



DOI: 10.18721/JEST.24414
УДК 621.01, 621.08, 62-52

А.Н. Волков, О.Н. Мацко, А.В. Мосалова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ВЫБОР ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ ПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Разработаны цифровые модели мехатронных приводов роботов и технологических машин для наиболее распространенных законов изменения ускорения и типовых нагрузок. На примерах впервые показано, что при постоянных значениях времени цикла и перемещения для всех рассмотренных законов движения при определенных значениях дополнительных параметров имеет место минимум пика мгновенной мощности на участках разгона и динамического торможения. В качестве таких параметров предложено принимать время разгона/ торможения, коэффициент превышения минимально возможного ускорения или коэффициент равномерности движения. Предложены научно обоснованные методики оценки эффективности выбора законов движения и их параметров по критерию минимума максимальной потребляемой мощности. Получена функциональная зависимость между максимальной мгновенной мощностью и энергопотреблением привода для различных законов движения.

Ключевые слова: энергосбережение, мехатронный привод, максимальная мгновенная мощность, законы движения, сравнительный анализ, цикловые приводы.

Ссылка при цитировании:

А.Н. Волков, О.Н. Мацко, А.В. Мосалова. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 141–149. DOI: 10.18721/JEST.24414.

A.N. Volkov, O.N. Matsko, A.V. Mosalova

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

SELECTING THE ENERGY-SAVING LAWS OF MOTION FOR MECHATRONIC DRIVES OF PRODUCTION MACHINES

In this paper, we have developed digital models of mechatronic drives for robots and production machines for the most common laws of acceleration variation and typical loads. The examples show that there is a minimum peak instantaneous power in the areas of acceleration and dynamic braking at certain values of additional parameters for all motion laws under consideration and for the given cycle time and travel. Such parameters include the acceleration/deceleration times, the coefficient of exceeded minimum possible acceleration or the coefficient of uniform motion. Based on studying mathematical models, we have proposed methods for assessing the effectiveness of selecting motion laws and their parameters with respect to the lowest maximum power consumption. The relationship between the maximum instantaneous power and the drive power consumption for different motion laws has been established.

Keywords: energy saving, mechatronic drive, maximum instantaneous power, motion laws, comparative analysis, cyclic drives.

Citation:

A.N. Volkov, O. N. Matsko, A.V. Mosalova, Selecting the energy-saving laws of motion for mechatronic drives of production machines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 141–149, DOI: 10.18721/JEST.24414.

Введение

В любой отрасли промышленности экономия ресурсов энергии, материалов и комплектующих — насущная проблема. Значительная часть энергии потребляется различного рода приводами машин и технологического оборудования. Поэтому создание научно обоснованных методик проектирования рационального с позиций ресурсосбережения привода весьма актуально [1–4]. Для достижения максимального эффекта в этой области необходимо комплексно решать следующие три задачи. Во-первых, это традиционная задача — минимизация потребляемой энергии [3]. Во-вторых, минимизация массогабаритных параметров привода, а следовательно, и типоразмеров его компонентов. В-третьих, обеспечение заданного соотношения между энергопотреблением и массогабаритными параметрами, если при выборе конструктивных параметров указанные критерии вступают в противоречие. Для решения этих задач необходимо установить функциональную зависимость между максимальной мгновенной мощностью, энергопотреблением, типом закона движения и его параметрами. Конструкции двигателей, моторов и цилиндров здесь не имеют принципиального значения. Считается, что все они имеют высокий коэффициент полезного действия, поэтому во внимание будут приниматься только искусственные механические характеристики, обеспечиваемые современными мехатронными средствами.

Вопросам оптимального управления динамическими системами всегда уделялось большое внимание. Основы научных подходов к оптимизации управления динамическими системами заложены в работах Л.С. Понтрягина, А.А. Фельдбаума и Н.Н. Красовского [5, 13]. В дальнейшем данное направление, связанное прежде всего с оптимизацией быстродействия и устойчивости систем при заданных величинах мощности и тяги, активно развивалось отечественными и зарубежными учеными [3, 4, 6–8, 10–12]. Задача выбора закона движения и его параметров по критериям миними-

зации мощности в технологических машинах и роботах — новая и весьма актуальная.

Цель работы заключается в синтезировании энергосберегающих законов движения и определении функциональной зависимости между максимальной мгновенной мощностью, энергопотреблением, типом закона движения и его параметрами.

Методика решения проблемы и расчетная часть

Энергетические затраты привода зависят от наличия рекуперации, закона движения и нагрузки [2, 9, 14, 15]. Можно предположить, что при заданном времени движения T и величине перемещения s выходного звена исполнительного механизма машины максимальная мгновенная мощность N и потребляемая энергия P определяются законом изменения ускорения, а следовательно, скорости и ускорения. На рис. 1 представлены зависимости ускорения $a_\tau(Z, t, \tau, T, s)$ и скорости $v_\tau(Z, \tau, t, T, s)$ выходного звена. Здесь Z — целочисленный параметр, определяющий типы законов изменения ускорения, наиболее часто встречающихся на практике, ($Z = 1$ — прямоугольный; $Z = 2$ — треугольный несимметричный; $Z = 3$ — косинусный; $Z = 4$ — синусный); τ — время разгона (торможения); t — текущее время; T — время движения ($T = 3$ с); s — перемещение ($s = 1$ м).

В рассмотренном примере для разных законов различие в максимальных значениях достигает для ускорений 50 %, скоростей — 18 %, а координат — всего 4 % при принятых значениях времени движения и величины перемещения. Такое уменьшение различий обусловлено двойным последовательным интегрированием функции изменения ускорения выходного звена механизма машины. Таким образом, для случаев, когда алгоритм работы машины на предполагает наличия каких-то дополнительных требований, кроме времени цикла движения и величины хода, проектировщик имеет возможность выбора любого из рассмотренных законов в зависимости от других критериев (таких, как вибрация, динамические нагрузки, уровень шума энергопотребление, мощность двигателя или мотора).

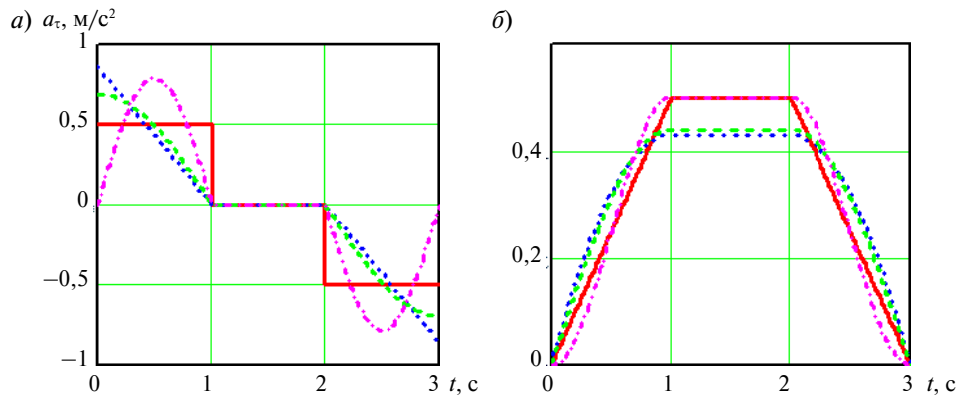


Рис. 1. Типовые законы движения: *a* – ускорения, *b* – скорости мехатронных приводов

(—) – $a_t(1, t, 1, 3, 1)$, $v_t(1, t, 1, 3, 1)$; (---) – $a_t(2, t, 1, 3, 1)$, $v_t(2, t, 1, 3, 1)$;
 (---) – $a_t(3, t, 1, 3, 1)$, $v_t(3, t, 1, 3, 1)$; (---) – $a_t(4, t, 1, 3, 1)$, $v_t(4, t, 1, 3, 1)$;

Fig. 1. Model laws of motion: *a* – acceleration, *b* – speeds of mechatronic drives

(—) – $a_t(1, t, 1, 3, 1)$, $v_t(1, t, 1, 3, 1)$; (---) – $a_t(2, t, 1, 3, 1)$, $v_t(2, t, 1, 3, 1)$;
 (---) – $a_t(3, t, 1, 3, 1)$, $v_t(3, t, 1, 3, 1)$; (---) – $a_t(4, t, 1, 3, 1)$, $v_t(4, t, 1, 3, 1)$;

При принятых значениях T и s , наряду со временем разгона (торможения) τ , характер функций ускорения и скорости можно задавать через коэффициент равномерности движения выходного звена ξ или коэффициент k превышения минимально возможного ускорения выходного звена. Коэффициент равномерности движения ξ представляет собой отношение величины участка траектории, на котором имеет место равномерное движение, к величине хода.

Коэффициент k превышения минимально возможного ускорения представляет собой отношение максимального ускорения цикла движения к максимальному ускорению цикла, в котором отсутствует участок равномерного движения. Все эти параметры функционально связаны между собой и являются равноценными. Выбор того или иного параметра обуславливается требованиями технологического процесса в зависимости от того, что является более приоритетным – время разгона (торможения), равномерность движения или ограничения по динамическим нагрузкам.

Например, мгновенная мощность мехатронного привода штангового глубинного на-

соса для нефтедобычи, где приоритетны динамические нагрузки, определяется выражением

$$N(Z, t, k, T, s) = v_k(Z, t, k, T, s) [a_k(Z, t, k, T, s)(m + m_0) + gm]. \quad (1)$$

Здесь $v_k(Z, t, k, T, s)$ и $a_k(Z, t, k, T, s)$ – законы изменения скорости и ускорения; которые задаются параметром k ; m и m_0 – приведенные массы, перемещающиеся вертикально, и, соответственно, прочие; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

На рис. 2 представлены зависимости мгновенной мощности от времени для различных типов законов изменения ускорения и при различных значениях параметра k .

Анализ графиков показывает, что при всех рассмотренных законах изменения ускорения имеет место максимум (пик) мгновенной мощности на участке разгона. Причем этот пик имеет минимальное значение при определенном для каждого закона значении коэффициента k [2, 9]. Отрицательные значения мощности имеют место при необходимости применения активного торможения с дополнительной диссипацией энергии, когда сил сопротивления (силы веса) не достаточно для обеспечения требуемого замедления.

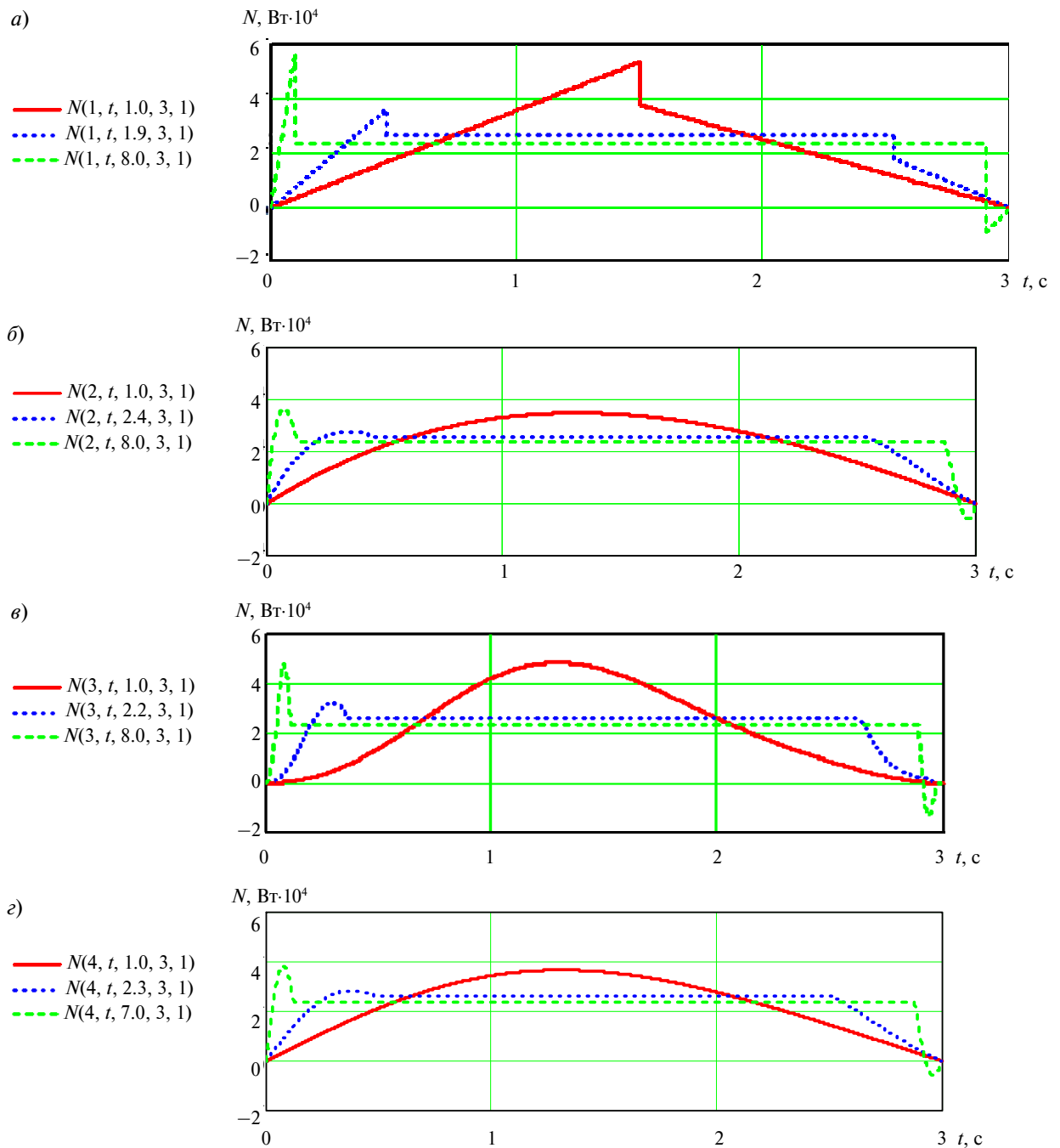


Рис. 2. Зависимость мгновенной мощности от времени при различных значениях коэффициента k для разных законов изменения ускорения: a – прямоугольного; $б$ – треугольного; $в$ – косинусного; $г$ – синусного

Fig. 2. The dependence of the instantaneous power on time for different values of the coefficient k for different laws of change in acceleration: a – rectangular; $б$ – triangular; $в$ – cosine; $г$ – sinus

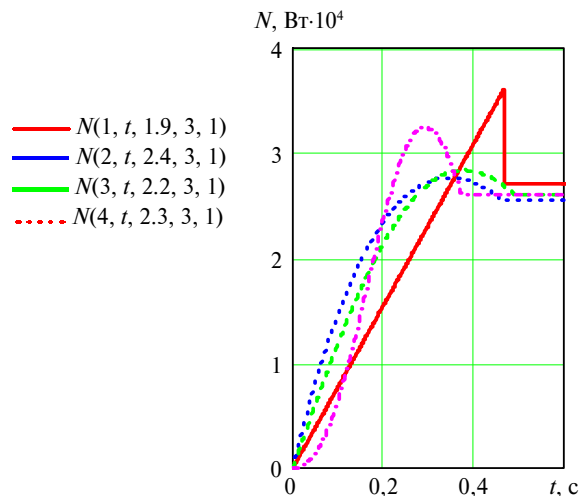


Рис. 3. Сводные графики зависимости мгновенной мощности от времени для участка разгона
 Fig. 3. Summary graphs of instantaneous power versus time for the acceleration section

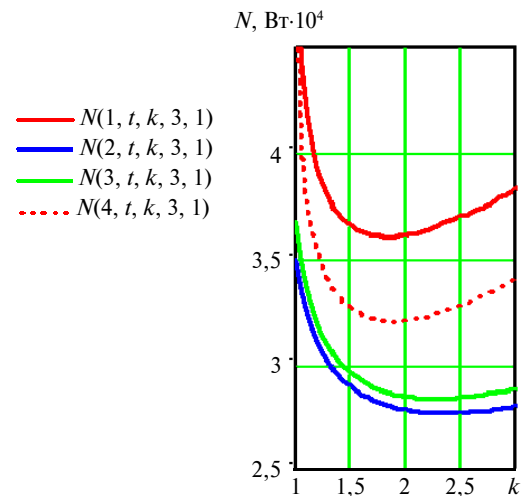


Рис. 4. Сводные графики зависимости максимальной мгновенной мощности от коэффициента k
 Fig. 4. Summary plots of maximum instantaneous power versus k -factor

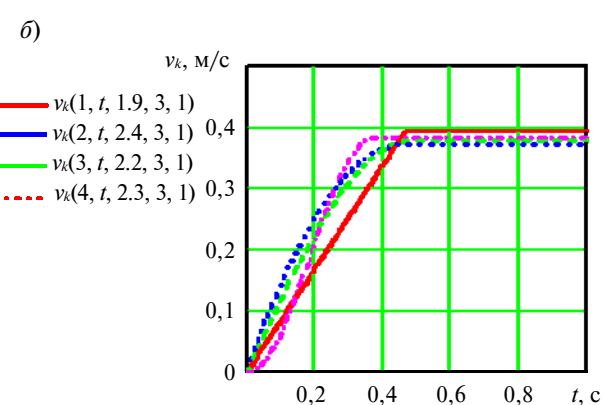
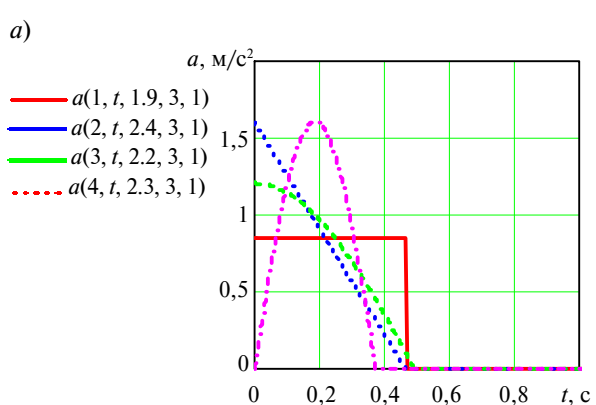


Рис. 5. Законы изменения ускорения (а) и скорости (б), обеспечивающие минимальное значение пиковой мощности мехатронного привода, при четырех типовых законах изменения ускорения на участке разгона
 Fig. 5. The laws of change in acceleration (a) and speed (b), providing the minimum value of the peak power of the mechatronic drive, with four typical laws of change in acceleration in the acceleration section

На рис. 3 представлены сводные графики зависимости мгновенной мощности от времени для четырех типов законов изменения ускорения на участке разгона, построенные для ряда значений коэффициента k и обеспечивающие минимальную пиковую мощность. Качественно оценить эффективность оптимизации параметров закона изменения ускорения представляют сводные графики зависимости максимальной мгновенной мощности от коэффициента превышения минимально возможного

ускорения k (рис. 4). Из графиков следует, что для разных законов изменения ускорения экстремумы имеют разную форму и наступают при существенно различающихся значениях коэффициента

На рис. 5 представлены законы изменения ускорения и скорости на участке разгона (0, 1 с), обеспечивающие минимальное значение пиковой мощности мехатронного привода для четырех типовых законов изменения ускорения, рассмотренных выше.

Количественно эффективность оптимизации параметра k для каждого типа закона изменения ускорения по отношению к соответствующим законам при отсутствии участка равномерного движения (в этом случае пиковое ускорение минимально) определяется формулой

$$\delta_Z(k) = \frac{N(Z, t, k_0, T, s) - N(Z, t, k_m, T, s)}{N(Z, t, k_m, T, s)} 100, \quad (2)$$

где k_0 – коэффициент превышения минимально возможного ускорения при движении без установившейся скорости; k_m – коэффициент превышения ускорения, соответствующий минимально возможному значению пиковой мощности для данного типа закона изменения ускорения.

Для оценки влияния оптимизации привода по критерию минимизации пиковой мощности на уменьшение максимальной скорости (по сравнению с максимальными скоростями соответствующих законов движения при отсутствии участка равномерного движения) введен коэффициент k_{1Z} :

$$k_{1Z}(k) = \frac{v_k(Z, t, k_m, T, s) - v_k(Z, t, k_0, T, s)}{v_k(Z, t, k_m, T, s)} 100\%. \quad (3)$$

Для оценки эффективности рассмотренных типов законов изменения ускорения достаточно сравнить их пиковые мощности

с пиковой мощностью треугольного закона, которая минимальна:

$$K_Z(k) = \frac{N(Z, t, k_m, T, s) - N(2, t, k_m, T, s)}{N(2, t, k_m, T, s)} 100. \quad (4)$$

Увеличение максимального ускорения при выборе типа закона оценивается коэффициентом K_{1Z} , который рассчитывается по формуле

$$K_{1Z}(k) = \frac{a_k(Z, t, k_m, T, s)}{a_k(2, t, k_m, T, s)}. \quad (5)$$

Увеличение максимальной скорости при этом оценивается коэффициентом K_{2Z} , определяемым формулой

$$K_{2Z}(k) = \frac{v_k(Z, t, k_m, T, s)}{v_k(2, t, k_m, T, s)}. \quad (6)$$

Результаты сравнительного анализа эффективности выбора законов изменения ускорения и их параметров сведены в таблицу.

При решении практических задач, наряду с количественной оценкой законов движения, необходимо учитывать и их качественные показатели. Так, например, синусные законы существенно уступают по энергосбережению и минимальной пиковой мощности треугольным и косинусным законам [14, 15]. Однако при реализации двух последних законов в машине возникают мягкие удары, приводящие к снижению срока ее службы.

Результаты сравнительного анализа эффективности для различных законов изменения ускорения при постоянной нагрузке ($m = 20\ 000$ кг, $m_0 = 7\ 000$ кг, $T = 3$ с, $s = 1$ м)

The results of a comparative analysis of the effectiveness for different laws of change in acceleration under constant load ($m = 20,000$ kg, $m_0 = 7,000$ kg, $T = 3$ s, $s = 1$ m)

Тип закона движения	N_{\min} , кВт	N_{\max} , кВт	$\delta_Z(k)$, %	k	k_{1Z} , %	K_Z , %	K_{1Z} , %	K_{2Z} , %
Прямоугольный	36,0	53,7	49,2	1,9	41	30,0	0,59	1,06
Треугольный	27,7	34,8	25,6	2,4	26	0	1,00	1,00
Косинус	28,3	36,7	29,7	2,2	29	2,2	0,77	1,02
Синус	32,4	48,6	50,0	2,3	43	17,0	1,02	1,02

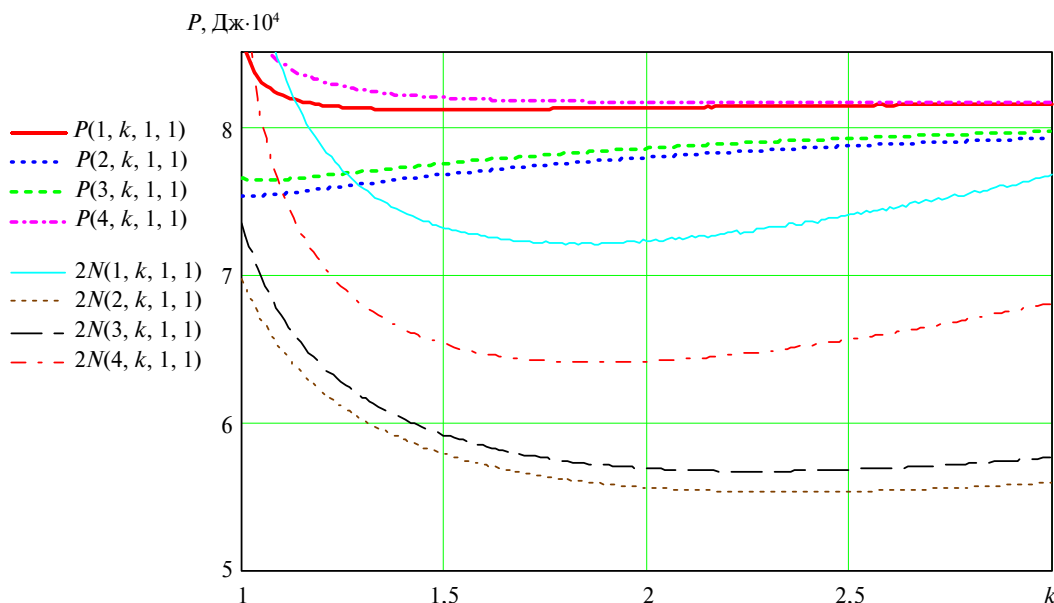


Рис. 6. Сводные графики зависимости пиковой мощности и энергетических затрат одного цикла для четырех законов изменения ускорения ($T = 1$ с, $s = 1$ м, $m = 7000$ кг, $m_0 = 20000$ кг)

Fig. 6. Summary plots of peak power and energy costs of one cycle for the four laws of change of acceleration ($T = 1$ s, $s = 1$ m, $m = 7000$ kg, $m_0 = 20000$ kg)

Энергетические затраты на один цикл (прямой ход ведомого звена) определяются формулой

$$P(k, T, s) = \int_0^{t_0} v_k(Z, t, k, T, s) [a_k(Z, t, k, T, s) \times (m + m_0) + mg] dt, \quad (7)$$

где t_0 – момент начала активного торможения при отсутствии рекуперации.

На рис. 6 представлены сводные графики зависимости пиковой мощности и энергетических затрат одного цикла для четырех типов законов изменения ускорения.

Закключение и выводы

Анализ графиков, представленных в работе, позволяет сделать следующие выводы:

1. Для типовых законов изменения ускорения энергетические затраты, как и мгновенная мощность, могут иметь экстремум (минимум) при определенных значениях коэффициента k превышения минимально возможного ускорения.

2. Экстремум может находиться как внутри интервала $[1, \infty]$, так и на его границах.

3. Треугольные и косинусные законы изменения ускорения предпочтительны с позиций как снижения энергетических затрат, так и уменьшения пиковой потребляемой мощности.

4. На практике возможны случаи, когда при рациональном выборе варьируемого параметра, например k , обеспечивается минимум (или почти минимум) потребляемой энергии при минимально возможном пиковом значении потребляемой мощности.

Подходы, предложенные в работе, позволяют моделировать процессы работы машины и выбирать рациональные типы законов движения, определять их оптимальные параметры, обеспечивая минимальное потребление мощности и энергии, а также корректировать закон движения привода машины, в том числе в процессе движения, при изменении нагрузки или приведенных масс и моментов инерции. Представленные результаты могут служить основой для создания новых методик проектирования высокоэффективной и, следовательно, конкурентоспособной отечественной техники во всех отраслях промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Молчанов А.Г.** Пути дальнейшего совершенствования штанговых скважинных насосных установок // Бурение и нефть. 2014. № 2. С. 3–9.
2. **Волков Н.А., Мацко О.Н., Мосалова А.В.** Автоматизированный адаптивный привод штангового глубинного насоса // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2018 г. СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. С. 34.
3. **Румянцев А.Ю., Самосейко В.Ф., Белоусова Н.В.** Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 6 (40). С. 206–213.
4. **Шонин О.Б., Пронько В.С.** Энергосберегающие алгоритмы час-тотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // Записки горного института. 2016. Т. 218. С. 270–280.
5. **Красовский Н.Н.** Теория управления движением. М.: Наука, 1968. 476 с.
6. **Бычков М.Г., Кузнецова В.Н.** Оптимальное и квазиоптимальное управление позиционным электроприводом по критерию минимума электрических потерь // Теория и практика автоматизированного электропривода. 2015. № 2 (27). С. 4–11.
7. **Степаньянц Г.А.** О симметричном преобразовании спектра неустойчивого объекта при управлении им по критерию минимума расхода энергии // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. 50. С. 27. www.mai.ru/science/trudy
8. **Румянцев А.Ю., Самосейко В.Ф.** Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. № 4. С. 92–94.
9. **Волков А.Н., Корнилова А.А., Мацко О.Н.,** Синтез оптимальных законов управления цикловыми приводами // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2018 г. СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. С. 22.
10. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. 736 с.
11. **David G. Dorell.** A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards // Journal of Power Electronics. Vol.14. N 5. 2014. P.842–851.
12. **Подураев Ю.В., Кулешов В.С.** Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5–10.
13. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин [и др.]. М.: Наука, 1969. 384 с.
14. **Андреев И.Д., Мацко О.Н., Мосалова А.В.** Оптимизация законов движения мехатронных модулей с цикловым приводом // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. конференции с междунар. участием. Лучшие доклады. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 71–74.
15. **Лазарев Р.А., Мацко О.Н., Волков Н.А.** Повышение энергоэффективности мехатронных цикловых приводов // Неделя науки СПбПУ: Матер. науч. конференции с междунар. участием. Лучшие доклады. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 79–82.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЛКОВ Андрей Николаевич — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: volkov-and-1@yandex.ru

МАЦКО Ольга Николаевна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: onmatsko@gmail.com

МОСАЛОВА Анна Владимировна — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: mosalova_anna@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 18.07.2018



REFERENCES

- [1] **Molchanov A.G.** Puti dalneyshego sovershenstvovaniya shtangovykh skvazhinnykh nasosnykh ustanovok. *Bureniye i nefi*. 2014. №2. S. 3–9. (rus.)
- [2] **Volkov N.A., Matsko O.N., Mosalova A.V.**, Avtomatizirovanny adaptivnyy privod shtangovogo glubinnogo nasosa. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i elektromekhaniki IPDME-2018: Sbornik tezisev Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 12–13 aprelya 2018 g. SPb.: RITs Gornogo universiteta, 2018. S. 34. (rus.)
- [3] **Rumyantsev A.Yu., Samoseyko V.F., Belousova N.V.** Optimalnoye upravleniye v sistemakh elektrodvizheniya sudov po kriteriyu minimum. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2016. № 6 (40). S. 206–213. (rus.)
- [4] **Shonin O.B., Pronko V.S.** Energoberegayushchiye algoritmy chas-totnogo upravleniya asinkhronnym privodom s utochneniyem oblasti minimuma poter na osnove metodov nechetkoy logiki. *Zapiski gornogo instituta*. 2016. T. 218. S. 270–280. (rus.)
- [5] **Krasovskiy N.N.** Teoriya upravleniya dvizheniyem. M.: Nauka, 1968. 476 s. (rus.)
- [6] **Bychkov M.G., Kuznetsova V.N.** Optimalnoye i kvazioptimalnoye upravleniye pozitsionnym elektropriivodom po kriteriyu minimuma elektricheskikh poter. *Teoriya i praktika avtomatizirovannogo elektropriivoda*. 2015. № 2 (27). S. 4–11. (rus.)
- [7] **Stepanyants G.A.** O simmetrichnom preobrazovanii spektra neustoychivogo obyektu pri upravlenii im po kriteriyu minimuma rashhoda energii. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»*. 2012. Vip. 50. S. 27. www.mai.ru/science/trudy (rus.)
- [8] **Rumyantsev A.Yu., Samoseyko V.F.** Resheniye zadachi optimalnogo upravleniya dina-micheskoy sistemoj, obespechivayushcheye zhelayemye perekhodnyye protsessy. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2015. T. 2. № 4. S. 92–94. (rus.)
- [9] **Volkov A.N., Kornilova A.A., Matsko O.N.** Sintez optimalnykh zakonov upravleniya tsiklovymi privodami. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i elektromekhaniki IPDME-2018: Sbornik tezisev Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 12–13 aprelya 2018 g. SPb.: RITs Gornogo universiteta, 2018. S. 22. (rus.)
- [10] Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. N.D.Yegupova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana, 2000. 736 s. (rus.)
- [11] **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. N 5. P. 842–851.
- [12] **Podurayev Yu.V., Kuleshov V.S.** Printsipy postroyeniya i sovremennyye tendentsii razvitiya mekhatronnykh system. *Mekhatronika*. 2000. № 1. S. 5–10. (rus.)
- [13] Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov / L.S. Pontryagin [i dr.]. M.: Nauka, 1969. 384 s. (rus.)
- [14] **Andreyev I.D., Matsko O.N., Mosalova A.V.** Optimizatsiya zakonov dvizheniya mekhatronnykh moduley s tsiklovym privodom. *Nedelya nauki SPbPU: mater. nauchn. konferentsii s mezhdunar. uchastiyem. Luchshiye doklady*. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018. S. 71–74. (rus.)
- [15] **Lazarev R.A., Matsko O.N., Volkov N.A.** Povysheniye energoeffektivnosti mekhatronnykh tsiklovyykh privodov. *Nedelya nauki SPbPU: m-ly nauchn. konferentsii s mezhdunar. uchastiyem. Luchshiye doklady*. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2018. S. 79–82. (rus.)

THE AUTHORS

VOLKOV Andrei N. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: volkov-and-1@yandex.ru

MATSKO Olga N. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: onmatsko@gmail.com

MOSALOVA Anna V. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: mosalova_anna@mail.ru

Received 18.07.2018