

УДК 621.865

DOI 10.35211/1990-5297-2024-9-292-14-19

М. Ю. Ветлицын

**ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ***

Волгоградский государственный технический университет

mikhail.vetlitsyn@mail.ru

В работе описано применение метода оптимального управления электроприводами для реконфигурируемых устройств различного назначения. Представлено решение частного случая управления малогабаритным адаптивным захватным устройством в заданное время.

Ключевые слова: реконфигурируемое устройство, адаптивный захват, оптимальное управление электроприводом, программные перемещения.

М. Yu. Vetlitsyn

**ABOUT OPTIMAL ELECTRIC DRIVE CONTROL
OF RECONFIGURABLE DEVICES**

Volgograd State Technical University

The paper describes the application of the method of optimal control of electric drives for reconfigurable devices for various purposes. A solution to the special case of controlling a small-sized adaptive gripping device at a given time is presented.

Keywords: reconfigurable device, adaptive grip, optimal electric drive control, programmed movements.

© Ветлицын М. Ю., 2024.

* Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта 35/637-24.

Введение

Оптимальное управление в общем случае должно обеспечить наилучшие показатели работы как электропривода, так и самого реконфигурируемого устройства при соблюдении ограничений, накладываемых конструкцией узлов устройства и электроприводов [1–2]. Цель работы – определение способа управления реконфигурируемым изделием для получения заданной реконфигурации и поддержание полученного состояния при наличии внешних возмущающих воздействий.

Конструкции зажимных элементов захват-

ных устройств, несущих элементов крыла беспилотных летательных аппаратов, стоп шагающих движителей наиболее часто в существующих робототехнических системах представляют постоянные по форме тела. Для робототехнических систем возможно применение реконфигурируемых конструкций в крыльях летательных аппаратов (рис. 1, б [3–4]); в рабочих элементах захватных устройств (рис. 1, а [5–6]); в механизмах шагания (рис. 1, в [7]). Оптимальное управление электроприводом подобных конструкций, меняющих форму (реконфигурируемых), является предметом данной статьи.

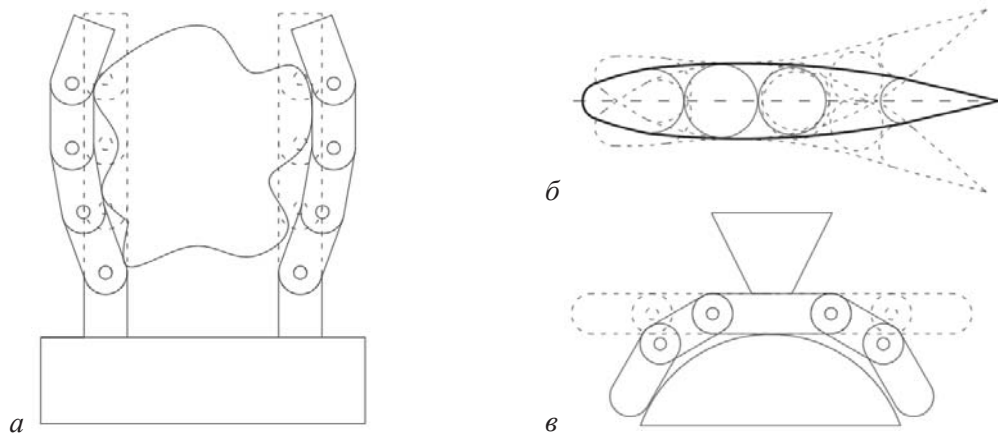


Рис. 1. Примеры реконфигурируемых конструкций:
а – адаптивный захват; б – адаптивное крыло; в – адаптивная стопа

Под реконфигурируемой системой понимается сложный многомодульный объект, способный к трансформации формы и размеров по командам систем управления за счет приводов или по условиям взаимодействия с другим объектом или пространством, за счет упругости материала модуля или связей между модулями.

В зависимости от требований результата и характера реконфигурации возможны:

- задание времени реконфигурации изделия;
- оптимизация процесса реконфигурации по току якоря и скорости вращения ротора электродвигателя в пределах заданного времени;
- определение полученной при реконфигурации геометрической формы (положения модулей) по датчикам обратной связи положения элементов электропривода;
- автоматическое отслеживание отклонения реконфигурации от заданного положения по датчикам обратной связи;
- силовомоментное управление процессом реконфигурации.

Возможные разнообразия конструкций реконфигурируемых изделий затрудняют общее

решение задачи оптимального управления электроприводами, но позволяют выделить основные наиболее часто встречаемые задачи обеспечения:

- максимальной производительности электропривода в заданное время T (декоративные реконфигурируемые панели [8]);
- минимального времени выполнения заданной программы перемещений/поворота (захватное устройство, закрылки летательных аппаратов [9]);
- минимума потерь в якоре при выполнении заданной программы перемещения/поворота в указанное время (компактные автономные реконфигурируемые устройства, роботы [10]);
- минимума потребления энергии при выполнении заданных перемещений (реконфигурируемые закрылки летательных аппаратов, компактные автономные роботы, реконфигурируемые стопы шагающих роботов [11]).

Рассматривается задача оптимального управления электроприводом с двигателем постоянного тока (ДПТ) реконфигурируемых устройств различного назначения, в заданное вре-

мя T , и частный случай на примере захвата (рис. 2). Захватное устройство ЗУ1 (рис. 2, а) состоит из одного ДПТ с редуктором 1, передаточного механизма 2 и трех эластичных пальцев 3. Данный вариант позволяет избежать разности скоростей движения пальцев, но требует единично большей мощности и более сложной кинематической схемы для передачи усилия паль-

цам, что вносит дополнительные потери. ЗУ2 (рис. 2, б) состоит из двух независимых ДПТ 1, передаточных механизмов 2 и двух эластичных пальцев 3. Данный вариант позволяет задавать и контролировать усилие зажима для каждого пальца отдельно, при менее мощных чем в ЗУ1 электроприводах, но требует больше сигналов управления, поступающих от контроллера.

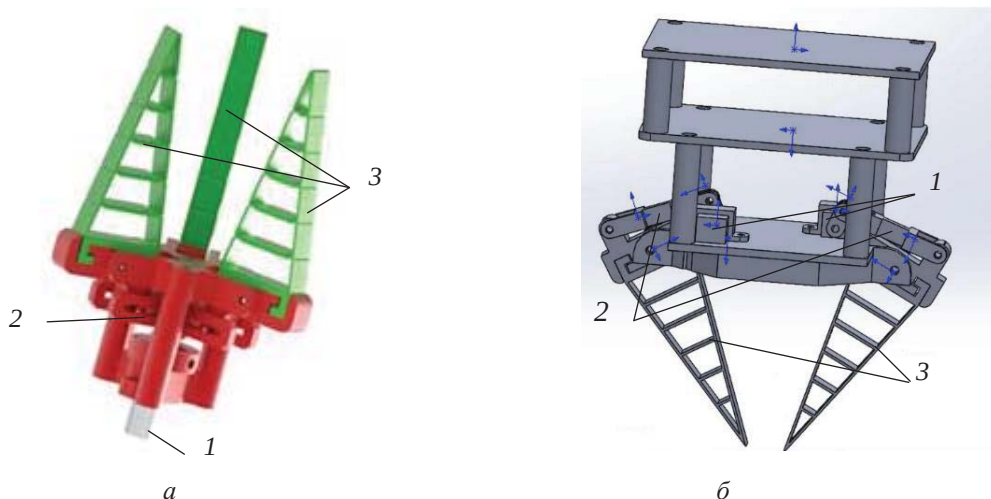


Рис. 2. Исследуемые захватные устройства:
а – ЗУ1 с одним приводом; б – ЗУ2 с двумя приводами

Математическое обоснование реализации оптимального управления

Анализируется движение ротора двигателя постоянного тока с электромагнитным моментом на валу M и моделирующим нагрузки (усилие захвата, трение в сочленениях, деформации звеньев и инерционные нагрузки) со стороны захватного устройства моментом сопротивления μ .

Рассматривается основное уравнение электропривода ДПТ, определяющее равновесие момента на валу $M = i\Phi$ (i – ток якоря; Φ – магнитный поток) привода с моментом μ сопротивления механизма в относительных единицах [1]

$$i\Phi = \frac{dv}{d\tau} + \mu, \quad (1)$$

где для описания действия реконфигурируемого устройства за единицу пути принято перемещение контрольной точки реконфигурируемой конструкции, пройденное за относительное время $\tau = 1$ ($t = T_m$) при относительной скорости $v = 1$ ($\omega = \omega_n$). Выражение для перемещения контрольной точки за время $T = \frac{t_{факт}}{T_m} = k\tau$ примет вид:

$$\alpha = \int_0^T v d\tau. \quad (2)$$

С учетом уравнения цепи якоря в относительных единицах, потребление энергии элек-

троприводом реконфигурируемого устройства от сети выражается интегралом [1]:

$$W = \int_0^T u i d\tau = \int_0^T v i d\tau + m \int_0^T i^2 d\tau + n \int_{i_1}^{i_2} i di. \quad (3)$$

Подведенная к якору электродвигателя энергия идет на преодоление сил сопротивления, потери в меди якоря, изменение энергии магнитного поля.

Решением задачи максимальной производительности электропривода в заданное время T является максимум интеграла (2) с учетом электрических, механических и тепловых ограничений устройства. Решение задачи обеспечения минимального времени выполнения заданной программы реконфигурации сводится к нахождению соответствующей функции скорости v в интеграле (2). Задачи обеспечения минимума потерь в якоре и минимума потребления энергии при выполнении заданной программы реконфигурации сводятся к частным решениям интеграла (3) с соответствующим определением функций тока якоря i и скорости v .

На решение задач оптимизации накладываются ограничения процессы, протекающие в приводах реконфигурируемых устройств [1]:

1. Ограничение по нагреву. Допустимое превышение температуры и количества тепла, которое необходимо отводить в единицу времени, определяют габариты, вес и стоимость электропривода. Условие записывается двумя выражениями:

$$Q = \int_0^T i^2 d\tau \leq Q_{\text{допущ}}, \quad (4)$$

$$\theta = i^2 - \frac{T_{\theta}}{T_m} \frac{d\theta}{d\tau} \leq \theta_{\text{допущ}}. \quad (5)$$

2. Условие механической прочности электропривода реконфигурируемого устройства. Ограничивает скорость вращения электродвигателя в рамках предельно допустимой скорости.

3. Условие ограничения величины тока якоря. Величина предельно допустимого тока якоря зависит от скорости вращения и потока двигателя ($i_{\text{макс}} \leq k(v, \Phi)$). В упрощенном виде ограничивают значение тока якоря менее максимально допустимого.

4. Условие ограничения напряжения питания. Величина напряжения питания ограничена мощностью источника, допустимыми параметрами Н-моста и номиналом электродвигателя.

5. Ограничение потребляемой мощности (существенно для реконфигурируемых устройств, работающих от источников с ограниченной мощностью).

6. Специальные ограничения, накладываемые механической прочностью и быстродействием реконфигурируемого устройства (ограничения по ускорению и по пусковому моменту).

Перечисленные ограничения можно подразделить на два вида:

- ограничения на текущие ограничения переменных;
- ограничения, наложенные на интегралы (3) и (4).

В основное уравнение электропривода (1) и основные ограничения 1–5 входят ток якоря и скорость вращения электропривода. Таким образом, решение задачи оптимального управления подразумевает определение некоторого управляющего параметра, обеспечивающее ре-

шение уравнения (1) с заданными ограничениями 1–5.

Частный случай управления электроприводом рабочего органа адаптивного захватного устройства

Пусть электропривод захватного устройства за время T выполняет заданную программу перемещения рабочего органа $\alpha(T)$ при нулевой начальной и конечной скорости вращения $v(0)=v(T)=0$, затем следует пауза длительностью $T_{\text{пауз}}$ и повторяется новый цикл перемещения.

Задача оптимального управления захватным устройством приобретает первичную математическую формулировку: найти функции $i(\tau)$ и $v(\tau)$, доставляющие максимум интегралу (2). При заданных значениях ограничений 1–5, допускающих в качестве основного ограничения перегрев электродвигателя

$$Q = \int_0^T i^2 d\tau \leq Q_{\text{допущ}}(T + T_{\text{пауз}}). \quad (6)$$

В условиях управления электроприводом при постоянном магнитном потоке электродвигателя $\Phi = 1$ и с учетом допущения постоянства момента сопротивления $\mu = \mu_0$ уравнение (1) имеет вид:

$$i = \frac{dv}{d\tau} + \mu_0.$$

Максимум интеграла (2) достигается [1] при параболической диаграмме скорости вращения v , удовлетворяющей уравнению

$$v = \frac{6\alpha}{T^2} \left(\tau - \frac{\tau^2}{T} \right), \quad (7)$$

и линейной диаграмме якоря

$$i = \mu_0 + \frac{6\alpha}{T^2} \left(1 - \frac{2\tau}{T} \right). \quad (8)$$

Оптимизация управления электроприводом захватного устройства реализовывалась на прототипах, представленных на рис. 2. Расчет оптимальных диаграмм тока якоря и скорости вращения выполнен для двух типов захватных устройств, соответствующих рис. 2, а и рис. 2, б. Параметры, определяющие вид диаграмм для каждого захватного устройства, представлены ниже в таблице.

Параметры процесса реконфигурации

Тип ЗУ	Угол поворота выходного вала редуктора, α		Время перемещение рабочего органа, T		Момент сопротивления на один двигатель, μ_0	
ЗУ1, $T_m = 0,5$ с, 0,4 кгс/см	2,5 · 360°	1,5	1,5 с	3	0,48 кгс/см	1,2
ЗУ2, $T_m = 0,3$ с, 0,26 кгс/см	108°	0,6	0,6 с	2	0,21 кгс/см	0,8

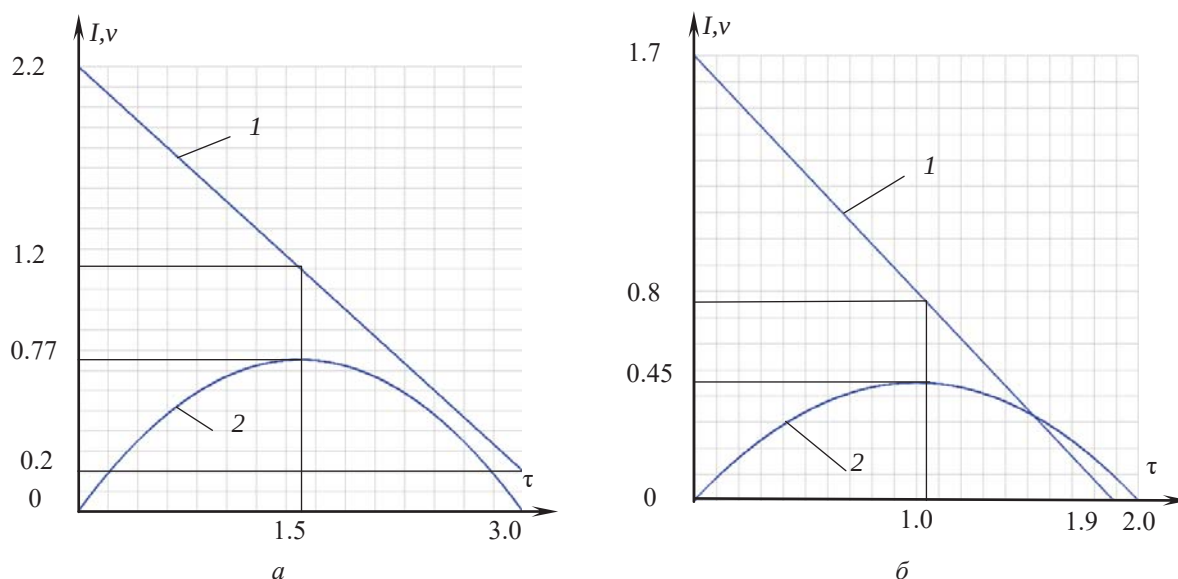


Рис. 3. Оптимальные диаграммы тока якоря и скорости вращения без учета ограничений для моделей захватных устройств: а – диаграмма 3У1; б – диаграмма 3У2

На рис. 3, а оптимальные диаграммы тока якоря 1 и скорости вращения 2 без учета ограничений 1–5 для захватного устройства 3У1 имеют вид, соответствующий выражениям (7), (8). Линейная диаграмма тока якоря соответствует началу разгона электродвигателя с током якоря $2,2 I_{\text{ном}}$ и окончанию цикла движения при токе якоря $0,2 I_{\text{ном}}$. Соответствующая параболическая диаграмма скорости вращения ведущего вала электропривода захватного устройства 3У1 достигает максимального значения $0,77 v_{\text{ном}}$ при токе якоря $1,2 I_{\text{ном}}$. Расчетный момент остановки движения 3У1 соответствует скорости вращения ведущего вала электропривода $v = 0$ при токе якоря $0,2 I_{\text{ном}}$ из-за наличия высокого момента сопротивления в передаточном механизме. Необходимость высокого пускового тока для начала движения и превышение номинального значения тока якоря на значительном интервале движения механизма 3У1 указывают на необходимость учета ограничений 1, 4, 5 при расчете оптимальной диаграммы тока якоря, а в целях снижения момента сопротивления от трения в винтовой передаче необходимо ограничение скорости вращения.

На рис. 3, б оптимальные диаграммы тока якоря 1 и скорости вращения 2 без учета ограничений 1–5 для захватного устройства 3У2 имеют вид, соответствующий выражениям (7), (8). Линейная диаграмма тока якоря соответствует началу разгона электродвигателя с током

якоря $1,7 I_{\text{ном}}$ и окончанию цикла движения при токе якоря $I = 0$. Соответствующая параболическая диаграмма скорости вращения ведущего вала электропривода захватного устройства 3У2 достигает максимального значения $0,45 v_{\text{ном}}$ при токе якоря $0,85 I_{\text{ном}}$. Расчетный момент остановки движения 3У2 соответствует скорости вращения ведущего вала электропривода $v = 0$ после прекращения тока якоря из-за наличия момента инерции в передаточном механизме.

Заключение

Получение характера изменения тока якоря, близкого к оптимальному, может обеспечить требуемую производительность электропривода в заданное время T и программно настроить выполнение одного из условий оптимизации:

- оптимизация процесса по току и скорости в пределах заданного времени;
- задание времени реконфигурации изделия;
- минимальное время выполнения заданной программы перемещений/поворота, что соответствует первым двум задачам оптимизации.

Реализация функции оптимального управления электроприводами для решения задач обеспечения минимального времени программной реконфигурации, минимума потерь в якоре и минимума потребления энергии электроприводом предполагается с использованием ШИМ-управления, что может накладывать дополнительные ограничения на процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Петров, Ю. П.* Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву / Ю. П. Петров. – Ленинград : Энергия, 1971. – 145 с.
2. О неустойчивых режимах работы электропривода манипулятора / И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. Н. Скакунов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
3. *Ivchenko, A. V.* New conceptual design of the adaptive compliant aircraft wing frame / A. V. Ivchenko, N. G. Sharonov, R. Ziatdinov // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – Vol. 22, No. 5. – Pp. 1149–1154.
4. Structural design of an adaptive wing trailing edge for enhanced cruise performances. / R. Pecora, A. Concilio, I. Dimino, F. Amoroso, M. Ciminello // In Proceedings of the 24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference AIAA SciTech, San Diego, CA, USA, 4–8 January 2016.
5. *Lynch, P.* Adaptive Grasping of Moving Objects through Tactile Sensing. / P. Lynch, M. F. Cullinan, C. McGinn // Sensors (Basel), 2021. Dec 14; 21(24):8339.
6. *Shi, J.* Research of Passive Grasp Multi-fingered Robot Hand. / J. Shi, W. Zhang // Informatics in Control, Automation and Robotics. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 133 (2011). Springer, Berlin, Heidelberg.
7. Gastrocnemius and Power Amplifier Soleus Spring-Tendons Achieve Fast Human-like Walking in a Bipedal Robot / B. Kiss, C. G. Emre, An Mo, A. Buchmann, D. Renjewski, A. Badri-Sprowitz // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2022. – P. 5202–5209.
8. Исследование автоматизированной динамической реконфигурируемой панели / П. А. Чемоногов, А. М. Макаров, Н. Г. Шаронов, А. В. Ивченко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8(243) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 75–77.
9. *Серебранный, В. В.* Регулирование тока и силовомоментное управление в приводах захватных устройств роботов / В. В. Серебранный, А. А. Бошляков, А. И. Огородник // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 8. – С. 542–551.
10. Оптимизация энергодинамических процессов в системе управления приводом стабилизации полета беспилотного летательного аппарата / Ю. А. Денисов, О. Л. Шаповалов, О. В. Середа, Е. В. Куц // Технические науки и технологии. – 2018. – № 3(13). – С. 187–195.
11. *Karavaev, Yu. L.* The Dynamics and Control of a Spherical Robot with an Internal Omniwheel Platform / Yu. L. Karavaev, A. A. Kilin // Regular and Chaotic Dynamics. – 2015. – Vol. 20, No. 2. – Pp. 134–152.