибки или при длительной работе системы в условиях, близких к установившемуся режиму.

Сочетание законов обновления (29)–(30) с sigma-модификацией даёт два основных преимущества. Во-первых, регулятор всегда сохраняет практическую реализуемость, поскольку K_1, K_2 не выходят за заранее выбранные пределы. Во-вторых, процесс адаптации становится более устойчивым, что позволяет избежать ситуации, когда сеть RBF формирует слишком большие коэффициенты, вызывающие усиление чаттеринга или приводящие к насыщению управляющего сигнала.

В частности, когда система испытывает сильные изменения нагрузки из-за изменения перепада давления насоса или когда ошибка по скорости резко возрастает, сеть RBF подстраивается так, чтобы увеличить K_1 и(или) K_2 тем самым повышая интенсивность возврата системы на поверхность скольжения. Напротив, когда скорость уже хорошо отслеживает заданное значение, эти коэффициенты снижаются до более подходящего уровня, благодаря чему управляющий сигнал становится менее колебательным по сравнению со случаем использования фиксированных консервативных коэффициентов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки эффективности предложенного регулятора было проведено моделирование на модели электропривода СДПМ, приводящего в действие внешний шестерёнчатый топливный насос, в котором во внешнем контуре скорости используется интегральный скользящий регулятор с онлайн-настройкой двух коэффициентов K_1, K_2 с помощью сети RBF. Результаты предложенного метода сравниваются с двумя эталонными структурами управления: традиционным PI-регулятором и регулятором SMC с фиксированными коэффициентами.

Моделирующие эксперименты были построены для оценки трёх основных аспектов: способности отслеживания заданной скорости, помехоустойчивости к нагрузочным возмущениям, вызванным изменением давления в насосе. Кроме того, были проанализированы изменения двух адаптивных коэффициентов K_1, K_2 с целью более наглядного объяснения влияния адаптивного механизма на основе сети RBF.

Для оценки способности подавления нагрузочных возмущений во втором случае заданная скорость поддерживается постоянной на уровне 250 rad/s и 550 rad/s. В момент времени $t = 0.45$ s на вал двигателя подаётся ступенчатый момент нагрузки величиной 5 Н·м.

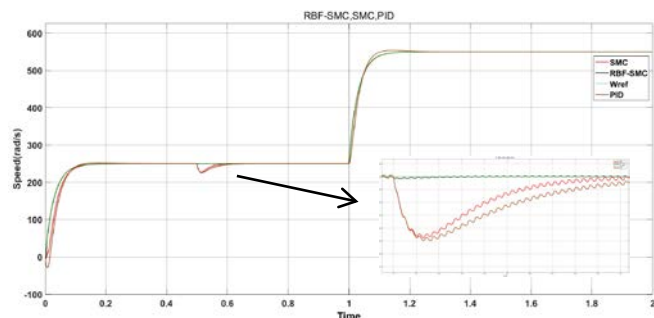


Рис. 2. Результаты отклика скорости при воздействии нагрузки

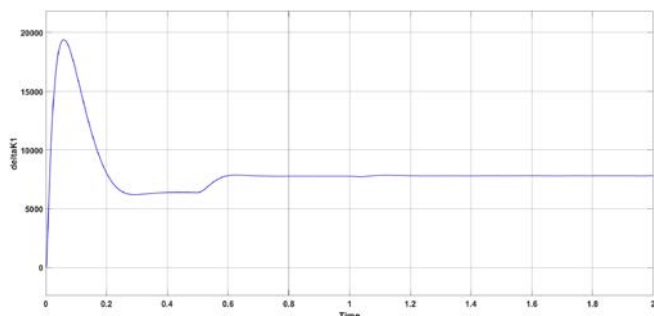


Рис. 3. Отклики сигнала ΔK_1 в процессе изменения нагрузки

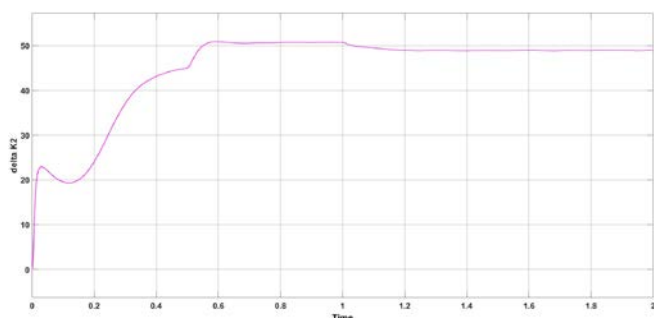


Рис. 4. Отклики сигнала ΔK_2 в процессе изменения нагрузки

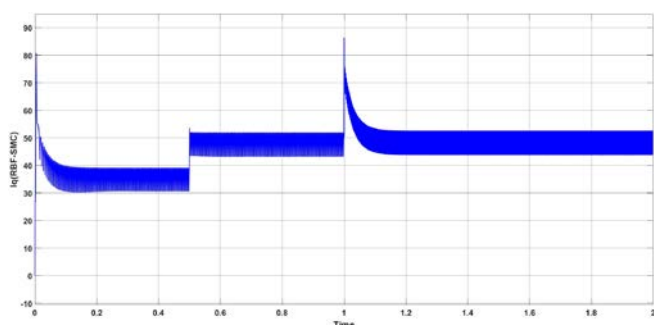


Рис. 5. Изменение тока i_q в процессе изменения нагрузки

Результаты отклика скорости при воздействии нагрузки показаны на рис. 2. При появлении нагрузочного возмущения скорость двигателя в обоих методах временно снижается. Однако предложенный регулятор восстанавливает скорость быстрее, а

амплитуда отклонения скорости оказывается значительно меньше. Это подтверждает, что метод, использующий RBF для непосредственной настройки K_1 , K_2 , позволяет скользящему регулятору лучше адаптироваться к изменениям нагрузки.

По полученным результатам моделирования можно сделать 2 основных вывода.

Во-первых, интегральная поверхность скольжения способствует повышению качества слежения за скоростью и более эффективному устранению статической ошибки в установившемся режиме.

Во-вторых, использование сети RBF для непосредственного формирования адаптивных составляющих K_1 , K_2 позволяет регулятору автоматически подстраивать уровень управляющего воздействия в зависимости от текущего состояния двигателя. Благодаря этому регулятору не требуется использовать слишком большие фиксированные коэффициенты скольжения, как в традиционном SMC.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен метод адаптивного скользящего управления для контура скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами PMSM на основе нейронной сети RBF. В данном методе интегральная поверхность скольжения используется для повышения качества слежения за скоростью и уменьшения установившейся ошибки. В отличие от традиционного скользящего регулятора, использующего фиксированные коэффициенты, сеть RBF построена для непосредственной настройки двух коэффициентов K_1 , K_2 закона управления в зависимости от рабочего состояния системы через входные сигналы ω , ω_{ref} , S_ω и i_q .

Результаты исследования показывают, что предложенный регулятор способен обеспечивать робастность по отношению к нагрузочным возмущениям, неопределённостям модели. Вместе с тем данный метод требует экспериментальной проверки в реальном времени для более глубокой оценки его практической применимости в высокопроизводительных электроприводах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Morioka N., & Oyori H. (2012). Fuel System Design for the More Electric Engine. Volume 1: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation. doi: <https://doi.org/10.1115/gt2012-68374>
- [2] X. Huang, L. Xiao, R. R. Sattarov and X. Meng, "Fast Vector Selection Method of Flow Regulation on Aviation Electric Fuel Pump," 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2022, pp. 385-390, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787168>
- [3] Lingfei Xiao, Zirui Han, Leiming Ma, Bin Jiang, Intelligent robust control for aviation electric fuel pump based on second order integral sliding mode with UDE, Journal of the Franklin Institute, Volume 361, Issue 8, 2024, 106811, ISSN 0016-0032, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2024.106811>
- [4] B. Wang and P. Xue, "Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on Radial Basis Function Neural Network," 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA), Nanjing, China, 2023, pp. 937-942, doi: [10.1109/IFEAA60725.2023.10429058](https://doi.org/10.1109/IFEAA60725.2023.10429058)
- [5] Ajasa A., Aremu M. B., Nasir A. Sliding-Mode Control Strategies for PMSM speed control: A Comprehensive Review, Taxonomy and Research Gaps //arXiv preprint arXiv:2510.18420. 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.18420>