

В. В. Серебрянный, канд. техн. наук, зав. кафедры, vsereb@bmstu.ru,

А. А. Бошляков, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@bmstu.ru,

А. И. Огородник, аспирант, alexander.ogorodnik@bmstu.ru,

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Регулирование тока и силовомоментное управление в приводах захватных устройств роботов

В настоящее время актуальна задача совершенствования оцувствленных захватных устройств роботов и их силовомоментных алгоритмов управления благодаря развитию таких областей робототехники, как медицинская и реабилитационная робототехника, протезирование, коллаборативная робототехника и других областей, где стоит задача ограничения или минимизации нагрузок, действующих на объект манипулирования. Силовомоментное управление в электроприводах оцувствленных захватных устройствах в конечном счете обеспечивается посредством регулирования тока. Поэтому целью данной статьи является анализ работы различных регуляторов тока в контексте их применения в оцувствленных захватных устройствах и манипуляторах с силовомоментным управлением. В рамках статьи рассмотрены пропорционально-интегральный, адаптивный, релейный и релейный с подстройкой ширины гистерезиса регуляторы тока. Из перечисленных регуляторов перспективным регулятором тока для силовомоментного управления является гистерезисный регулятор с подстройкой ширины петли гистерезиса, поскольку он обеспечивает стабилизацию частоты переключений и уменьшение пульсаций тока в импульсном усилителе мощности двигателя при сохранении высокого быстродействия и достаточной робастности. Для релейного регулятора с подстройкой ширины гистерезиса предложены редуцированная и линеаризованная математические модели контура подстройки. На основе линеаризованной модели построена методика синтеза контура подстройки, предполагающая использование стандартного частотного синтеза систем управления с обратной связью и позволяющая распространить на контур подстройки такие параметры качества, как запасы устойчивости, время переходного процесса, частоту среза. На основе синтезированных регуляторов тока проведен анализ силовомоментного управления двупальным захватным устройством, учитывающий такие показатели, как точность обеспечения заданного момента, стабильность частоты переключений и пульсации тока в усилителе мощности. Результаты сравнения регуляторов могут быть использованы для рационального выбора регулятора тока, обеспечивающего моментное управление, а предложенная методика синтеза релейного регулятора с подстройкой частоты обеспечивает построение регулятора с заданными параметрами качества управления.

Ключевые слова: регулятор тока, токовый контур, силовомоментное управление, оцувствление, захватное устройство, схват, захват, распределение усилий

Введение

В настоящее время оцувствленные робототехнические и манипуляционные системы все чаще применяются в различных технических областях. Одним из важных параметров, определяющих эффективность таких систем, является качество силовомоментного управления [1, 2]. Вследствие этого на сегодняшний день существует необходимость в совершенствовании алгоритмов управления оцувствленными манипуляторами и захватными устройствами роботов. Наиболее распространенными исполнительными устройствами в робототехнике являются электроприводы. В них задание момента обеспечивается за счет регулирования тока. Поэтому целью данной статьи является рассмотрение работы различных методов управления током с точки зрения регулирования сил в захватном устройстве робота и алгоритмов распределения моментов между приводами для обеспечения захвата объекта

управления с заданной силой и реализации силовомоментного управления.

Регуляторы тока

Существует множество регуляторов тока двигателей и источников питания. Самыми распространенными регуляторами тока являются линейные ПИ регуляторы и нелинейные релейные регуляторы [3]. ПИ регуляторы имеют малые пульсации тока, стабильную частоту коммутации силовых ключей. Это позволяет уменьшить электрические потери энергии и шумы в усилителях, использующих такие регуляторы. Релейные регуляторы обладают меньшим временем переходных процессов и лучшими динамическими характеристиками, но в то же время имеют большие пульсации и переменную частоту коммутации силовых ключей.

Теоретическая модель двигателя постоянного тока. Для математического описания электромеханических процессов в приводе,

построенном на базе двигателя постоянно-го тока, будем использовать нестационарную модель с сосредоточенными параметрами [3]. Трение будем описывать кулоновской моделью с линеаризацией около нулевых скоростей [4]. Будем предполагать, что в сигналах измерения датчиков спектр шума будет соответствовать белому шуму с ограниченной полосой частот. Тогда система дифференциальных уравнений, в первом приближении описывающая электродвигатель, будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{d}{dt}(Li) + Ri + C_E\Omega; \\ M = C_T i; \\ \Omega = \frac{d\theta}{dt}; \\ \varepsilon = \frac{d\Omega}{dt}; \\ J\varepsilon = M + M_{OUT}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где u — напряжение; L — индуктивность; R — сопротивление; i — сила тока; Ω — угловая скорость; C_E — постоянная противоЭДС; C_T — постоянная момента; M — момент электропривода; M_{OUT} — внешний возмущающий момент.

Типовой ПИ регулятор тока. На рис. 1 изображен типовой ПИ регулятор тока, где i_T — целевое значение тока; i — измеренное значение тока; δi — сигнал рассогласования. На выходе ПИ регулятора установлен импульсный элемент (ИЭ), формирующий управляющее воздействие с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для компенсации влияния противоЭДС, повышения быстродействия и улучшения

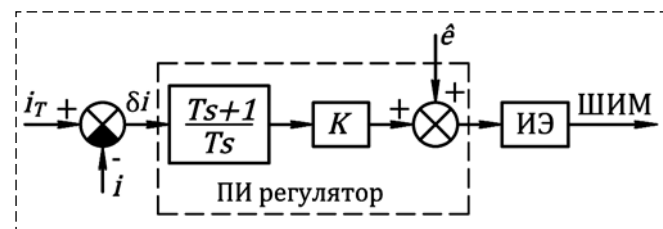


Рис. 1. ПИ регулятор тока

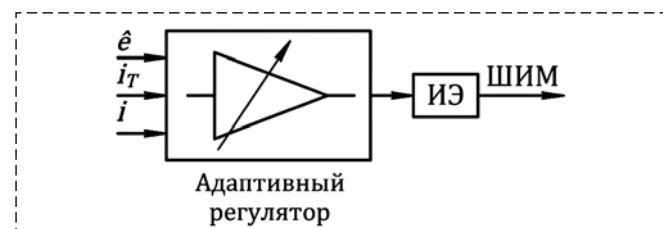


Рис. 2. Адаптивный регулятор тока

частотного отклика токового контура обычно добавляют сигнал оценки противоЭДС $\hat{e}$ в виде положительной обратной связи.

Рассматриваемый ПИ регулятор тока в операторном виде описывается следующей формулой:

$$W(s) = k_1 + \frac{k_2}{s} + \hat{e} = K \frac{Ts+1}{Ts} + \hat{e},$$

где k_1 — коэффициент усиления пропорциональной составляющей; k_2 — коэффициент усиления интегральной составляющей; K — общий коэффициент усиления; T — постоянная времени, определяющая точку перехода частотной характеристики от -1 -го наклона к 0 -му; $\hat{e}$ — оценочное значение противоЭДС.

Адаптивный регулятор тока. На рис. 2 изображена структурная схема адаптивного регулятора тока. Адаптивный регулятор тока на основе целевого и текущего значений силы тока в обмотке, а также на основе оценки противоЭДС с помощью уравнения динамики токового контура формирует управляющее воздействие, которое за такт квантования должно привести систему в заданное состояние. Такой метод управления чувствителен к изменению параметров системы и к ошибкам измерения переменных системы. Поэтому для обеспечения надежной работы такого регулятора необходимо точно измерять и оценивать ток и противоЭДС, а также идентифицировать индуктивность и сопротивление цепи якоря.

Рассмотрим синтез адаптивного регулятора тока. В первом приближении уравнение обмотки цепи якоря из формулы (1) можно переписать в следующем виде:

$$u = L \frac{di}{dt} + R(i_0 + di) + e, \quad (2)$$

где i_0 — сила тока в начальный момент; di — сила тока в конце периода квантования. Определим необходимое приращение тока:

$$di = \frac{u - Ri_0 - e}{R + \frac{L}{T}};$$

$$di = K_1(u - K_2),$$

где $K_1 = \frac{1}{R + \frac{L}{T}}$, $K_2 = Ri_0 + e$, e — противоЭДС.

Тогда искомая формула регулятора будет иметь вид

$$u = \frac{di}{K_1} + K_2,$$

где K_1 и K_2 — подстраиваемые параметры регулятора.

Стоит отметить, что такие регуляторы используются редко, несмотря на свои хорошие динамические характеристики, так как они не робастны.

Гистерезисный регулятор. На рис. 3, а изображена гистерезисная характеристика релейного регулятора тока. Гистерезис релейного регулятора H равен удвоенной амплитуде пульсаций тока $2\Delta i$. На рис. 3, б представлена схема релейного регулятора, где ШИМ-сигнал на выходе формируется за счет возникновения устойчивых автоколебаний в токовом коридоре $2\Delta i$.

Благодаря своим хорошим динамическим характеристикам, простоте и надежности релейные регуляторы нашли широкое распространение как в области источников питания, так и в области усилителей электроприводов [2, 5—8]. Из-за высокого быстродействия регулятора можно добиться уменьшения pulsa-

ций момента и большей плавности управления [9—12]. Данные регуляторы имеют недостатки в виде переменной частоты коммутации и больших пульсаций силы тока. Максимальная частота коммутации и размах пульсаций связаны формулой

$$f_c = \frac{u}{4L\Delta i},$$

где f_c — частота коммутации силовых ключей усилителя мощности; Δi — амплитуда пульсаций силы тока.

Ширина петли гистерезиса определяется максимально допустимой частотой коммутации, из-за чего пульсации Δi в процессе работы будут всегда завышенными. Кроме того, в процессе работы из-за переменной частоты переключений шумы будут распределены по широкой полосе частот и их будет сложно фильтровать.

Релейный регулятор тока с подстройкой ширины петли гистерезиса. На рис. 4 изображена схема релейного регулятора тока с подстройкой ширины петли гистерезиса. Ширина петли гистерезиса формируется измерителем и регулятором частоты $W_R(s)$ исходя из частоты переключений на выходе релейного регулятора тока.

Для борьбы с недостатками обычных релейных регуляторов были предложены релейные регуляторы с подстройкой ширины петли гистерезиса. Такие регуляторы стабилизируют частоту переключений и уменьшают пульсации силы тока за счет регулирования ширины петли гистерезиса [13, 14]. Существуют частные решения по выбору параметров контура стабилизации частоты переключения ключей [2, 13, 15—18], которые, кроме того, могут требовать больших вычислительных ресурсов [17, 19—21]. Также для стабилизации частоты коммутации применяются регуляторы с нечеткой логикой [22—24]. Поскольку существующие методы являются частными, возникает необходимость в формировании общего подхода к синтезу контура подстройки ширины петли гистерезиса.

Теоретическая модель контура подстройки ширины петли гистерезиса. Решая уравнение Кирхгофа, из системы уравнений (2) для стационарного случая будем иметь

$$i = \frac{u - e}{R} - \frac{u - e - Ri_0}{R} e^{-\frac{t}{L/R}}, \quad (3)$$

где e — противоЭДС.

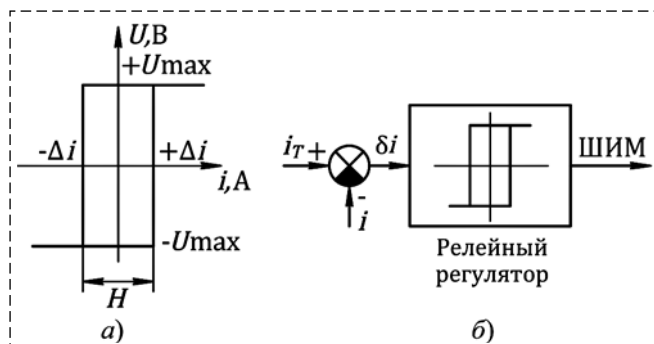


Рис. 3. Характеристика (а) и схема (б) релейного регулятора тока

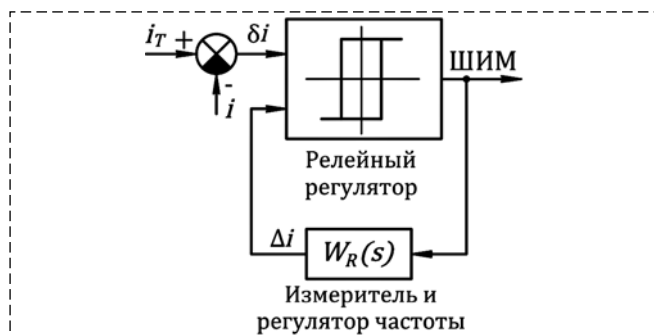


Рис. 4. Релейный регулятор тока с контуром подстройки ширины петли гистерезиса

Тогда в первом приближении, согласно уравнению (3), период T_C и частота f_C переключений в токовом коридоре гистерезисного регулятора будут описываться следующими формулами, где период переключений определяется как время, в течение которого ток от начального положения, соответствующего нижней границе токового коридора, достигает верхней границы и снова возвращается к нижней границе:

$$T_C = \frac{4Lu\Delta i}{u^2 - (e + Ri_0)^2}; \quad (4)$$

$$f_C = \frac{u^2 - (e + Ri_0)^2}{4Lu\Delta i}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что изменение ширины петли гистерезиса, которая равна $2\Delta i$, будет обратно пропорционально изменению частоты коммутации силовых ключей.

Синтез контура подстройки ширины петли гистерезиса. Рассмотрим методику синтеза контура подстройки ширины петли гистерезиса. Формулы (4) и (5) можно привести к виду

$$T_C = \frac{4L\Delta i}{u(1 - (e + Ri_0)^2 / u^2)}; \quad (6)$$

$$f_C = \frac{u(1 - (e + Ri_0)^2 / u^2)}{4L\Delta i}. \quad (7)$$

Тогда при условии $e + Ri_0 \ll u$ получим:

$$T_C \approx \frac{4L\Delta i}{u}; \quad (8)$$

$$f_C \approx \frac{u}{4L\Delta i}.$$

На основе формул (6) или (7), добавив динамическое звено, можно сформировать контур подстройки ширины петли гистерезиса. Следует заметить, что общий коэффициент усиления в контуре будет изменяться при изменении тока и противоЭДС, причем в регуляторе на основе формулы (6) с увеличением противоЭДС коэффициент усиления в контуре подстройки будет увеличиваться и запасы устойчивости будут уменьшаться. Поэтому рациональней строить контур подстройки ширины петли гистерезиса на основе

формулы (7), вводя обратную связь по частоте коммутации силовых ключей в усилителе мощности для ее стабилизации. Таким образом, на основе зависимости (7) сформируем контур стабилизации частоты, изображенный на рис. 5, где $K_F W(s)/s$ — передаточная функция регулятора контура подстройки частоты коммутации силовых ключей. Интегрирующее звено добавлено в передаточную функцию регулятора для того, чтобы добиться астатичности процесса подстройки частоты и развязать вход и выход системы динамическим звеном и, таким образом, избежать возникновения алгебраической петли. Следует также заметить, что интегрирующее звено должно иметь установленные нижний и верхний пределы интегрирования, чтобы избежать чрезмерного уменьшения или увеличения токового коридора.

Для синтеза классическими методами необходимо линеаризовать систему. Для этого используем уравнение (8). Тогда контур стабилизации частоты можно представить в виде, изображенном на рис. 6.

В дальнейшем можно использовать стандартные методики частотного синтеза, корневого годографа и т. д., чтобы определить корректирующее звено $W(s)$.

На основе модели, структурная схема которой изображена на рис. 6, был проведен частотный синтез и было найдено корректирующее звено в виде $K_F(Ts + 1)/Ts^2$. Отметим, что регулятор, имеющий корректирующее звено в виде K_F/s , будет более стабильным, так как устойчивость контура подстройки в данном случае будет меньше зависеть от коэффици-

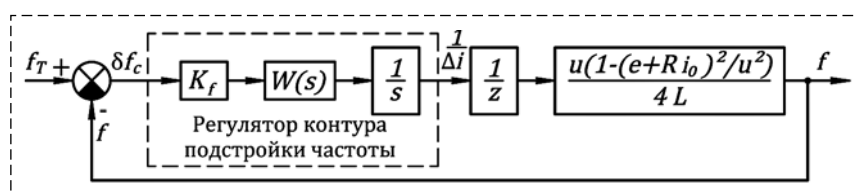


Рис. 5. Линеаризованная модель контура стабилизации частоты

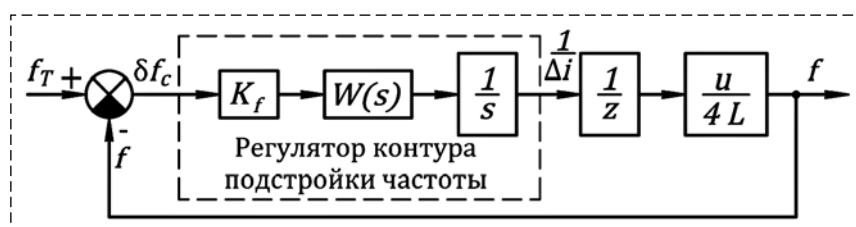


Рис. 6. Линеаризованная модель контура стабилизации частоты

ента усиления, однако выбрано более сложное корректирующее устройство в целях демонстрации работоспособности методики синтеза с применением более сложных корректирующих устройств. Переходные процессы полной модели (1) с контуром подстройки (см. рис. 4), редуцированной модели (7) и линеаризован-

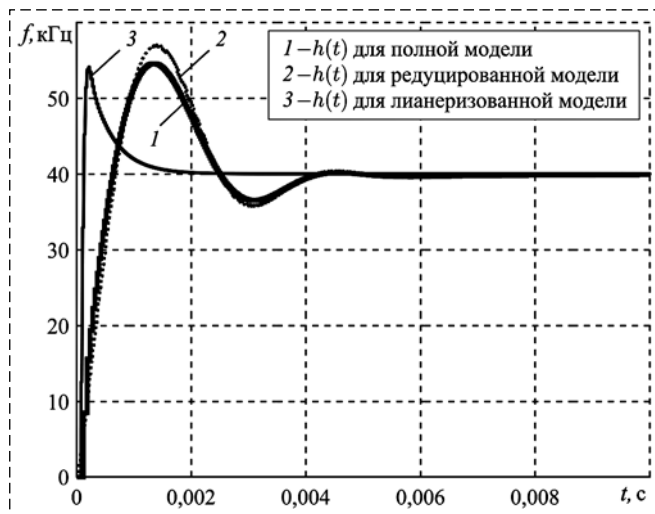


Рис. 7. Переходные процессы для различных моделей контуров подстройки частоты

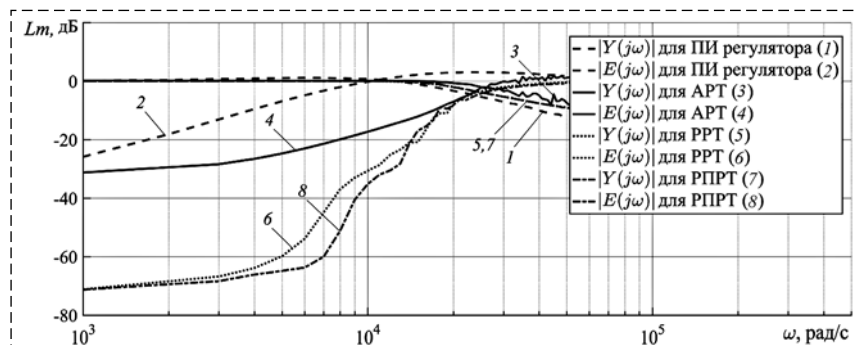


Рис. 8. Частотные характеристики контуров тока

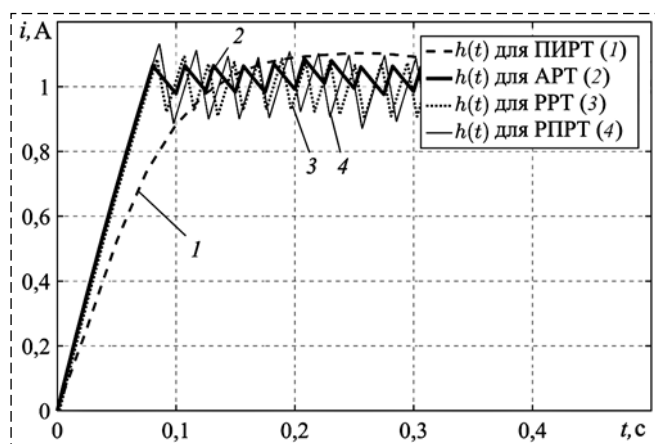


Рис. 9. Переходные процессы в контурах тока

ной модели (8) приведены на рис. 7. Из графика переходного процесса видно, что переходные процессы полной и редуцированной моделей практически совпадают. Линеаризованная модель, хотя и дает отличающийся график переходного процесса из-за того, что не учитывается влияние противоЭДС и силы тока на частоту переключения обмоток, но точно описывает запасы устойчивости. При ненулевых силах тока и противоЭДС добротность контура стабилизации частоты будет падать, а запасы устойчивости возрастать. Следовательно, по формулам (7) и (8) можно проводить синтез, гарантирующий устойчивость системы управления.

Сравнение различных регуляторов тока.

Для электропривода с параметрами $R = 1,84$ Ом, $L = 0,96$ мГн, $C_T = 22,9 \cdot 10^{-3}$ Н·м/А, $C_E = 23 \cdot 10^{-3}$ В·с/рад, $J = 9 \cdot 10^{-6}$ кг·м², $U_{\max} = 12$ В с учетом периода квантования цифровой системы управления 25 мкс был проведен синтез ПИ (ПИРТ), адаптивного (АРТ), релейного (РРТ), релейного с подстройкой гистерезиса (РПРТ) регуляторов силы тока.

На рис. 8 изображены логарифмические амплитудно-частотные характеристики замкнутой системы по выходу $|Y(j\omega)|$ и по ошибке $|E(j\omega)|$. Графики строили по серии измерений сигналов на выходе токовых регуляторов и в контуре ошибки при подаче на вход синусоидального задающего воздействия. Измерения проводили при силе тока 1 А, что близко к номинальной силе тока цепи якоря двигателя. На рис. 8 видно, что на высоких частотах наименьшей ошибкой обладают релейные регуляторы,

причем частотные характеристики классического релейного регулятора от релейного регулятора с подстройкой частоты коммутации силовых ключей отличаются не значительно. Высокие динамические характеристики таких регуляторов позволят качественнее и точнее обеспечивать задание момента [25] в звеньях захватного устройства или манипулятора.

На рис. 9 изображены переходные процессы в токовых контурах с различными регуляторами. Из графиков следует, что наилучшими переходными характеристиками обладают контуры с релейными и с адаптивным регуляторами.

Силомоментное управление

Регуляторы тока — базовые элементы в составе очувствленного захватного устройства или манипулятора на электроприводах для регулирования моментов и сил [1, 26]. Выше были рассмотрены различные регуляторы тока, предложен метод линеаризации и синтеза релейного регулятора с подстройкой ширины петли гистерезиса. Далее рассмотрим элементы силомоментного управления и применение в них данных регуляторов тока.

На рис. 10 изображен стенд, с помощью твердотельной модели которого в приложении *simcape simulink* проводился анализ работы алгоритмов силомоментного управления. Стенд состоит из левой (1) и правой (2) губок захватного устройства, вращательных шарниров с приводами (3), вращательных свободных шарниров (4), датчиков силы (5), корпуса для крепления датчиков силы (6).

Теоретическая модель механической системы. Рассмотрим тестовый алгоритм силомоментного очувствления для проверки на нем различных регуляторов тока.

На рис. 11 показан простой случай действия сил на твердое тело. Для обеспечения устойчи-

вого удержания и перемещения тела с заданным ускорением необходимо выполнить следующие условия:

$$\begin{cases} F_{FR1\max} \geq mg/2; \\ F_{FR2\max} \geq mg/2; \\ \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_\Sigma, \end{cases}$$

где $F_{FR1\max}$, $F_{FR2\max}$ — модули силы трения покоя; $\vec{F}_\Sigma$ — суммарная сила; $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ — приложенные силы.

Введя коэффициент запаса k и предполагая, что $F_{FRi\max} = fF_i$, $i = 1, 2$, где f — коэффициент трения покоя, получим

$$\begin{cases} F_1 \geq F_K; \\ F_2 \geq F_K; \\ \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_\Sigma, \end{cases} \quad (9)$$

где $F_K = kmg/2f$.

Далее можно предложить разные критерии выбора F_1 и F_2 , удовлетворяющих системе уравнений (9). Наиболее робастным оказался критерий обеспечения определенной силы зажима N :

$$\begin{cases} F_1 \geq F_K; \\ F_2 \geq F_K; \\ F_1 + F_2 = F_\Sigma; \\ F_1 - F_2 = N. \end{cases} \quad (10)$$

Тогда систему силомоментного управления можно разложить на два контура: контур обеспечения силы зажима и контур, обеспечивающий суммарное движение объекта.

Из соотношений (10) получим:

$$\begin{cases} F_1 \geq F_K; \\ F_2 \geq F_K; \\ F_1 = \frac{F_\Sigma + N}{2}; \\ F_2 = \frac{F_\Sigma - N}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

Силомоментное управление при разных регуляторах тока. С учетом кинематики захватного устройства было проведено моделирование поведения системы с помощью твердотельной модели стенда и нелинейных моделей приводов.

На рис. 12 представлены результирующие силомоментные величины при отработке задающего воздействия по углу $\pm\pi/3$ с частотой

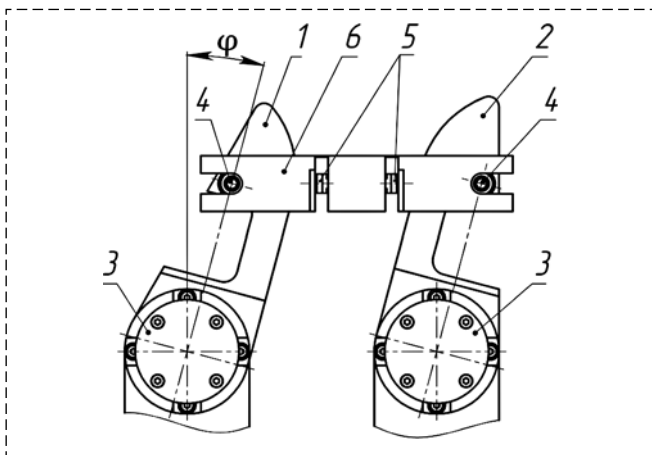


Рис. 10. Экспериментальный стенд для отработки элементов силомоментного управления

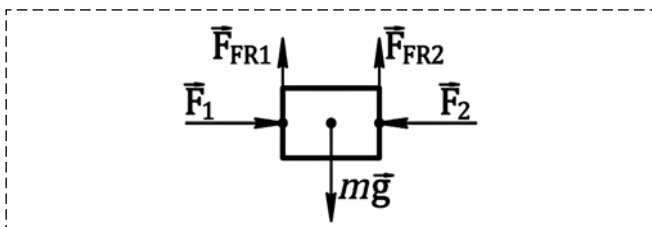


Рис. 11. Силы, действующие на тело

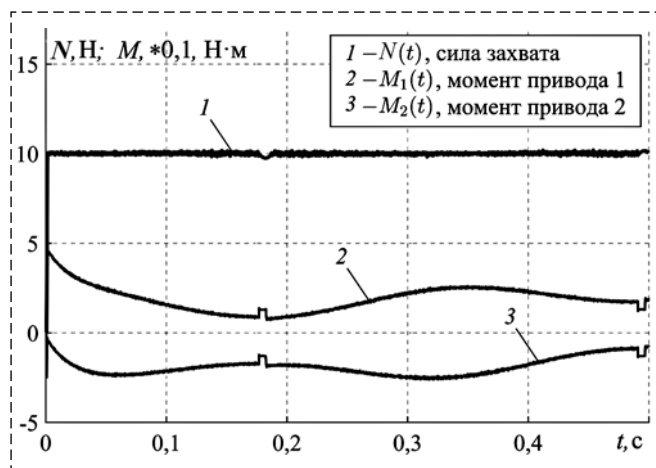


Рис. 12. Силы и моменты в стенде

6 Гц и распределением усилий согласно формуле (11). При применении разных регуляторов тока на такой низкой рабочей частоте все регуляторы тока обеспечили достаточно точное задание момента. Из рис. 12 видно, что удастся обеспечить постоянную силу зажатия $N = 10$ Н.

На рис. 13, а изображены диаграммы частот переключений классического релейного регулятора и релейного регулятора с контуром подстройки гистерезиса. Релейный регулятор тока с подстройкой гистерезиса обеспечивает в процессе работы стабильную частоту переключений 40 кГц, в то время как частота переключений классического релейного регулятора под влиянием противоЭДС и тока может уменьшаться в 2 раза. ПИ регулятор с ШИМ и адаптивный и релейный с адаптацией гистерезиса также обеспечивают стабильную частоту коммутации в 40 кГц.

Результаты сравнительного анализа регуляторов тока электропривода

Тип регулятора тока	ПИ регулятор	АРТ	РРТ	РПРТ
Точность	Хорошо	Хорошо	Очень хорошо	Очень хорошо
Быстродействие	Хорошо	Очень хорошо	Очень хорошо	Очень хорошо
Пульсации тока	Очень хорошо	Очень хорошо	Удовл.	Хорошо
Стабильность частоты	Очень хорошо	Очень хорошо	Плохо	Хорошо
Робастность	Хорошо	Плохо	Хорошо	Удовл.

На рис. 13, б изображены графики пульсаций силы тока в обмотке якоря двигателя для различных регуляторов тока. Видно, что релейный регулятор имеет стабильно большие пульсации, определяемые токовым коридором. Релейный регулятор с подстройкой гистерезиса обеспечивает уменьшение пульсаций за счет адаптивного регулирования токового коридора. При использовании ПИ регулятора наблюдаются наименьшие пульсации силы тока.

В таблице приведены результаты сравнительного анализа регуляторов тока исполнительных модулей захватных устройств роботов.

Заключение

Были рассмотрены различные регуляторы тока для реализации силомоментного управле-

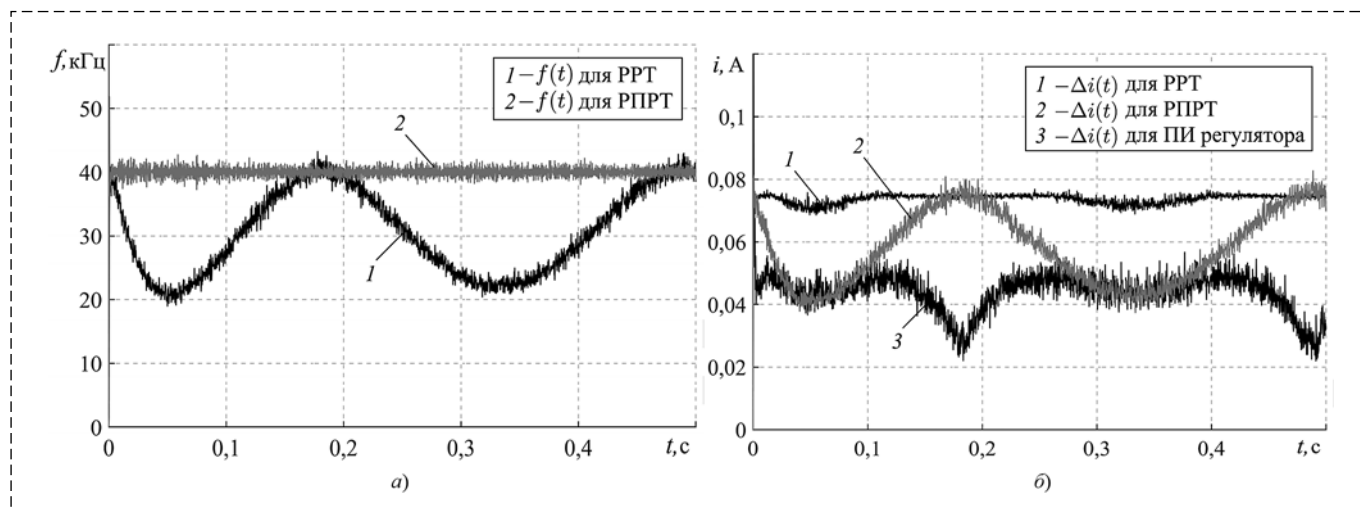


Рис. 13. Частоты переключений в усилителе мощности (а) и пульсации тока (б)

ния в очувствленных захватных устройствах на основе электроприводов. Приведена методика синтеза релейного регулятора с подстройкой ширины петли гистерезиса, позволяющая использовать классические подходы синтеза систем управления с обратными связями для синтеза контура подстройки. Такой регулятор имеет простую структуру и не требует большой вычислительной производительности, кроме того, может реализовываться на стандартных цифровых и аналоговых микросхемах. Четыре базовых типа регуляторов обеспечили возможность силомоментного управления по выбранному закону управления, описываемого уравнением (11). Результаты сравнительного анализа регуляторов приведены в таблице.

Из анализа полученных результатов следует, что для реализации токового контура и использования его в силомоментном управлении приводом захватного устройства робота целесообразно выбрать ПИ регулятор тока, поскольку он обеспечивает приемлемое быстродействие и качество управления при наиболее простой реализации. В случае повышенных требований к быстродействию или требованию к астатизму контура тока в условиях действия противоЭДС следует выбрать один из видов релейных регуляторов. В случае необходимости обеспечения лучшей электромагнитной совместимости, а также исключения попадания частоты переключения обмоток электродвигателя в слышимый диапазон следует выбрать релейный регулятор с подстройкой ширины петли гистерезиса. Если таких требований не предъявляется, целесообразно применить классический релейный регулятор тока.

Список литературы

1. Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 113.
2. Mesherayakov V., Voekov V., Ivashkin V. Designing the universal vector control system with relay current regulator principle for general purpose industrial AC motor drive control // *Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. IEEE International. 2016. P. 680—685.
3. Блейз Е. С., Бродовский В. Н., Введенский В. А. Следящие приводы. Т. 2: Электрические следящие приводы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 880 с.
4. Marques F., Flores P., Claro P., Lankarani H. A survey and comparison of several friction force models for dynamic

analysis of multibody mechanical systems // *Nonlinear Dynamics*. 2016. Vol. 86 (3). P. 1407—1443.

5. Dutta K., Puthra P., Das P. Constant torque angle controlled permanent magnet synchronous motor drive using hysteresis band current controller // *Power Electronics (IICPE), 2016 7th India International Conference on. IEEE*. 2016. P. 1—5.
6. Poonia A., Dey A. Space phasor based improved hysteresis current controller for shunt active power filter using 3-level inverter // *Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016 18th European Conference on. IEEE*. 2016. P. 1—10.
7. Priandana E., Saputra M., Prabowo Y., Dahono P. Analysis and design of variable double-band hysteresis current controller for single-phase full-bridge bidirectional converters // *Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), 2014 International Symposium on. IEEE*. 2014. P. 143—148.
8. Putri A., Rizqian A., Rozzi F., Zakkia N., Haroen Y., Dahono P. A hysteresis current controller for grid-connected inverter with reduced losses // *Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE), International Conference of IEEE*. 2016. P. 167—170.
9. Gobbi R., Ramar K. Optimisation techniques for a hysteresis current controller to minimise torque ripple in switched reluctance motors // *IET electric power applications*. 2009. Vol. 3 (5). P. 453—460.
10. Kurian S., Nisha G. Torque ripple minimization of SRM using torque sharing function and hysteresis current controller // *Control Communication & Computing India (ICCC), 2015 International Conference on. IEEE*. 2015. P. 149—154.
11. Muralidhar J. E., Aranas P. V. Torque ripple minimization & closed loop speed control of BLDC motor with hysteresis current controller // *Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2014 2nd International Conference on. IEEE*. 2014. P. 1—7.
12. Shi T., Niu L., Li W. Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using sliding mode variable structure control // *Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese. IEEE*. 2010. P. 332—337.
13. Колоколов Ю. В., Тей Д. О. Динамика релейно-импульсных регуляторов переменного тока с адаптацией гистерезиса // *Вестник Югорского государственного университета*. 2011. № 3 (22).
14. Серебряный В. В., Бошляков А. А., Огородник А. И. Релейные регуляторы тока электроприводов с адаптацией ширины петли гистерезиса // *Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017)*. 2017. С. 177—180.
15. Suru C., Dobriceanu M., Subtirelu G. Direct current control by constant frequency hysteresis controller in active filtering systems // *Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2017 5th International Symposium on. IEEE*. 2017. P. 1—6.
16. Naik A., Babu B., Panda A. Improved performance of adaptive hysteresis current controller based vector control of PMSM drive system // *Students' Technology Symposium (TechSym), IEEE*. 2011. P. 303—309.
17. Quang N. K., Hieu N. T., Ha Q. P. FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters // *IEEE transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 61 (12). P. 6574—6582.
18. Дудкин М. М., Брылина О. Г., Цытович Л. И., Тюгаев А. В. Частотно-широотноимпульсный адаптивный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2013. Т. 13, № 2. С. 45—52.

19. **Panda G., Dash S., Sahoo N.** Comparative performance analysis of Shunt Active power filter and Hybrid Active Power Filter using FPGA-based hysteresis current controller // *Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on. IEEE.* 2012. P. 1–6.
20. **Prommeuan S., Kinnares V., Charumit C.** Control of a multifunctional 3-phase 4-wire grid connected converter using adaptive hysteresis current controller // *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on. IEEE.* 2014. P. 3234–3239.
21. **Talib M., Mat S., Hamidon H., Ibrahim Z., Rasin Z.** Hysteresis current control of induction motor drives using dSPACE DSP controller // *Power and Energy (PECon), 2016 IEEE International Conference on. IEEE.* 2016. P. 522–527.
22. **Farah N., Talib M., Ibrahim Z., Mat I., Lazi.** Variable hysteresis current controller with fuzzy logic controller based induction motor drives. *System Engineering and Technology (ICSET), 2017 7th IEEE International Conference on. IEEE.* 2017. P. 122–127.
23. **Tabatabaei H., Fathi S., Jedari M.** A comparative study between conventional and fuzzy logic control for APFs by applying adaptive hysteresis current controller. *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on. IEEE.* 2017. P. 1313–1318.
24. **Uddin M., Ronald S.** Fuzzy logic based speed controller and adaptive hysteresis current controller based IPMSM drive for improved dynamic performance. *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International. IEEE.* 2011. P. 1–6.
25. **Nakashima Y., Ando T., Kobayashi Y., Fujie M.** Gait-controlled mobility-aid robot: Treadmill motor current based anteroposterior force estimation using frictional model reflects characteristics of ground reaction force. *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on. IEEE.* 2012. P. 1305–1310.
26. **Aghili F.** Fault-tolerant torque control of BLDC motors // *IEEE Transactions on Power Electronics.* Vol. 26 (2). P. 355–363.

Current Control and Force Control in the Drives of Robot Grippers

V. V. Serebrennyj, vsereb@bmstu.ru, **A. A. Boshlyakov**, boshlyakov@bmstu.ru,

A. I. Ogorodnik, alexander.ogorodnik@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding authors: **Boshlyakov A. A.**, Associate Professor,
Deputy Department Chair, e-mail: boshlyakov@bmstu.ru

Accepted on 10.05.18

Currently, the task of improving the robot grippers and their force control algorithms is urgent, thanks to the development of such areas of robotics as medical and rehabilitation robotics, prosthetics, collaborative robotics and other areas where there is the task of limiting or minimizing the loads acting on the object of manipulation. The force control in the electrically driven dexterous gripper is ultimately provided by the current control. Therefore, the purpose of this article is to analyze the operation of various current regulators in the context of their application in dexterous gripper and manipulators with a force control. The article considers the following current controllers: proportional-integral, adaptive, hysteretic and hysteretic with adjusting loop. Among these controllers, the hysteresis controller with adjusting loop is promising for the force control gripper and manipulator, since it provides switching frequency stabilization and current ripples reduction in a motor driver while maintaining fast response and sufficient robustness. For the hysteresis current controller with adjusting loop, reduced and linearized mathematical models of the adjusting loop are proposed. Moreover, based on the linearized model, methodic is constructed for the adjusting loop synthesis, which assumes the using of the classical control theory. Based on the synthesized current controllers, the analysis of the two-fingered gripper control system carried out, taking into account such factors as the force control accuracy, switching frequency stability and current ripples in the motor driver. Comparison results of current controllers can be used for the rational choice of a current controller providing force control, and the proposed synthesis methodic of the current controller with adjusting loop can to provide the controller generation with given control quality parameters.

Keywords: current control, current loop, force control, torque control, dexterous gripper, gripping, forces distribution

For citation:

Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Ogorodnik A. I. Current Control and Force Control in the Drives of Robot Grippers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 542–551.

DOI: 10.17587/mau.19.542-551

References

1. **Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O.** Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque, *MATEC Web of Conferences.* EDP Sciences, 2017, vol. 113.
2. **Mesherayakov V., Voekov V., Ivashkin V.** Designing the universal vector control system with relay current regulator principle for general purpose industrial AC motor drive control, *Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), IEEE International*, 2016, pp. 680–685.
3. **Blejz E. S., Brodovskij V. N., Vvedenskij V. A.** *Sledyashchie privody. T. 2: EHlektricheskie sledyashchie privody* (Servo drives. Vol. 2: Electric servo drives), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. EH. Bauman, 2003, 880 p. (in Russian).
4. **Marques F., Flores P., Claro P., Lankarani H.** A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems, *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 86 (3), pp. 1407–1443.

5. **Dutta K., Puthra P., Das P.** Constant torque angle controlled permanent magnet synchronous motor drive using hysteresis band current controller, *Power Electronics (IICPE), 2016 7th India International Conference on. IEEE*, 2016, pp. 1–5.
6. **Poonia A., Dey A.** Space phasor based improved hysteresis current controller for shunt active power filter using 3-level inverter, *Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016 18th European Conference on. IEEE*, 2016, pp. 1–10.
7. **Priandana E., Saputra M., Prabowo Y., Dahono P.** Analysis and design of variable double-band hysteresis current controller for single-phase full-bridge bidirectional converters, *Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), 2014 International Symposium on. IEEE*, 2014, pp. 143–148.
8. **Putri A., Rizqiawan A., Rozzi F., Zakkia N., Haroen Y., Dahono P.** A hysteresis current controller for grid-connected inverter with reduced losses, *Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE), International Conference of IEEE*, 2016, pp. 167–170.
9. **Gobbi R., Ramar K.** Optimisation techniques for a hysteresis current controller to minimise torque ripple in switched reluctance motors, *IET electric power applications*, 2009, vol. 3 (5), pp. 453–460.
10. **Kurian S., Nisha G.** Torque ripple minimization of SRM using torque sharing function and hysteresis current controller, *Control Communication & Computing India (ICCC), 2015 International Conference on IEEE*, 2015, pp. 149–154.
11. **Muralidhar J. E., Aranasi P. V.** Torque ripple minimization & closed loop speed control of BLDC motor with hysteresis current controller. *Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2014 2nd International Conference on IEEE*, 2014, pp. 1–7.
12. **Shi T., Niu L., Li W.** Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using sliding mode variable structure control, *Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese. IEEE*, 2010, pp. 332–337.
13. **Kolokolov Yu. V., Tej D. O.** Dinamika relejno-impul'snykh regulyatorov peremennogo toka s adaptatsiej gistereza (Dynamics of relay-pulse AC controllers with hysteresis adaptation), *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3 (22) (in Russian).
14. **Serebrennyj V. V., Boshlyakov A. A., Ogorodnik A. I.** Relejnnye regulatory toka ehlektroprivodov s adaptatsiej shiriny petli gistereza (Hysteresis controller electric drives with adaptation of the hysteresis loop width), *Desyataya vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2017)*, 2017, pp. 177–180 (in Russian).
15. **Suru C., Dobriceanu M., Subtirelu G.** Direct current control by constant frequency hysteresis controller in active filtering systems. *Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2017 5th International Symposium on. IEEE*, 2017, pp. 1–6.
16. **Naik A., Babu B., Panda A.** Improved performance of adaptive hysteresis current controller based vector control of PMSM drive system, *Students' Technology Symposium (TechSym), IEEE*, 2011, pp. 303–309.
17. **Quang N. K., Hieu N. T., Ha Q. P.** FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters, *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61 (12), pp. 6574–6582.
18. **Dudkin M. M., Brylina O. G., Tsytoich L. I., Tyugaev A. V.** *Chastotno-shirotnoimpul'snyj adaptivnyj regulyator peremennogo napryazheniya s integriruyushhej sistemoy upravleniya* (Pulse-frequency-width adaptive alternating voltage regulator with integrating control system), *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 45–52 (in Russian).
19. **Panda G., Dash S., Sahoo N.** Comparative performance analysis of Shunt Active power filter and Hybrid Active Power Filter using FPGA-based hysteresis current controller, *Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on IEEE*, 2012, pp. 1–6.
20. **Prommeuan S., Kinnaree V., Charumit C.** Control of a multifunctional 3-phase 4-wire grid connected converter using adaptive hysteresis current controller, *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on IEEE*, 2014, pp. 3234–3239.
21. **Talib M., Mat S., Hamidon H., Ibrahim Z., Rasin Z.** Hysteresis current control of induction motor drives using dSPACE DSP controller. *Power and Energy (PECon), 2016 IEEE International Conference on. IEEE*, 2016, pp. 522–527.
22. **Farah N., Talib M., Ibrahim Z., Mat I., Lazi.** Variable hysteresis current controller with fuzzy logic controller based induction motor drives, *System Engineering and Technology (ICSET), 2017 7th IEEE International Conference on IEEE*, 2017, pp. 122–127.
23. **Tabatabaei H., Fathi S., Jedari M.** A comparative study between conventional and fuzzy logic control for APFs by applying adaptive hysteresis current controller, *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on IEEE*, 2017, pp. 1313–1318.
24. **Uddin M., Ronald S.** Fuzzy logic based speed controller and adaptive hysteresis current controller based IPMSM drive for improved dynamic performance, *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 2011*, pp. 1–6.
25. **Nakashima Y., Ando T., Kobayashi Y., Fujie M.** Gait-controlled mobility-aid robot: Treadmill motor current based anteroposterior force estimation using frictional model reflects characteristics of ground reaction force, *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on IEEE*, 2012, pp. 1305–1310.
26. **Aghili F.** Fault-tolerant torque control of BLDC motors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26 (2), pp. 355–363.