

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105

**Макин М.К., Волков А.Н., Кочнева О.В.*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**E-mail: ppppp5.5@mail.ru*

ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИКЛОВОГО И ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ОТ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ И ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. Цикловые и позиционные приводы являются основой автоматизации дискретного производства. Обычно они используются для реализации операций загрузки, ориентации, транспортирования в технологическом оборудовании, а также в промышленной робототехнике и мехатронных модулях различного назначения. Основными характеристиками таких приводов во многих случаях являются величины перемещений и времен движения. Математическая модель приводов для типовых законов движения, характеризующихся временами разгона и торможения, учитывает тепловые потери в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением. Исследование проводилось с целью определения эффективности оптимизации закона движения по максимальной потребляемой мощности при учёте потерь в двигателе. Смоделированы два закона изменения ускорения электродвигателя: прямоугольный и треугольный. Для каждого закона рассмотрены 2 ситуации: перемещение с участком равномерного движения и без него. Исследования моделей в среде Simulink позволили установить связь между потреблением энергии, мощностью и законом движения. Получена зависимость между напряжением и потребляемым током от вида закона движения. Потери энергии в электродвигателе не превышают 2 % от общего энергопотребления при преобладающей инерционной нагрузке, и 44 % при активном моменте сопротивления, равном номинальному. Установлено, что эффективность оптимизации закона движения, по сравнению с известными исследованиями, при инерционной нагрузке возросла с 44 % до 47–48 %, а при приложении активного момента уменьшилась с 44 % до 9–10 %.

Ключевые слова: закон движения, двигатель постоянного тока, энергия, мощность, математическая модель, исследование, Simulink.

Введение. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств с цикловым и позиционным приводом [1, 2] осуществляется по одному или нескольким критериям, которым они должны соответствовать: надёжность, масса, максимальная мощность, энергопотребление, быстродействие, стоимость и т. д. Выбор одного или набора этих критериев, а также весовых значений в последнем случае производится с учетом конкретных условий эксплуатации. Например, для космических или для автономных наземных роботов критически важна потребляемая энергия, а для стационарных металлообрабатывающих станков, манипуляторов автоматических линий большое значение часто приобретает максимальная за цикл потребляемая мощность, определяющая установленную мощность, на которую часто накладываются весьма жёсткие ограничения сетями энергообеспечения. Поэтому, проблема энергосбережения и снижения потребляемой машинами мощности является актуальной, что подтверждают и зарубежные исследования [3–7]. Наиболее широкие возможности для ее решения имеются в робототехнике и мехатронике, когда цикловые и позиционные приводы имеют систему управления, способную обеспечить ра-

циональный закон движения при заданных перемещении и времени. В работах [8–12] не рассматривалось влияние электродвигателя, как следствие, потерь в нём, при синтезе законов движения, а в [13–15] не очевидно, какую роль они вносят. В статье анализируется влияние двигателя на два закона изменения ускорения: треугольный и прямоугольный. Установлено [16], что при равном времени разгона, равномерного движения и торможения, пиковая мощность за цикл работы будет минимальной, поэтому для каждого закона движения привода рассматривается две ситуации: разгон и торможение занимают по половине времени перемещения, и разгон занимает треть времени, равномерное движение занимает треть времени и торможение также занимает треть времени от общего цикла движения. Для исследования выбран двигатель постоянного тока ЕС-max 22. Его технические характеристики, приведенные в таблице 1, занесены в математическую модель в программе Simulink.

Методика. Исследование проводилось в среде Simulink с помощью блоков библиотеки Simscape. В качестве модели взята известная структурная схема [17], усовершенствованная в соответствии с поставленной задачей, представ-

лена на рисунке 1. Добавленный блок для задания закона движения, обеспечивает управление электродвигателем. Так как исследуется только влияние потерь в двигателе [18–19] на эффективность оптимизации закона движения, то блок управления считается идеальным. В базовую модель добавлен блок расчёта электрической (полной) мощности, учитывающей потери в электродвигателе, и механической мощности, потребляемой энергии и потерь в двигателе. Моделируется 2 случая функционирования привода. Во-первых, двигатель имеет преобладающую инерционную нагрузку. Во-вторых, к нему прикладывается активный момент сопротивления, равный номинальному.

Регулирование скорости электродвигателя происходит путём изменения напряжения на якоре двигателя с помощью кусочно-линейной функции в блоке задания закона движения, указанном на рисунке 1. Момент, необходимый для вращения двигателя, определяется током якоря, который зависит от изменения ЭДС и напряжения на якоре [20]. ЭДС увеличивается пропорционально

скорости вращения двигателя, поэтому для работы двигателя напряжение на якоре должно изменяться пропорционально скорости. Исходя из этого, с помощью напряжения на якоре двигателя задаётся закон движения привода.

Таблица 1

Характеристики двигателя постоянного тока ЕС-max 22

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение питания	12 В
Скорость холостого хода	12400 об/мин
Сопротивление обмотки якоря	0.955 Ом
Индуктивность обмотки якоря	0,0000498 Гн
Номинальный момент	0,023 Н·м
Постоянная момента	0,0091 Н·м/А

На выходе блока модели электродвигателя выводятся скорость вращения ротора, ускорение, полученное путём дифференцирования скорости вращения, сила тока на якоре и крутящий момент. Далее рассчитывается мощность и энергопотребление, являющееся работой электрической мощности.

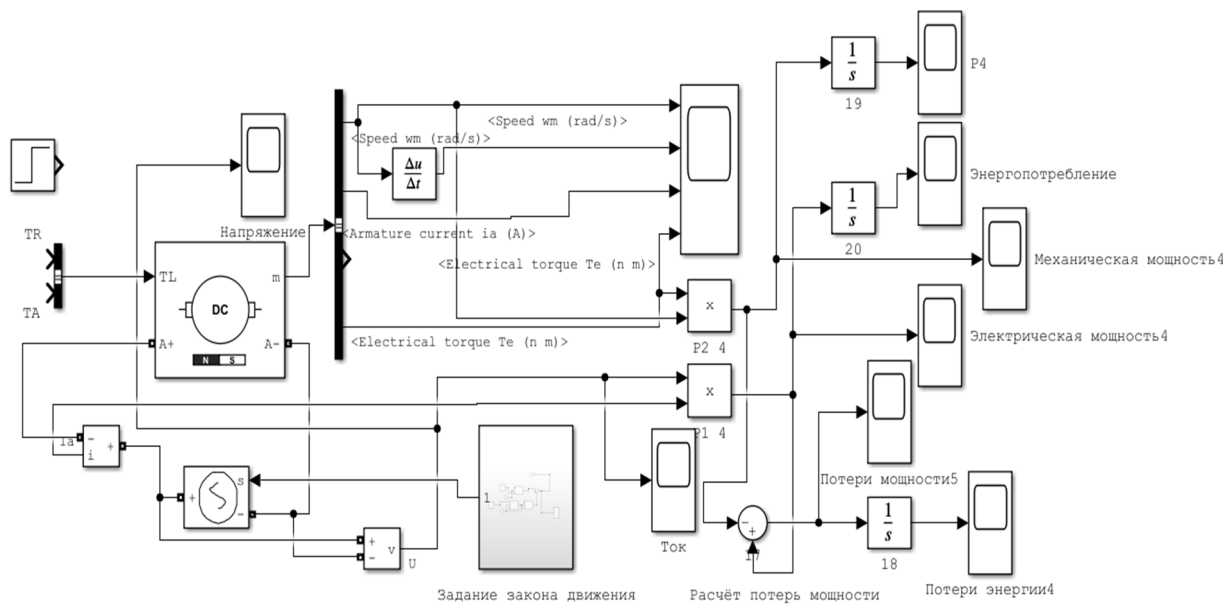


Рис. 1. Структурная схема модели электропривода

Модель электродвигателя в программе Simulink описывается системой уравнений (1):

$$\begin{cases} E = K_E * \omega \\ K_E = L_{af} * I_f \\ T_E = K_T * I_a \\ K_E = K_T \\ J * \frac{d\omega}{dt} = T_E - T_L - B_m * \omega - T_f \end{cases} \quad (1)$$

где E – ЭДС; K_E – постоянная эдс двигателя; T_E – электромагнитный момент двигателя; K_T –

постоянная момента двигателя; T_L – момент сопротивления; J – момент инерции, приведённый к валу двигателя; ω – скорость вращения вала двигателя; I_a – ток цепи обмотки якоря; I_f – ток цепи обмотки возбуждения; B_m – коэффициент вязкого трения; T_f – реактивный момент сопротивления, учитывающий силу трения; L_{af} – взаимная индуктивность обмотки возбуждения и обмотки якоря электродвигателя.

Моделирование работы привода с преобладающей инерционной нагрузкой. Смоделированы 4 закона движения электропривода, и получены графики зависимости скорости и ускорения

от времени, представленные на рисунке 2, при условии постоянства времени цикла и расстоянии перемещения (рисунок 3). При моделировании, на ускорение не накладывалось каких-либо ограничений. Все сравнения проводились только

для участка разгона и равномерного движения электропривода до половины периода времени цикла движения, рекуперация энергии при торможении не учитывалась.

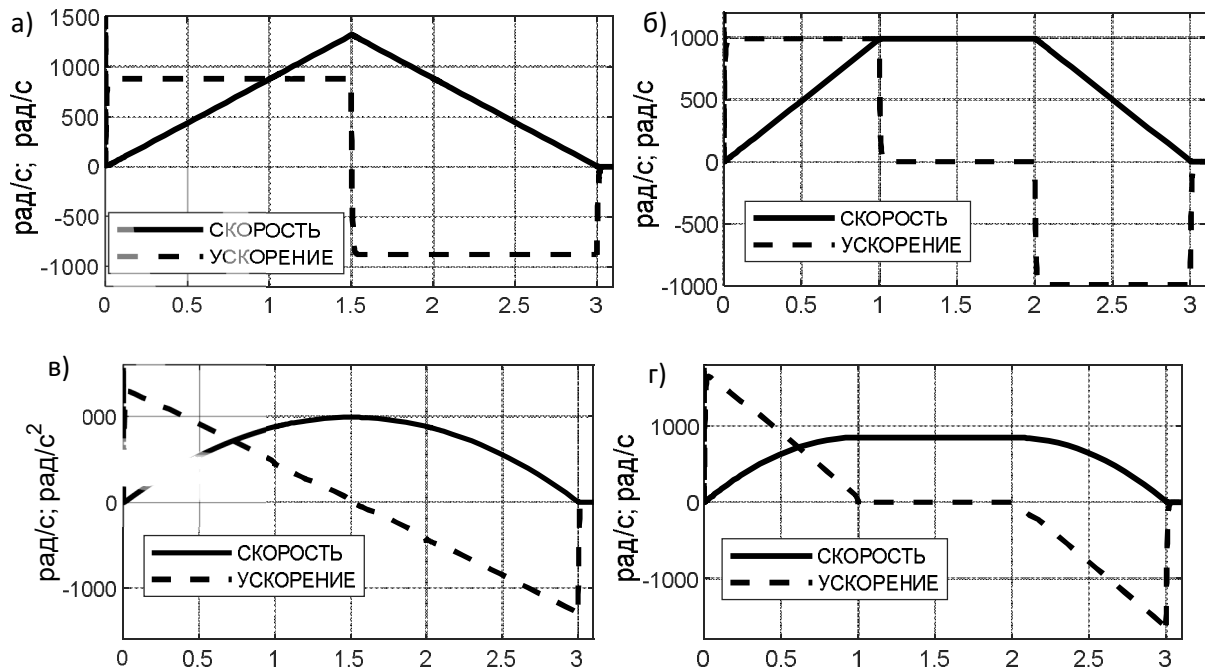


Рис. 2. Зависимость скорости и ускорения электродвигателя от времени

- а) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$, в) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, г) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$

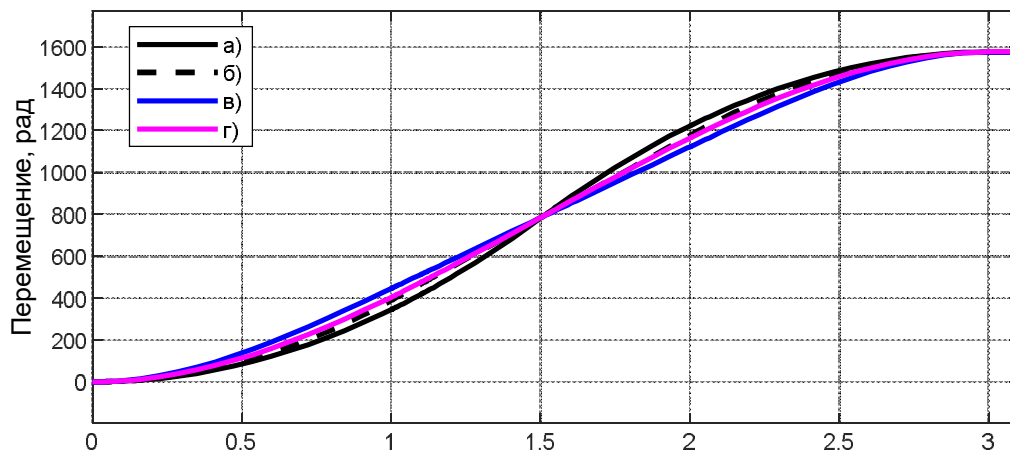


Рис. 3. Зависимость перемещения привода от времени

- а) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$, в) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, г) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$

На рисунках 4-10 представлены графики механических и электрических (полных) мощностей, полученных по формулам (2), (3), энергопотребления, рассчитанного путём интегрирования полной мощности, потребляемой электродвигателем, потерь мощности и энергии в двигателе.

$$P1 = U * I \quad (2)$$

$$P2 = M * \omega \quad (3)$$

где $P1$ – электрическая мощность, потребляемая из сети; $P2$ – механическая мощность, получаемая на валу двигателя; U – напряжение на двигателе; I – ток, потребляемый двигателем; M – крутящий момент; ω – скорость вращения

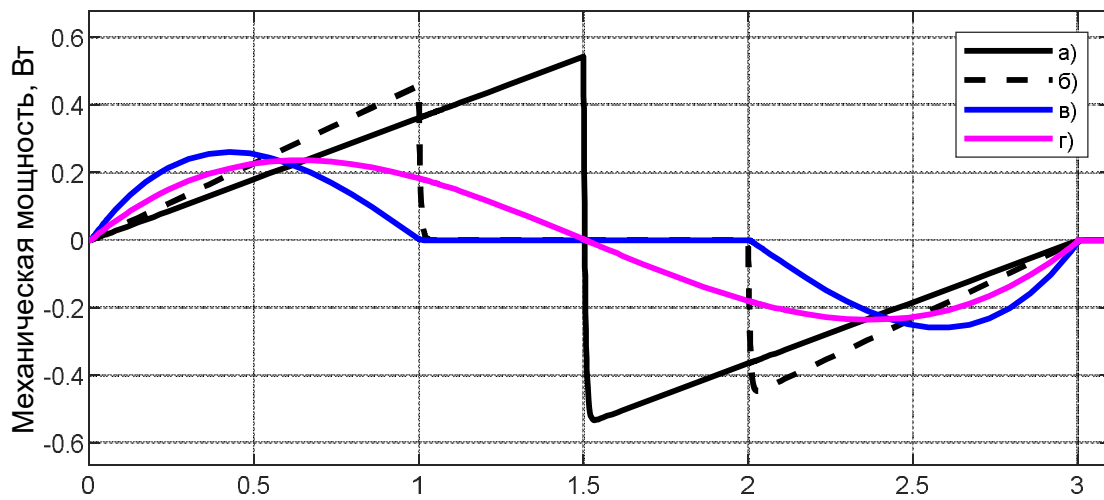


Рис. 4. Зависимость мгновенной механической мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

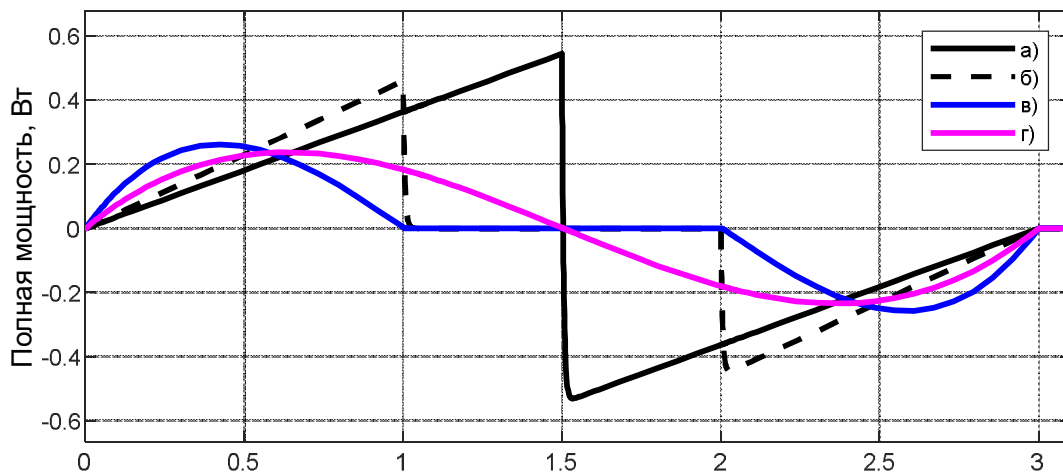


Рис. 5. Зависимость мгновенной электрической (полной) мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

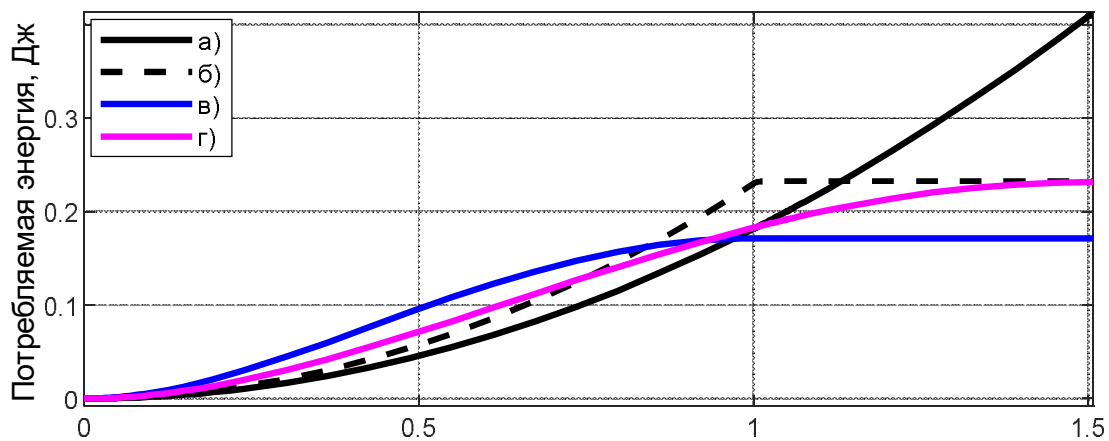


Рис. 6. Зависимость потребляемой энергии от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

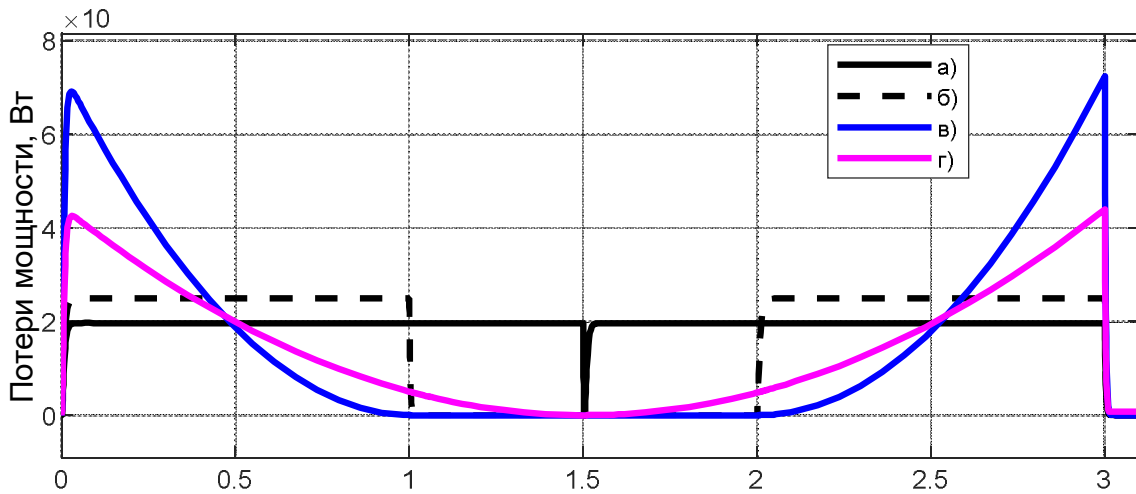


Рис. 7. Зависимость мгновенных потерь мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

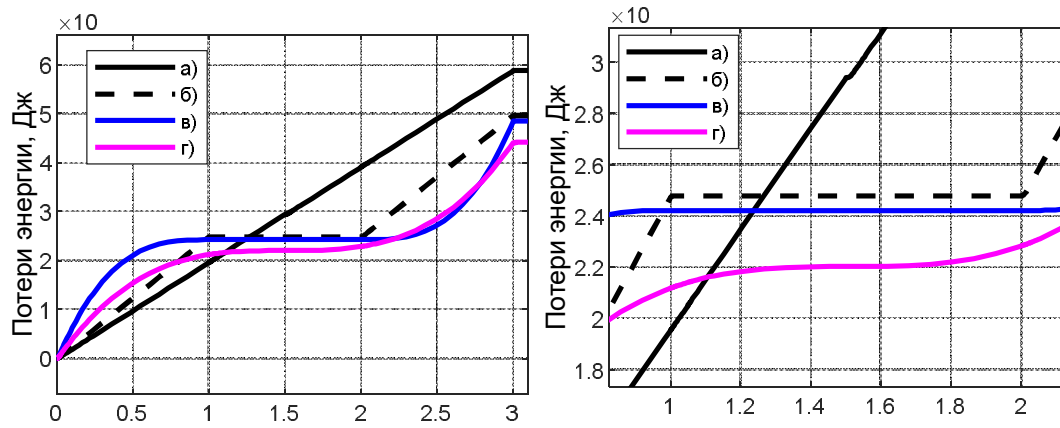


Рис. 8. Зависимость мгновенных потерь энергии в двигателе от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

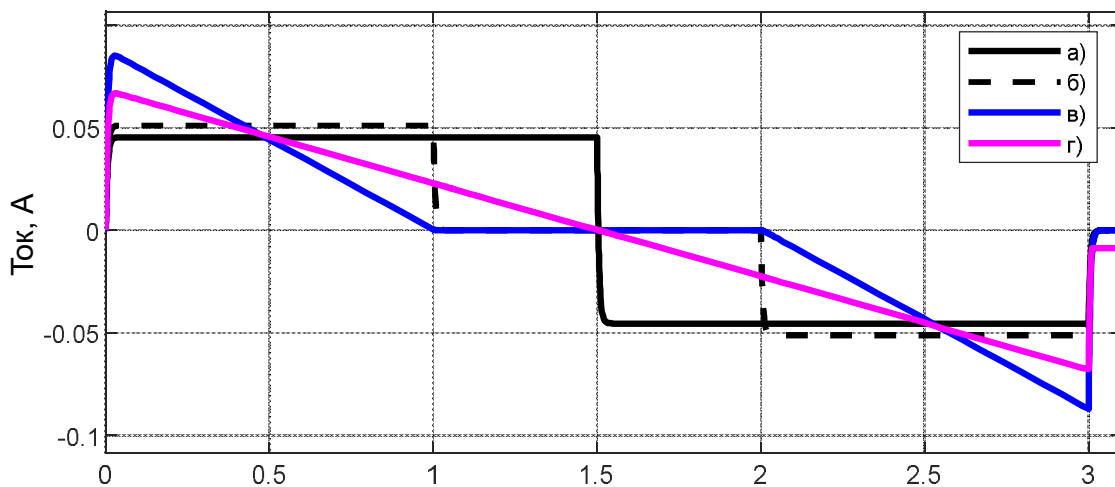


Рис. 9. Зависимость потребляемого двигателем тока от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

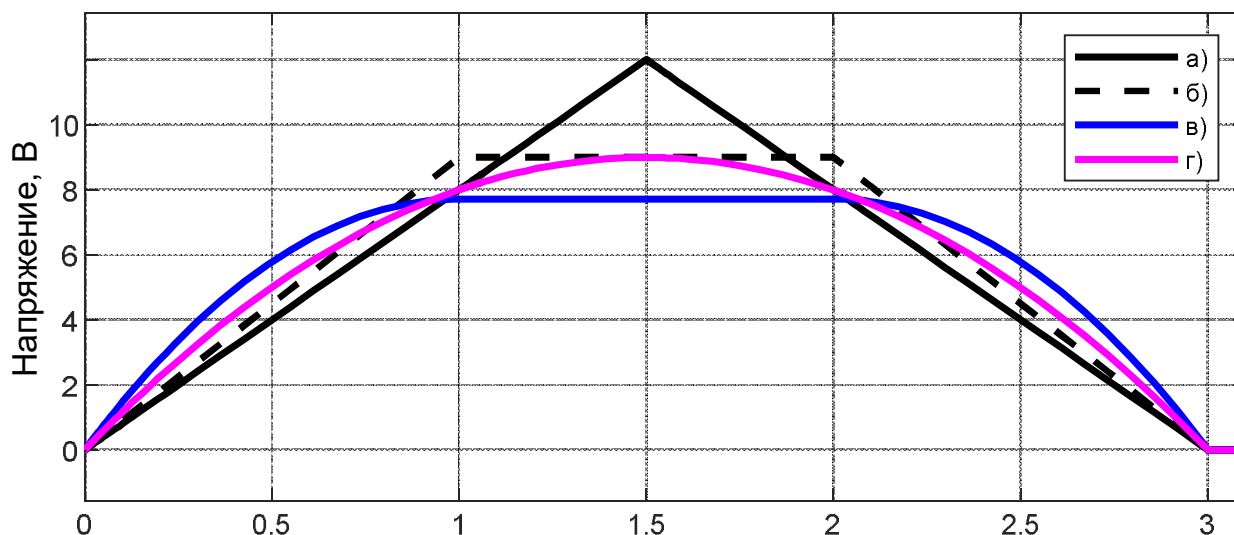


Рис. 10. Зависимость напряжения якоря двигателя от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

По полученным зависимостям, представленным на рисунках 2-10, можно сделать следующие выводы. Среди треугольных законов самый низкий пик мощности имеет закон с временем разгона $T/2$, а среди прямоугольных с временем разгона $T/3$, как механической, так и электрической, учитывающей потери в двигателе. Относительно прямоугольного закона изменения ускорения с временем разгона $T/3$ пик механической мощности треугольного меньше на 48 %, а пик электрической на 47 %, причём, их энергопотребление идентично. По графику энергопотребления двигателя видно, что закон треугольного ускорения с временем разгона $T/3$ имеет наименьшую его величину, так как в период равномерного движения потребляемый ток равен нулю из-за отсутствия активной нагрузки на валу электродвигателя. Относительно потерь энергии в двигателе можно сказать, что у треугольного закона изменения ускорения с временем разгона $T/2$ они минимальные, и, в сравнении с законом прямоугольного изменения ускорения с временем разгона $T/3$, меньше на 11 %. Экономичность треугольного закона изменения ускорения по энергопотреблению можно объяснить пониженным напряжением, так как от него зависит скорость вращения вала электродвигателя, которая тоже меньше, чем у прямоугольного закона изменения ускорения, и пониженным потреблением тока, из чего следует, что и тепловые потери в двигателе будут меньше. Оценить влияние электродвигателя на моделируемые законы движения

можно по максимальным потерям энергии, которые не превышают 2 % от общего энергопотребления в самом худшем случае.

Моделирование работы привода с преобладающей инерционной нагрузкой и активным моментом сопротивления. На вход модели был подан ступенчатый сигнал, равный моменту сопротивления 0.023 Нм, который является номинальным для данного двигателя. Смоделированы те же самые 4 закона движения циклового привода. На рисунках 11 – 19 представлены зависимости скорости, ускорения, мощностей, энергопотребления от времени. Рекуперация энергии при торможении не учитывалась.

Так как напряжение и ток в двигателе нарастает не мгновенно, ограничения на ускорение нет, а двигателю необходимо преодолеть активный момент сопротивления, то присутствует скачок скорости и ускорения. Графики сдвинуты по времени, так как при треугольном законе изменения ускорения нарастание напряжения и тока происходит быстрее, соответственно, и момент двигателя, необходимый для преодоления момента сопротивления, нарастает быстрее, и цикл движения завершается раньше. Сравнения полученных зависимостей проводились на половине времени рабочего цикла, для этапа разгона и равномерного движения. Время половины цикла для прямоугольного закона с временем разгона $T/2 = 2.939$ с, прямоугольного закона с временем разгона $T/3 = 2.49$ с, треугольного закона с временем разгона $T/2 = 1.958$ с, треугольного закона с временем разгона $T/3 = 1.913$ с.

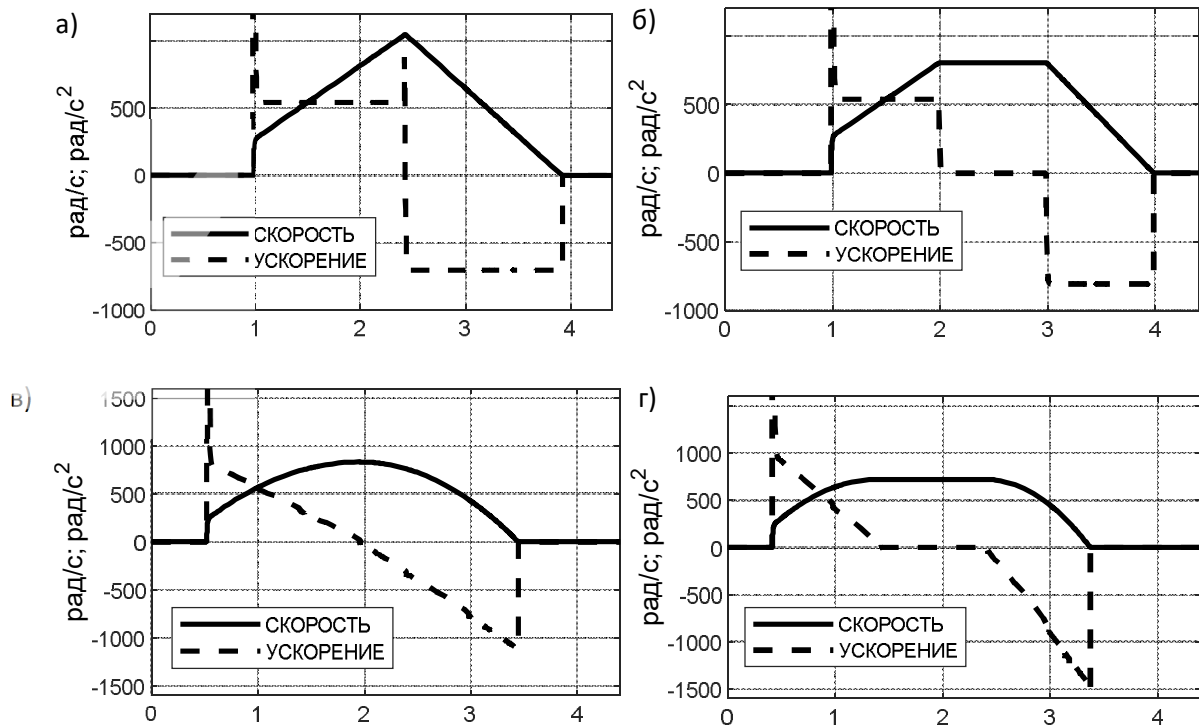


Рис. 11. Зависимость скорости и ускорения электродвигателя от времени

- а) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$, в) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/2$, г) треугольный закон изменения ускорения с временем разгона $T/3$

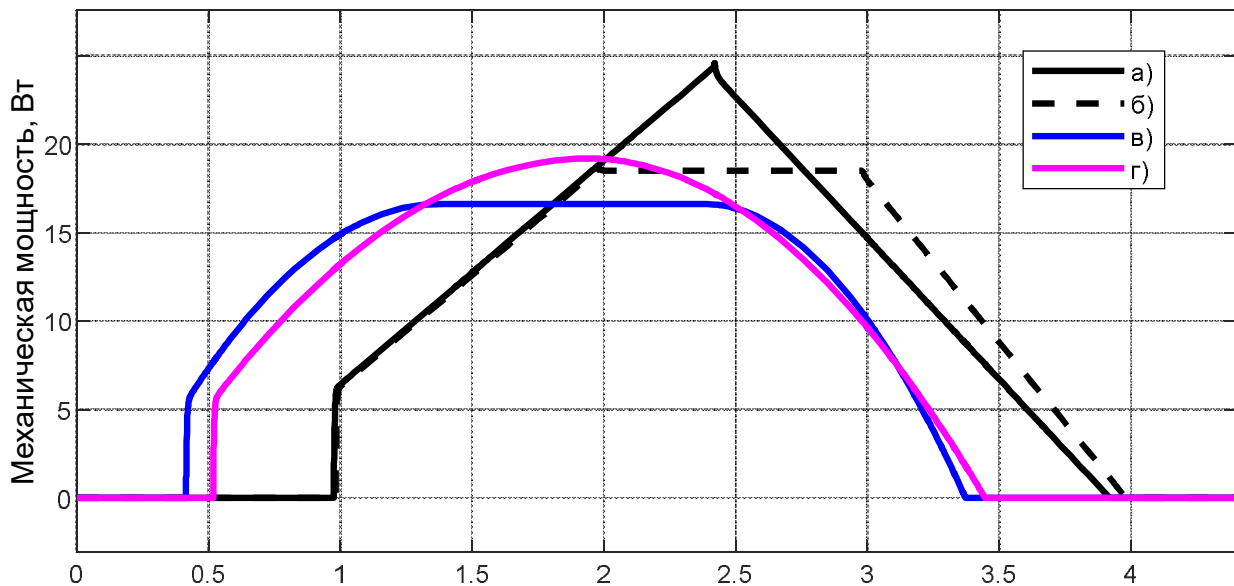
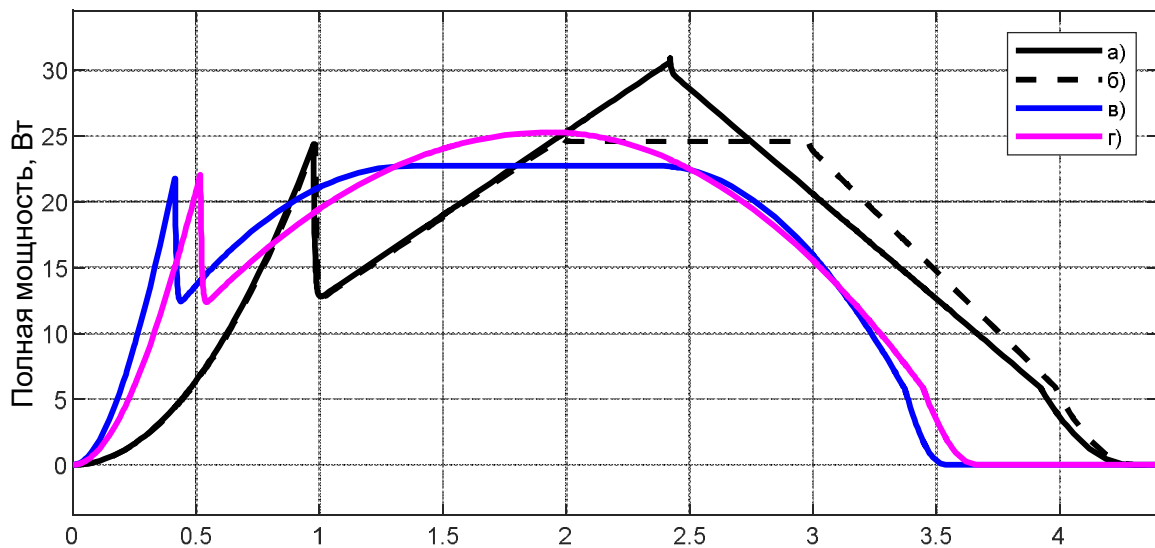


Рис. 12. Зависимость мгновенной механической мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$, в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$



Offset=0

Рис. 13. Зависимость мгновенной электрической (полной) мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

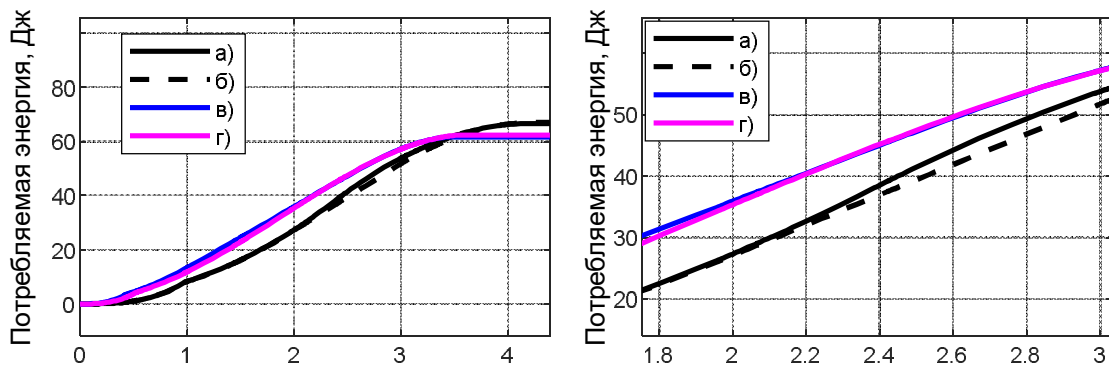


Рис. 14. Зависимость потребляемой энергии от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

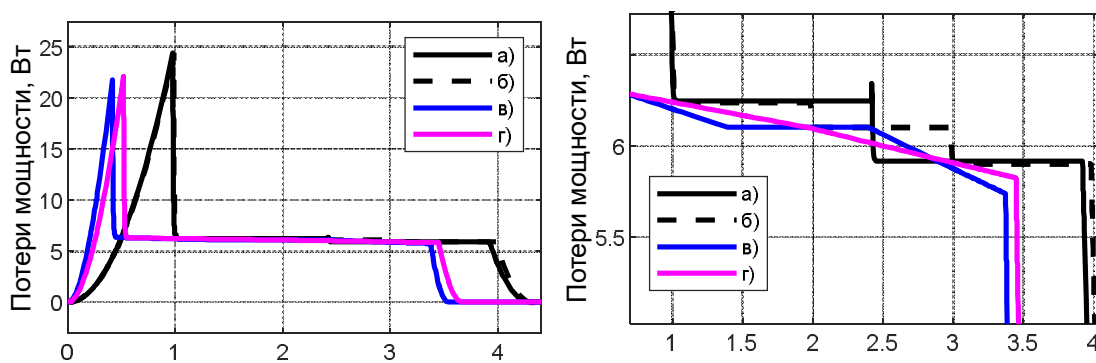


Рис. 15. Зависимость потерь мгновенной мощности от времени

- а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
- в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

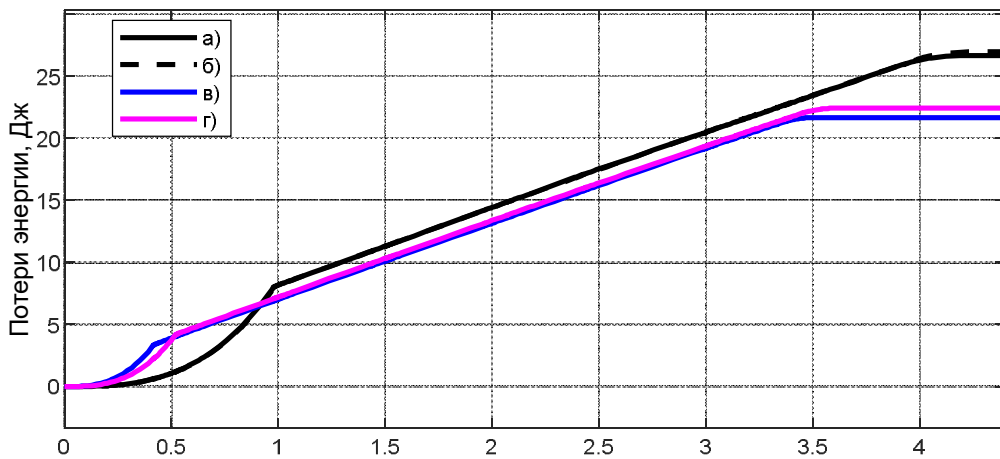


Рис. 16. Зависимость потерь энергии в двигателе от времени
 а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

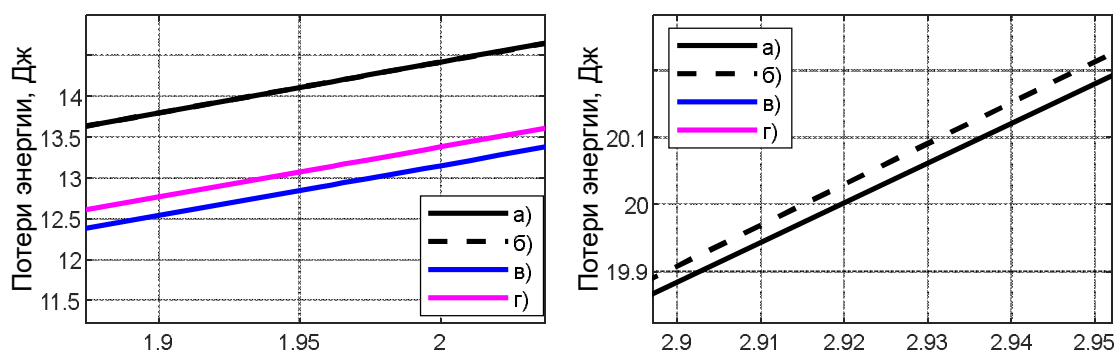


Рис. 17. Зависимость потерь энергии в двигателе от времени
 а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

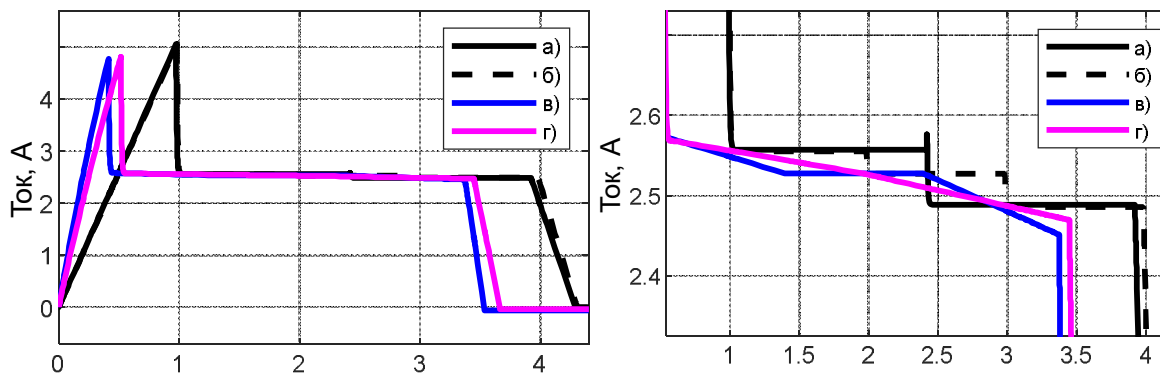


Рис. 18. Зависимость мгновенного значения тока, потребляемого электродвигателем, от времени
 а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

Среди треугольных законов самый низкий пик мощности имеет закон с временем разгона $T/3$, а среди прямоугольных с временем разгона $T/3$, как механической, так и полной, поэтому далее сравниваться будут только они. Пик механической мощности треугольного закона меньше, чем у прямоугольного на 10%, а электрической на 9%. Из графика потребляемой энергии следует, что пик энергопотребления в середине

цикла у закона треугольного ускорения с временем разгона $T/3$ на 13 % меньше, чем у прямоугольного закона с временем разгона $T/3$. Потери энергии в двигателе у треугольного закона меньше на 28 %. Максимальные потери в электродвигателе в данном случае не превышают 44 %, что является критичным значением, которое необходимо учитывать при синтезе закона движения.

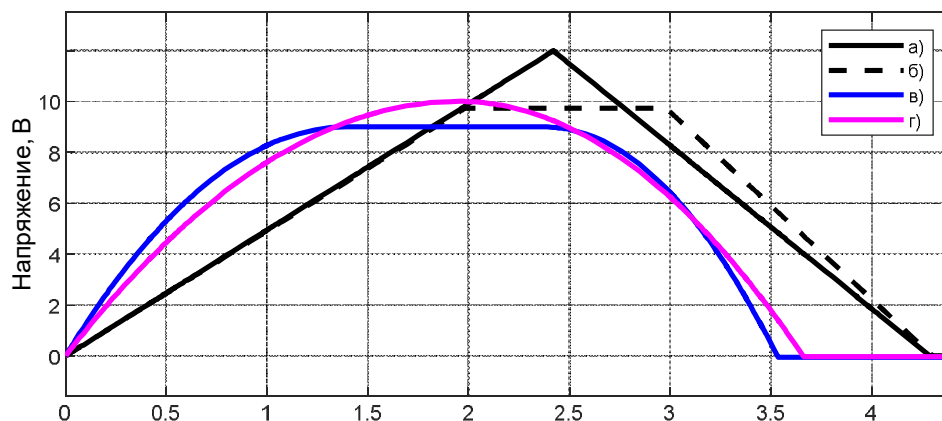


Рис. 19. Зависимость мгновенного значения напряжения, на якоре двигателя, от времени
 а) прямоугольный закон с временем разгона $T/2$, б) прямоугольный закон с временем разгона $T/3$,
 в) треугольный закон с временем разгона $T/3$, г) треугольный закон с временем разгона $T/2$

Выводы. Проведённое исследование подтверждает результат, полученный ранее при синтезе оптимальных законов движения и показывает, что при моделировании только инерциальной нагрузки и учёте потерь в электродвигателе, разница в пиковой мощности между треугольным законом с временем разгона $T/2$ и прямоугольным законом с временем разгона $T/3$ изменяется с 44 %, полученных без учёта потерь в электродвигателе, на 48 % при сравнении механической мощности и на 47 % при сравнении электрической (полной) мощности, то есть эффективность оптимизации возрастает. При отсутствии активного момента сопротивления потери в электродвигателе малы и не оказывают существенного влияния на эффективность разработанных законов движения электропривода. При моделировании законов с активной нагрузкой полученные зависимости показывают, что для минимизации энергопотребления следует использовать закон движения с наибольшим ускорением для минимизации активных потерь. При синтезе законов движения, учитывающих активную нагрузку, необходимо учитывать и потери в электродвигателе, которые могут достигать 44 % от общего энергопотребления за время разгона. Пиковая мощность уменьшилась с 44 % до 9 % при сравнении пиков электрической (полной) мощности, и до 10 % при сравнении механической мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
2. Тимофеев А.Н., Каледина Д.Е. Механизмы перемещения рабочих органов технологического оборудования: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 374 с.

3. Ho P.M., Uchiyama N., Sano S., Honda Y., Kato A., Yonezawa T. Simple motion trajectory generation for energy saving of industrial machines // SICE journal of control, measurement, and system integration. 2014. Vol. 7. Pp. 29–34. DOI: 10.9746/jcmsi.7.29

4. Vanbecelaere F., Oosterwyck V.N., Deramelaere S., Cuyt A., Monte M., Stockman K. On-line motion profile optimization for reciprocating mechanisms // Mechanism and machine theory. 2022. Vol. 173. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104833

5. He Y., Mei J., Fang Z., Zhang F., Zhao Y. Minimum Energy Trajectory Optimization for Driving Systems of Palletizing Robot Joints // Mathematical problems in engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–26. DOI:10.1155/2018/7247093

6. Zhang M., Yan J. A data-driven method for optimizing the energy consumption of industrial robots. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 285. 2021. 124862. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124862

7. Dorell D.G. A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards // Journal of power electronics. 2014. Vol. 14(5). Pp. 842–851. DOI: 10.6113/JPE.2014.14.5.842

8. Волков А.Н., Мацко О.Н., Мосалова А.В. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. №4. С. 141–149.

9. Волков А.Н., Корнилова А.А., Мацко О.Н., Козлович А.В. Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин: учеб. пособие. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. 80 с.

10. Андреев И.Д., Мацко О.Н., Мосалова А.В. Оптимизация законов движения мехатронных модулей с цикловым приводом // Неделя

науки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета с международным участием. Лучшие доклады. 2018. С. 71–74.

11. Мацко О.Н. Оптимизация законов движения мехатронных приводов автоматизированного оборудования // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII. Международной научно-практической конференции. 2021. С. 61–65.

12. Бондаренко С.И., Розкаряка П.И. Расчёт оптимальных по тепловым потерям диаграмм отработки заданного перемещения с ненулевыми начальными и конечными скоростями движения // Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. 2021. С. 168–173.

13. Бохонский А.И., Рыжов А.И. Реализация электродвигателем постоянного тока минимально энергоёмкого управления движением // Механика и машиностроение. Наука и практика, материалы международной научно-практической конференции. 2021. №4. С. 12–17.

14. Vanbecelaere F., Oosterwyck V.N., Deramelaere S., Cuyt A., Monte M., Stockman K., Knaepkens F. Energy optimal point-to-point motion profile optimization // Mechanics based design of structures and machines. 2024. Vol. 52. Pp. 239–256 DOI: 10.1080/15397734.2022.2106241

15. Carabin G., Vidoni R. Energy-saving optimization method for point-to-point trajectories

planes via standard primitives in 1-DoF mechatronic systems // The international journal of advanced manufacturing technology. 2021. Vol. 116. Pp. 331–344. DOI: 10.1007/s00170-021-07277-y

16. Вульфсон И.И. Динамика цикловых машин. СПб.: Политехника, 2015. 425 с.

17. Терёхин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учебное пособие. Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 307 с.

18. Встовский А.Л. Электрические машины: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 464 с.

19. Присмотров Н.И. Обобщенная теория электро-, гидро- и пневмопривода: учеб. пособие. [В 2 ч.] Ч. 2. Замкнутые системы регулируемого привода. Регулирование положения. Выбор мощности двигателей. Энергетическая эффективность и качество энергопотребления. Киров: ВятГУ, 2021. 368 с.

20. Присмотров Н.И. Обобщенная теория электро-, гидро- и пневмопривода: учеб. пособие. [В 2 ч.] Ч. 1. Механическая часть привода. Электро-, гидро- и пневмомеханические и механические характеристики двигателей. Установившиеся и переходные режимы работы привода. Разомкнутые системы регулирования координат. Киров: ВятГУ, 2022. 648 с.

Информация об авторах

Макин Михаил Константинович, студент-магистр второго курса «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: ppppp5.5@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: volkov-and@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Кочнева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: kov_mitpu@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Поступила 15.03.2024 г.

© Макин М.К., Волков А.Н., Кочнева О.В., 2024

***Makin M.K., Volkov A.N., Kochneva O.V.**

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**E-mail: ppppp5.5@mail.ru*

DEPENDENCE OF THE MAXIMUM POWER AND ENERGY CONSUMPTION OF THE CYCLE ELECTRIC DRIVE OF ROBOTS AND MECHATRONIC MODULES ON THE MOTION LAW AND ITS PARAMETERS

Abstract. Cycle and position drives are the basis for automation of discrete manufacturing. They are usually used to implement loading, orientation and transport operations in process equipment, as well as in

industrial robotics and mechatronic modules for various purposes. The main characteristics of such drives in many cases are the values of displacements and motion times. The mathematical model of drives for typical laws of motion characterized by acceleration and deceleration times takes into account thermal losses in a DC motor with independent excitation. The study was carried out in order to determine the efficiency of optimizing the motion law by maximum power consumption while taking into account the losses in the motor. Two laws of change of acceleration of the electric motor were modelled: rectangular and triangular. For each law both situations are considered: movement with and without a section of uniform motion. Studies of models in Simulink environment allowed to establish the relationship between energy consumption, power and the law of motion. The dependence between voltage and current consumption on the type of motion law was obtained. Energy losses in the electric motor do not exceed 2% of the total power consumption at the prevailing inertial load, and 44 % at the active resistance torque equal to the nominal one. It is found that the efficiency of optimization of the law of motion, in comparison with known studies, at inertial load increased from 44 % to 47-48 %, and at application of active torque decreased from 44 % to 9-10 %.

Keywords: Law of motion, DC motor, energy, power, mathematical model, research, Simulink.

REFERENCES

1. Yurevich E.I. Fundamentals of Robotics. 2nd ed. [Osnovy robototekhniki. 2-e izd.] SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 416 p. (rus)
2. Timofeev A.N., Kaledina D.E. Mechanisms of movement of working bodies of technological equipment: textbook. [Mekhanizmy peremeshcheniya rabochih organov tekhnologicheskogo oborudovaniya: ucheb. posobie] SPb.: Izd-vo Polytechnic University, 2017. 374 p. (rus)
3. Ho P.M., Uchiyama N., Sano S., Honda Y., Kato A., Yonezawa T. Simple motion trajectory generation for energy saving of industrial machines. SICE journal of control, measurement, and system integration. 2014. Vol. 7. Pp. 29–34. DOI: 10.9746/jcmsi.7.29
4. Vanbecelaere F., Oosterwyck V.N., Deramelaere S., Cuyt A., Monte M., Stockman K. On-line motion profile optimization for reciprocating mechanisms. Mechanism and machine theory. 2022. Vol. 173. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104833
5. He Y., Mei J., Fang Z., Zhang F., Zhao Y. Minimum Energy Trajectory Optimization for Driving Systems of Palletizing Robot Joints. Mathematical problems in engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–26. DOI: 10.1155/2018/7247093
6. Zhang M., Yan J. A data-driven method for optimizing the energy consumption of industrial robots. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 285. 2021. 124862. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124862
7. David G. Dorell A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards. Journal of power electronics. 2014. Vol. 14(5). Pp. 842–851 DOI:10.6113/JPE.2014.14.5.842
8. Volkov A.N., Matsko O.N., Mosalova A.V. Choice of energy-saving laws of motion of mechatronic drives of technological machines. [Vybor energosberegayushchih zakonov dvizheniya mekhatronnyh privodov tekhnologicheskikh mashin]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2018. No. 4. Pp. 141–149 p. (rus)
9. Volkov A.N., Kornilova A.A., Matsko O.N., Kozlovich A.V. Synthesis of energy-saving optimal algorithms of robots and technological machines drives: textbook. [Sintez optimal'nyh po kriteriyu energosberezheniya algoritmov raboty privodov robotov i tekhnologicheskikh mashin: ucheb. posobie]. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2023. 80 p. (rus)
10. Andreev I.D., Matsko O.N., Mosalova A.V. Optimisation of the laws of motion of mechatronic modules with a cycle drive. [Optimizaciya zakonov dvizheniya mekhatronnyh modulej s ciklovym privodom]. Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta s mezhdunarodnym uchastiem. Luchshie doklady. 2018. Pp. 71–74. (rus)
11. Matsko O.N. Optimisation of laws of motion of mechatronic drives of automated equipment. [Optimizaciya zakonov dvizheniya mekhatronnyh privodov avtomatizirovannogo oborudovaniya]. Innovacii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2021. Sbornik tezisov VIII. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2021. Pp. 61–65. (rus)
12. Bondarenko S.I.; Rozkaryaka P.I. Calculation of the heat-loss optimum diagrams of a given displacement with non-zero initial and final speeds. [Raschyot optimal'nyh po teplovym poteryam diagramm otrabotki zadannogo peremeshcheniya s nenulevymi nachal'nymi i konechnymi skorostyami dvizheniya]. Perspektivy razvitiya elektrotekhnicheskikh, elektromekhanicheskikh i energosberegayushchih sistem. 2021. Pp. 168–173. (rus)
13. Bokhonskiy A.I., Ryzhov A.I. Realisation of the minimum energy-consuming motion control by the DC motor. [Realizaciya elektrodvigatелеm postoyannogo toka minimal'no energoyomkogo upravleniya dvizheniem]. Mekhanika i mashinostroenie. Nauka i praktika, materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2021. No. 4. Pp. 12–17. (rus)

14. Vanbecelaere F., Oosterwyck V.N., Deramelaere S., Cuyt A., Monte M., Stockman K., Knaepkens F. Energy optimal point-to-point motion profile optimization. Mechanics based design of structures and machines. 2024. Vol. 52. Pp. 239–256 DOI: 10.1080/15397734.2022.2106241

15. Carabin G., Vidoni R. Energy-saving optimization method for point-to-point trajectories planes via standard primitives in 1-DoF mechatronic systems. The international journal of advanced manufacturing technology. 2021. Vol. 116 2021. Pp. 331–344. DOI: 10.1007/s00170-021-07277-y

16. Wolfson I.I. Dynamics of cyclic machines. [Dinamika ciklovyh mashin]. SPb.: Politehnika, 2015. 425 p. (rus)

17. Teryokhin V.B., Dementiev Yu.N. Computer modelling of DC and AC electric drive systems in Simulink: textbook [Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink: uchebnoe posobie]. Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Izd-vo Tomsk Polytechnic University, 2013. 307 p. (rus)

18. Vstovskiy A.L. Electric machines: textbook. [Elektricheskie mashiny: ucheb. posobie]. Krasnoyarsk: Sib. fed. un. university, 2013. 464 p. (rus)

19. Prismotrov N.I. Generalised theory of electric, hydraulic and pneumatic drive: textbook. [In 2 parts] Ch. 2. Closed systems of adjustable drive. Position regulation. Selection of motor power. Energy efficiency and quality of energy consumption. [Obobshchennaya teoriya elektro-, gidro- i pnevmoprivoda: ucheb. posobie. [V 2 ch.] CH. 2. Zamknutyie sistemy reguliruemogo privoda. Regulirovanie polozheniya. Vybor moshchnosti dvigatelej. Energeticheskaya effektivnost' i kachestvo energopotrebleniya]. Kirov: VyatSU, 2021. 368 p. (rus)

20. Prismotrov N.I. Generalised theory of electric, hydraulic and pneumatic drive: textbook. [In 2 parts]. P. 1. Mechanical part of the drive. Electro-, hydro- and pneumomechanical and mechanical characteristics of motors. Steady-state and transient modes of operation of the drive. Open-circuit systems of coordinate regulation. [Obobshchennaya teoriya elektro-, gidro- i pnevmoprivoda: ucheb. posobie. [V 2 ch.] CH. 1. Mekhanicheskaya chast' privoda. Elektro-, gidro- i pnevmomekhanicheskie i mekhanicheskie harakteristiki dvigatelej. Ustanovivshiesya i perekhodnye rezhimy raboty privoda. Razomknutyie sistemy regulirovaniya koordinat] Kirov: VyatSU, 2022. 648 p. (rus)

Information about the authors

Makin, Mihail K. Second-year master's student at the Graduate School of Automation and Robotics. E-mail: ppppp5.5@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St.-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29

Kochneva, Olga V. PhD, Assistant professor. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Received 15.03.2024

Для цитирования:

Макин М.К., Волков А.Н., Кочнева О.В. Зависимость максимальной мощности и энергопотребления циклового и позиционного электропривода роботов и мехатронных модулей от закона движения и его параметров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №6. С. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105

For citation:

Makin M.K., Volkov A.N., Kochneva O.V. Dependence of the maximum power and energy consumption of the cycle electric drive of robots and mechatronic modules on the motion law and its parameters. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105