

М. Ю. Ветлицын

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ШИМ-УПРАВЛЕНИИ*

Волгоградский государственный технический университет

mikhail.vetlitsyn@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментальной реализации ШИМ-управления электроприводом захватного устройства по заданным критериям оптимизации. Показано влияние элементов кинематической схемы, технических решений и ограничений при ШИМ-управлении на особенности движения и мощностные параметры электропривода.

Ключевые слова: адаптивный захват, оптимальное управление, ШИМ-управление электроприводом, программные перемещения.

М. Yu. Vetlitsyn

FEATURES OF MOVEMENT OF THE WORKING BODY OF THE GRIPPER DEVICE WITH OPTIMAL PWM CONTROL

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of the experimental implementation of PWM control of the electric drive of the gripping device according to the specified optimization criteria. The influence of the elements of the kinematic scheme, technical solutions and limitations in PWM control on the features of the movement and power parameters of the electric drive is shown.

Keywords: adaptive grip, optimal control, PWM-control of electric drive, software movements.

Введение

В электроприводе робототехнических систем под оптимальным управлением понимают набор управляющих параметров, обеспечивающих наилучшее, с точки зрения заданных критериев, поведение робототехнической системы, ее движение к цели по оптимальной траектории [1]. Управляющие параметры рассматривают как функции времени, что допускает их изменение в ходе процесса для выбора на каждом этапе оптимальных значений. Оптимальные значения, рассматриваются с учетом экономических аспектов, энергетических показателей, режима работы робототехнической системы и электропривода на всех этапах жизненного цикла изделия.

Использование стандартных модулей при реализации оптимального управления электроприводом захватного устройства требует определения оптимальной диаграммы тока якоря $I(t)$ и скорости вращения $V(t)$ и реализации параметров ШИМ-управления, обеспечивающих изменение напряжения якоря $U(t)$, соответствующее оптимальным диаграммам. Формирование импульсов управления осуществляет контроллер, который в соответствии с аппаратными возможностями и заданным алгоритмом обрабатывает программу управления, накладывая дополнительные программные и временные ограничения на реализацию оптимальных диаграмм.

© Ветлицын М. Ю., 2025.

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

Реализация ШИМ-управления электроприводом рабочего органа адаптивного захватного устройства

Задача оптимального управления по минимизации энергозатрат [1; 2] захватным устройством сформулирована в виде функций тока якоря $i(\tau)$ и скорости $v(\tau)$, доставляющих максимум перемещения рабочего органа по обобщенной координате α за время τ (в относительных единицах):

$$\alpha = \int_0^T v(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Оптимальное управление электроприводами непрерывного режима работы при постоянстве момента сопротивления и максимуме интеграла (1) достигается при параболической диаграмме скорости вращения $v(\tau)$, удовлетворяющей уравнению:

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

и линейной диаграмме якоря $i(\tau)$:

$$i = i_0 + \frac{6\alpha}{T^2} \left(1 - \frac{2\tau}{T} \right). \quad (3)$$

Применение современных цифровых контроллеров и драйверов значительно усложняет математическое описание оптимальных функций скорости и тока ввиду импульсного способа формирования управляющих воздействий и возникающих при этом колебаний движущего момента и вариаций момента сопротивления [3].

Реализация оптимального управления производилась на электроприводе захватного устройства (ЗУ), схематично представленного на рис. 1. ЗУ состоит из двух независимых приводов с встроенным редуктором ПР, преобразователя П, кривошипного передаточного механизма ПМ и двухэластичных рабочих органов РО. К рабочему органу ЗУ приложена сила F_{np} от электродвигателя, и сила сопротивления F_c от объекта удержания. Независимое управление каждым рабочим органом обеспечивает снижение момента сопротивления на один двигатель и дает возможность использования микродвигателей постоянного тока в условиях ограниченных габаритов ЗУ при применении критерия оптимального управления для уменьшения нагрева [1; 2].

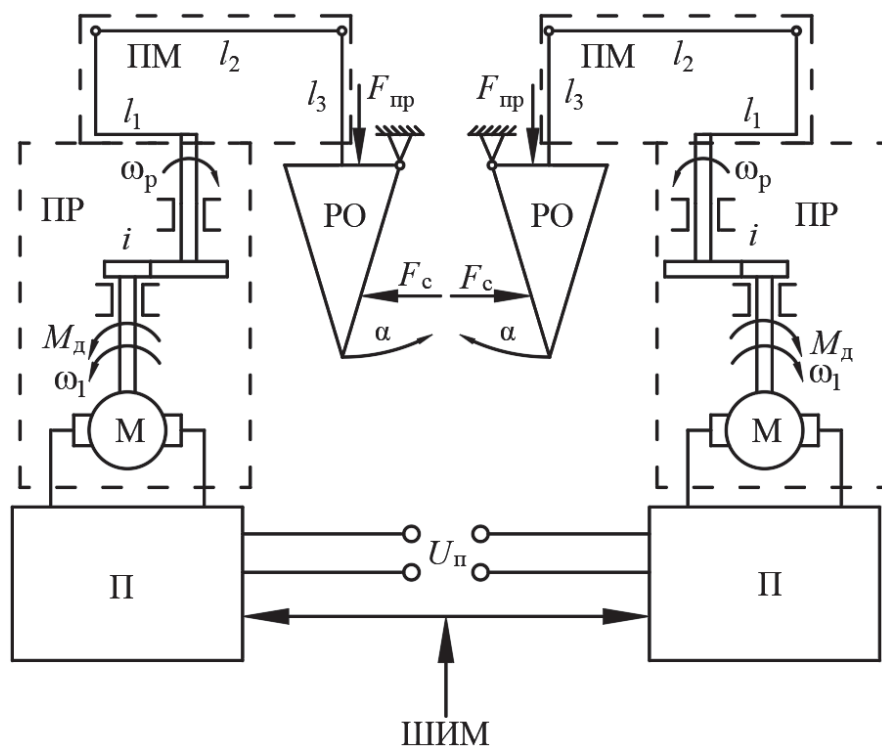


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема захватного устройства

На рис. 2 представлены осциллограммы изменения тока двух электроприводов в режимах на открытие и закрытие рабочего органа. Экспериментальный вид кривой (1) имеет отличие от расчетных (кривая 2), так как в режиме

ШИМ-управления получение линейной кривой невозможно, а приближение к оптимальной диаграмме реализуется уменьшением времени открытия транзисторов H-моста при постоянном периоде ШИМ-управления.

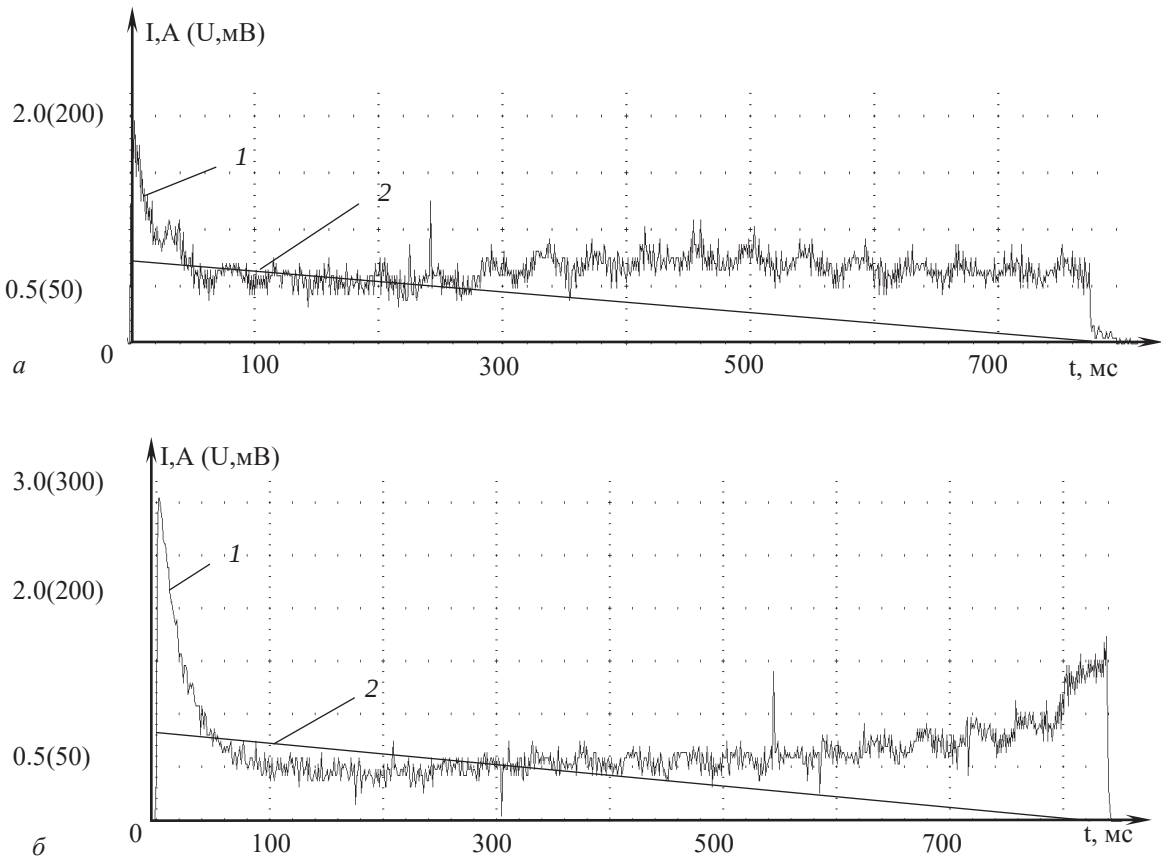


Рис. 2. Сравнение экспериментального (1) характера изменения тока и расчетного оптимального (2) для ЗУ:
а – движение на открытие; б – движение на закрытие

Для преодоления микродвигателем пускового момента сопротивления и приближения реальной диаграммы скорости $V(t)$ в режиме ШИМ-управления к оптимальной в начальный момент на якорь допустимо подавать напряжение $U = U_{\max}$ и $t_{\text{откр}} = T_{\text{импульс}}$. Под действием $U_{\max}$ ток якоря будет возрастать с начальной скоростью, через несколько импульсов ШИМ-управления ток якоря уменьшится до начального значения, рекомендованного оптимальной диаграммой, после чего можно увеличивать время $t_{\text{пауз}}$ паузы для получения оптимальной характеристики тока и скорости. Индуктив-

ность якоря не влияет на расчетную форму оптимальной диаграммы тока, но влияет на вид реальной кривой тока на каждом периоде $T_{\text{импульс}}$ и на величину действующего на якорь напряжения. Увеличение тока якоря в конце интервала $T_{\text{движ}}$ связано с увеличением момента сопротивления при захвате объекта РО.

Влияние конструкции ЗУ и ШИМ-управления электроприводом на характер момента

Система уравнений, определяющая изменения момента M и скорости ω при ШИМ-управлении, может быть представлена в виде [4; 5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{я}} = \frac{(U - C_{\text{ЕФ}} \Phi_{\text{дв}} \omega) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} \right)}{r_{\text{я}}} + I_0 e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}}, \quad 0 < t < t_{\text{откр}} \\ I_{\text{я}} = - \frac{C_{\text{ЕФ}} \Phi_{\text{дв}} \omega \left(1 - e^{-\frac{t - t_{\text{откр}}}{T_{\text{я}}}} \right)}{r_{\text{я}}} + I_{\text{mi}} e^{-\frac{t - t_{\text{откр}}}{T_{\text{я}}}}, \quad t_{\text{откр}} < t < T_{\text{импульс}} \\ M = C_{\text{ф}} \Phi_{\text{дв}} I_{\text{я}} \\ \Delta \omega = \frac{M(t) - M_{\text{с}}}{J} \Delta t \end{array} \right. \quad (4)$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якоря электродвигателя; U – напряжение на якоре; t – время; $r_{\text{я}}$ – сопротивление якоря; $\Phi_{\text{дв}}$ – полезный результирующий магнитный поток; $C_{\text{ЕФ}}$ и $C_{\text{ф}}$ – постоянные электродвигателя; $T_{\text{я}}$ – постоянная времени обмотки якоря; I_0 – ток в начале интервала $T_{\text{импульс}}$; $I_{\text{mi}} = I(t_{\text{откр}})$ – ток в конце интервала $t_{\text{откр}}$; $M_{\text{с}}$ – суммарный момент сопротивления на валу; ω – скорость вращения вала двигателя; $M(t)$ – электрохимический момент двигателя;

J – момент инерции двигателя, редуктора и захватного устройства, приведенный к валу электродвигателя; $\Delta\omega$ – отклонение скорости вращения от усредненного значения ω ; Δt – шаг расчета на интервале $T_{\text{импульс}}$; $T_{\text{импульс}} = t_{\text{откр}} + t_{\text{пауз}}$ – период цикла управления. Решение системы (4) на интервале $T_{\text{импульс}} \cong 0,02$ с при $T_{\text{я}} \cong 0,02 \ll T_{\text{м}} = 0,3 \div 0,5$ с, при условии $M_{\text{с}} \approx M_{\text{ном}}$, $t_{\text{откр}} = t_{\text{пауз}} = T_{\text{импульс}}/2$ представлено на рис. 3.

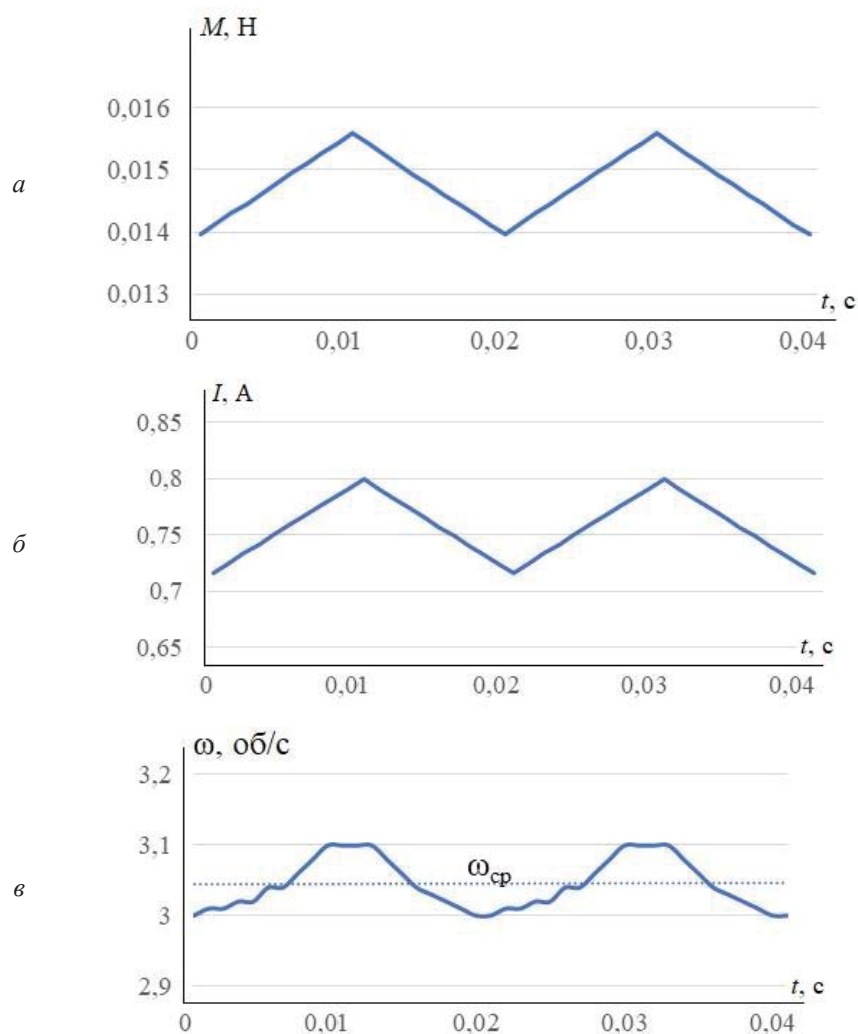


Рис. 3. Расчетные графики колебаний $I(t)$, $M(t)$, $\omega(t)$

Ток якоря имеет пульсации экспоненциального характера ΔI (4), что приводит к соответствующим изменениям момента ΔM [4]. При подключении на короткое время посредством ШИМ-управления двигателя к источнику питания могут возникать колебания РО, расчетные колебания частоты вращения относительно $\omega_{\text{ср}}$ имеют дискретный характер, определяемый шагом расчета Δt .

Заключение

Экспериментальные исследования оптимального управления для захватных устройств показали, что реализация расчетной оптимальной характеристики изменения тока якоря связана с различными динамическими процессами, определяемыми кинематической схемой и способом управления. При использовании ШИМ-управления для ЗУ экспериментальный характер

изменения тока якоря, близкий к оптимальному, обеспечивает требуемую производительность электропривода в заданное время T и может быть программно настроен на одно из условий оптимизации, но ограничен возможностью возникновения колебаний РО вследствие характера из-

менения движущего момента. На рис. 4 представлен экспериментальный характер тока якоря при аппроксимации оптимального движения в режиме ШИМ-управления, наглядно отражающий сложный характер изменения движущего момента, определяющего динамику движения РО.

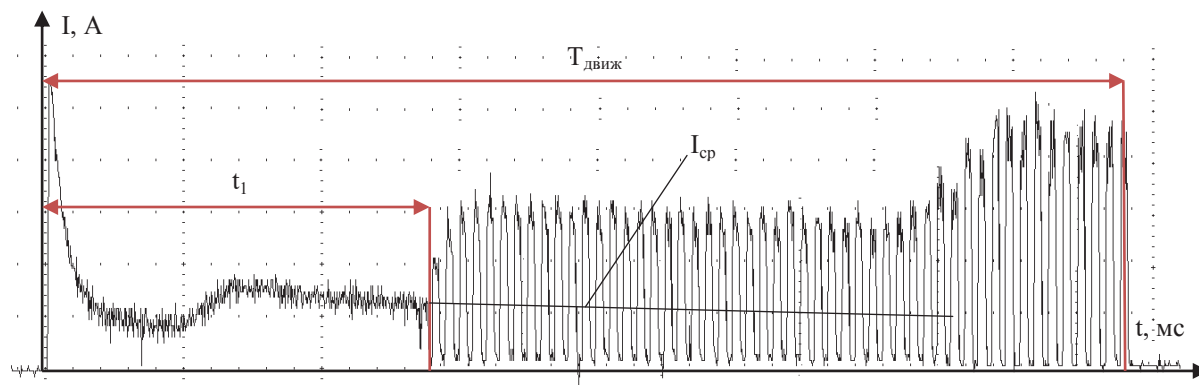


Рис. 4. Экспериментальный характер тока якоря при аппроксимации оптимального движения в режиме ШИМ-управления

Дополнительным достоинством оптимального ШИМ-управления оказывается близкое к минимуму потребление энергии при выполнении операции открытия-закрытия ЗУ, поскольку часть заданного времени выполнения программы приходится на участок паузы следования импульсов, что на рис. 4 видно снижением значений величины тока якоря.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров, Ю. П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву / Ю. П. Петров. – Ленинград : Энергия, 1971. – 145 с.
2. Ветлицын, М. Ю. Об оптимальном управлении электроприводом реконфигурируемых устройств / М. Ю. Ветлицын // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (292) / ВолгГТУ. – 2024. – С. 14–19.
3. Кобринский, А. Е. Механизмы с упругими связями / А. Е. Кобринский. – М.: Наука, 1964. – 252 с.
4. Сен, П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / П. Сен; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
5. Данилов, П. Е. Теория электропривода : учебное пособие / П. Е. Данилов, В. А. Барышников, В. В. Рожков. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2018. – 417 с.