

Научная статья

УДК 621.313.333.2

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-50–58

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ТОКА РОТОРА

**Камил Шабо****Kamil Shabo**

кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации производственных процессов, Технический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова в г. Нерюнгри», Нерюнгри, Россия

**Сергей Викторович Ляпушкин****Sergey V. Lyapushkin**

кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия

Актуальность

В текущее время электроприводная система значительного числа механизмов, обеспечивающих подъем и перемещение грузов, таких как краны, используемые в портах и складских терминалах, а также подъемные установки, работающие на шахтных стволах небольшой и средней производительности в горнодобывающей отрасли, и осуществляющие управление положением груза в процессе движения, оснащены асинхронными двигателями с фазным ротором. Для улучшения регулировочных свойств электроприводов такого типа используются управляемые тиристорные регуляторы тока (ТРТ) в сочетании с регулированием сопротивления в цепи ротора. Такой подход обеспечивает более точное и плавное изменение момента на валу электродвигателя в зависимости от требуемого алгоритма движения.

Цель исследования

Исследование процессов в приводе переменного тока с ТРТ при включении реостата в цепь ротора асинхронного привода.

Методы исследования

Разработана математическая модель, позволяющая формировать ступенчато изменяющийся сигнал заданного ускорения при пуске и замедлении с длительностью первой ступени, равной половине периода собственных колебаний системы.

Результаты

Интеграция реостата в роторную цепь асинхронного двигателя, управляемого ТРТ, определяется необходимостью ограничения бросков тока и нагрева двигателя. Наличие реостата, переключаемого

Ключевые слова

асинхронный
электропривод,
тиристорный регулятор
тока, упругое звено,
динамическая нагрузка,
роторная цепь,
управляющий сигнал,
позиционное управление,
двигательный режим,
динамическое
торможение,
механическая
характеристика,
коэффициент жёсткости

при пуске и торможении, позволяет рассматривать управление асинхронным приводом с ТРТ в цепи ротора, по нагреву близким к реостатному управлению. Применение ТРТ ротора позволяет существенно улучшить регулировочные свойства асинхронного электропривода с упругими звеньями по динамическим нагрузкам и делает возможным создание на его основе высокоточных систем управления позиционными механизмами.

Для цитирования: Шабо К., Ляпушкин С. В. Оптимизация динамических режимов асинхронного позиционного электропривода с тиристорным регулятором тока ротора // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 50-58. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-50-58>.

Original article

OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF AN ASYNCHRONOUS POSITIONAL ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR ROTOR CURRENT REGULATOR

Relevance

Currently, the electric drive system of a significant number of mechanisms for lifting and moving goods, such as cranes used in ports and warehouse terminals, as well as lifting installations operating on mine shafts of small and medium productivity in the mining industry, and controlling the position of cargo during movement, are equipped with asynchronous motors with a phase rotor. To improve the control properties of electric drives of this type, controlled thyristor current regulators are used in combination with by adjusting the resistance in the rotor circuit. This approach provides a more accurate and smooth change in the torque on the motor shaft, depending on the required motion algorithm.

Aim of research

Investigation of processes in an alternating current drive with a thyristor current regulators, when a rheostat is connected to the rotor circuit of an asynchronous drive.

Research methods

A mathematical model has been developed that makes it possible to generate a stepwise varying signal of a given acceleration during start-up and deceleration with a duration of the first stage equal to half the period of natural oscillations of the system.

Results

The integration of the rheostat into the rotary circuit of an asynchronous motor controlled by a thyristor current regulator is determined by the need to limit current surges and motor heating. The presence of a rheostat, switched during start and braking, allows us to consider the control of an asynchronous drive with a thyristor current regulator in the rotor circuit by heating close to rheostatic control. The use of a turbofan rotor makes it possible to significantly improve the adjusting properties of an asynchronous electric drive with elastic links for dynamic loads and makes it possible to create high-precision positional control systems based on it.

Keywords

asynchronous electric drive, thyristor current regulator, elastic link, dynamic load, rotary circuit, control signal, positional control, motor mode, dynamic braking, mechanical characteristic, stiffness coefficient

For citation: Shabo K., Lyapushkin S. V. Optimizatsiya dinameskikh rezhimov asinkhronnogo pozitsionnogo elektroprivoda s tiristornym regulyatorom toka rotora [Optimization of Dynamic Modes of an Asynchronous Positional Electric Drive with a Thyristor Rotor Current Regulator]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 50-58 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-50-58>.

Функциональная схема системы позиционного управления электропривода с тиристорным регулятором тока ротора

Применение тиристорных регуляторов тока (ТРТ) в релейно-контактных схемах управления позволяет плавно менять эквивалентное сопротивление роторной цепи и, следовательно, использовать замкнутую систему управления, принципиально не отличающуюся от системы управления приводом постоянного тока [1].

Управляющий сигнал, пропорциональный заданному закону изменения скорости, формируется в задающей модели (рисунок 1) [2]. Воздействие – сигналом действительной скорости $U_{с,д}$, а разность ΔU подается на регулятор скорости РС, выход которого является входным воздействием регулятора тока РТ.

Основным воздействием на силовую часть привода является выходное напряжение регулятора тока U_{y1} , подаваемое

на вход регулируемого усилителя мощности (РУМ), в который входят пороговый элемент НЭ1, устройства управления тиристорами (УУТ) и устройства управления роторными сопротивлениями (УУРС) и тиристорный коммутатор (ТК). С помощью УУТ обеспечивается изменение углов отпирания тиристоров пропорционально U_{y1} . Когда при полностью открытых тиристорах U_{y1} превысит порог срабатывания НЭ1, то появится сигнал U_{y2} , под действием которого отключится очередная ступень роторных сопротивлений с одновременным уменьшением углов управления тиристорами. Если происходит ускорение системы (U_c увеличивается во времени), то сигнал U_{y1} в пределах каждой ступени сопротивлений будет возрастать от нуля до максимального значения, при котором тиристоры полностью открываются, и переключается следующая ступень. Так как в асинхронном приводе максимальная скорость зависит от нагрузки, то при

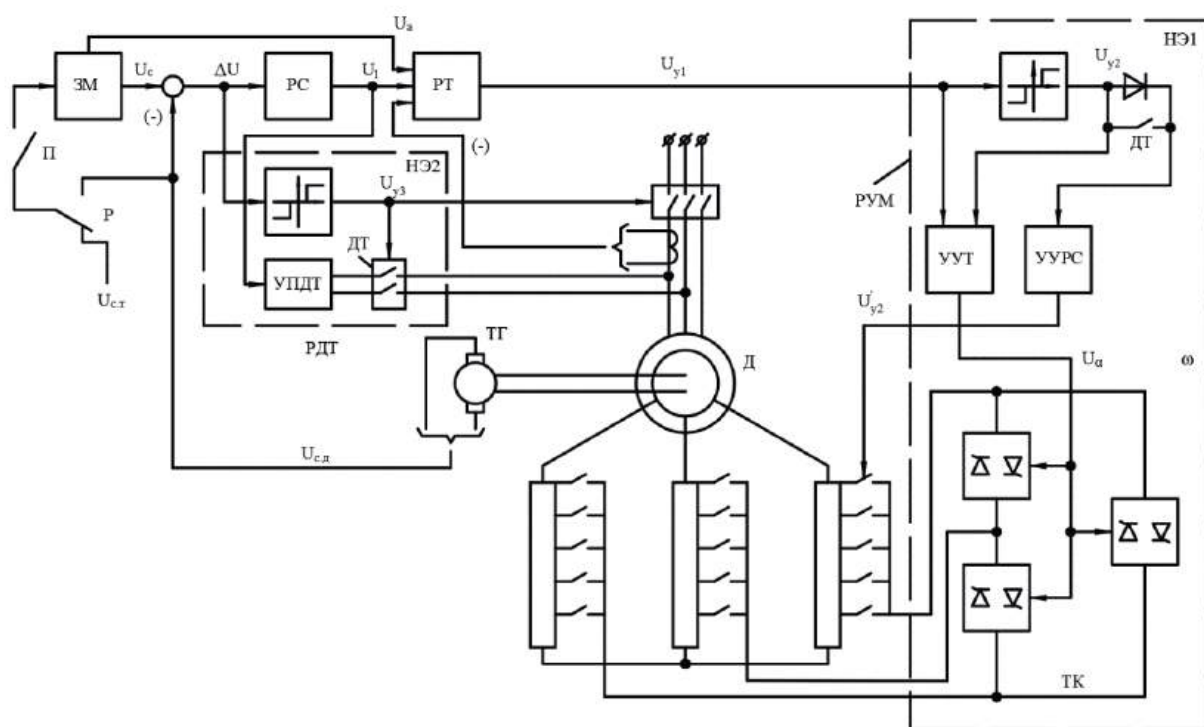


Рисунок 1. Функциональная схема системы позиционного управления с задающей моделью

Figure 1. Functional diagram of a position control system with a master model

замыкании контактов, заворачивающих ротор, задающий сигнал $U_{с.т}$, пропорциональный синхронной скорости двигателя, снимается с помощью реле (Р) со входа задающей модели, и вместо него подается сигнал действительной скорости $U_{с.д}$. Поэтому в установившемся режиме работы двигателя на естественной характеристике всегда $U_c = U_{с.д}$ и $\Delta U = 0$.

Замедление может быть осуществлено в двигательном режиме или в режиме динамического торможения. Для начала замедления необходимо разомкнуть контакт П, после чего сигнал начнет уменьшаться по определенному закону. Если при $\Delta U = U_c - U_{с.д} < 0$ превысится порог срабатывания нелинейного элемента НЭ2 регулятора динамического торможения, регулирование будет осуществляться изменением тока возбуждения с помощью управляемого преобразователя динамического торможения УПДТ и изменением сопротивления в роторной цепи. При $\Delta U \geq 0$ произойдет двигательное замедление. В обоих случаях заданный режим обеспечивается регуляторами РС и РТ. Вместо обратной связи по току статора (ротора) можно использовать связь по ускорению.

Особенностью данной системы является зависимость жесткости механической характеристики двигателя от угла управления тиристорами коммутатора ТК.

Оптимизация динамических свойств позиционной системы асинхронного электропривода

Внедрение ТРТ открывает возможности для применения задающих моделей, которые позволяют оптимизировать динамические режимы электропривода не только в двигательном режиме, но и в широко используемом режиме динамического торможения, который осуществляется путем подачи постоянного тока

в обмотки статора. При этом жесткость механических характеристик двигателя в процессе динамического торможения регулируется как изменением эквивалентного сопротивления роторной цепи, так и величиной подводимого постоянного тока к статору. Во втором случае происходит изменение не только коэффициента жесткости механической характеристики, но и значения критического момента, что расширяет возможности управления процессом торможения и позволяет достичь более высокой точности регулирования.

Таким образом, при моделировании системы управления электроприводом с применением ТРТ и регулируемым динамическим торможением следует рассматривать воздействие устройства динамического торможения на систему привода в виде блока перемножения на выходе нелинейного элемента, который ограничивает критический момент двигателя (рисунок 2) [3]. Значение сигнала Z может варьироваться от 1, что соответствует максимально допустимому току динамического торможения, до 0, когда напряжение постоянного тока отключено от обмоток статора, что позволяет плавно регулировать режим торможения в зависимости от конкретных условий работы привода и требуемых параметров замедления для обеспечения оптимальной работы системы.

Существует целый ряд высокотехнологичных устройств, выполняющих специализированные функции в составе современных систем управления электроприводами [4]. В рассматриваемом случае речь идет о двух логических устройствах с условными обозначениями ЛУ1 и ЛУ2, предназначенных для решения задач, связанных соответственно с переключением роторных сопротивлений и регулированием режима динамического торможения. Эти устройства играют ключевую роль в обе-

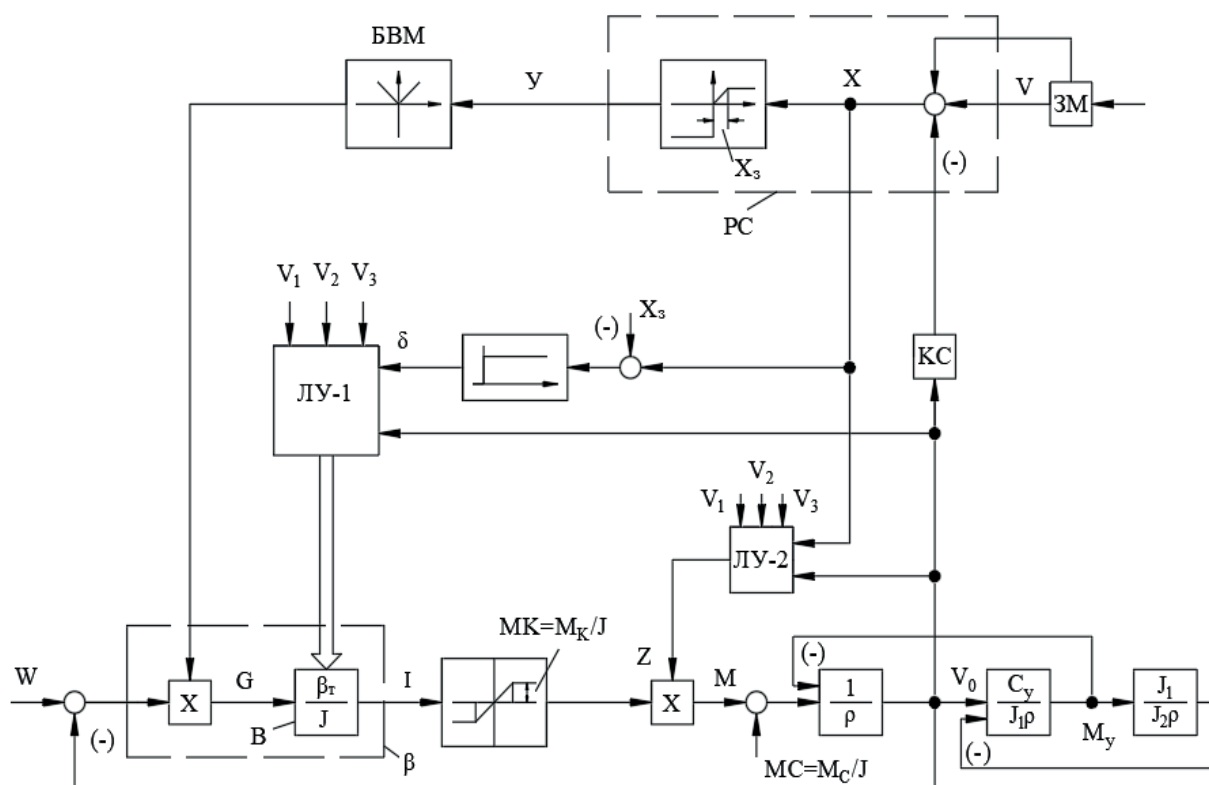


Рисунок 2. Структурная схема модели системы управления асинхронным электропривод с упругим звеном

Figure 2. Block diagram of a control system model for an asynchronous electric drive with an elastic link

спечении плавного и контролируемого перехода от двигательного режима работы электропривода к тормозному режиму и обратно посредством изменения значений управляющих сигналов W , Z и Y . В двигательном режиме W пропорционально синхронной скорости двигателя, $Z = 1$, $Y = 0 \dots 1$. При динамическом торможении $W = 0$, $Z = 0 \dots 1$, $Y = 1$ (тиристоры ТРТ в тормозном режиме полностью открыты). Приведенная структурная схема модели системы управления соответствует асинхронному электроприводу с одним упругим звеном с коэффициентом жесткости C_y .

Выбор режима функционирования привода, то есть двигательного или тормозного, определяется знаком и величиной ошибки x , которая представляет собой разность между сигналом заданной скорости V и сигналом действитель-

ной скорости $K_c V_0$. Сигнал заданной скорости V прием изменяющимся по сложному закону с участком движения на пониженной скорости в начале цикла (V_n) и перед остановкой (V_k). Соответствующие отрезки пути обозначены S_n и S_k (рисунок 3, а).

Для обеспечения плавного и стабильного процесса разгона и торможения электропривода используется ступенчатое изменение сигнала заданного ускорения a_1 , реализуемое с использованием задающей модели ЗМ2, дополненной специальным логическим устройством. Выбор времени t_1 , равного половине периода собственных колебаний упругой системы привода, способствует минимизации механических колебаний в процессе работы, что обеспечивает более стабильную и точную работу системы электропривода в целом [5].

Чтобы обеспечить работу позиционного привода при любых заданных перемещениях S_T , определим граничные перемещения S_T , которые помогут найти оптимальные скорости $V_T < V_{T.o}$. Рассмотрим площадь S_1 диаграммы $V(t)$ без участков S_H и S_K :

$$S_1 = S_T - S_H - S_K. \quad (1)$$

Если $S_1 < 0$, то в диаграмме $V(t)$ не будет периодов с ускорениями $a_T/2$ и a_T .

При $V_T \neq V_K$ нужно рассмотреть следующие возможные диаграммы для определения граничных перемещений:

1. сигнал V достигает ограничиваемого значения $V_{T.o}$ (рисунок 4, а);
2. $V_T = V_H + 2V_a$ (рисунок 4, б);
3. $V_T = V_K + 2V_a$ (рисунок 4, с),

Изменение сигнала максимальной скорости V_T определим, используя диаграмму, показанную на рисунке 4, а,

в диапазоне $V_H + 2V_a \leq V_T \leq V_{T.o}$, где $V_a = 0,5a_T t_1$.

Из рисунка 4, где показаны граничные диаграммы для случая $V_H > V_K$, первое граничное перемещение:

$$\begin{aligned} S_{\Gamma 1} = & \frac{(V_H + V_a)^2 - V_H^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_{T.o} - V_a)^2 - (V_H + V_a)^2}{2a_T} + \\ & + \frac{V_{T.o}^2 - (V_{T.o} - V_a)^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_{T.o} - V)^2 - (V_K + V_a)^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_K + V_a)^2 - V_K^2}{a_T}, \end{aligned} \quad (1)$$

а после упрощения

$$S_{\Gamma 1} = \frac{2(V_{T.o} + V_a)^2 - (V_H - V_a)^2 - (V_K - V_a)^2}{2a_T}. \quad (2)$$

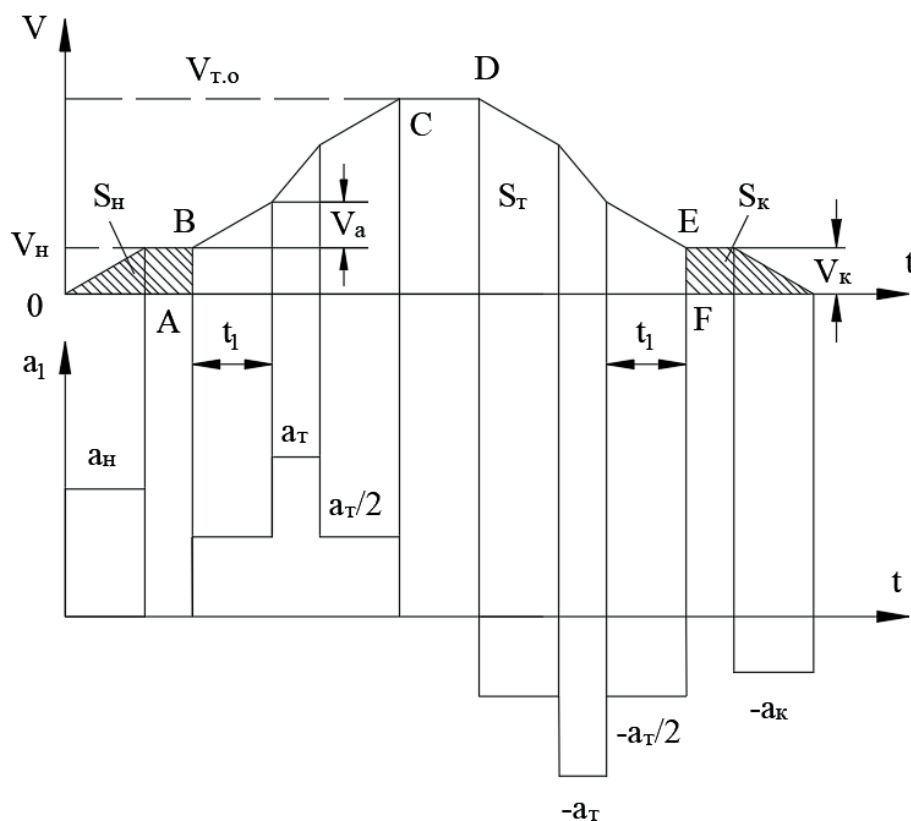
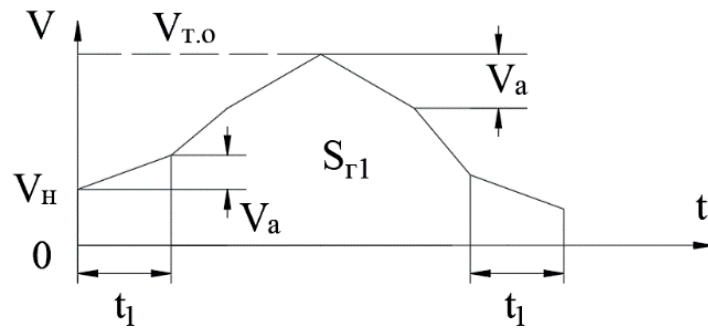
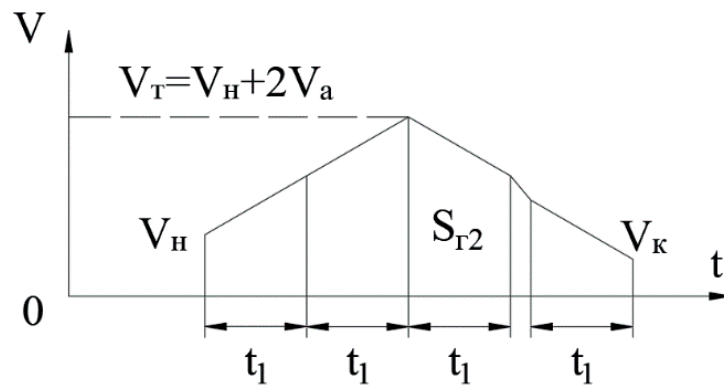


Рисунок 3. Графики зависимости перемещения $S(t)$, скорости $V(t)$ и ускорения $a(t)$

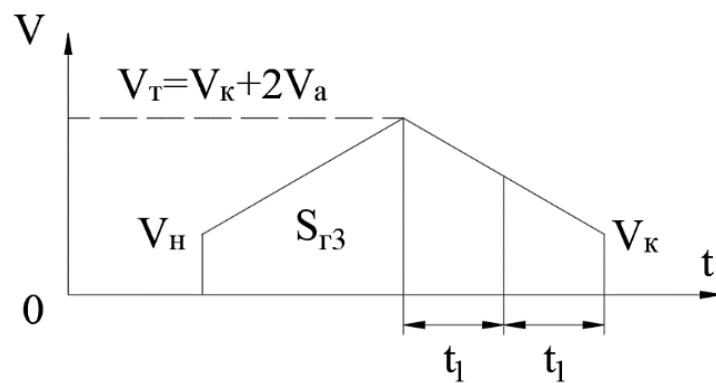
Figure 3. Graphs of displacement dependency $S(t)$, speed $V(t)$ and acceleration $a(t)$



a)



b)



c)

a) сигнал V достигает $V_{T.o}$; b) $V_T = V_H + 2V_a$; c) $V_T = V_K + 2V_a$

a) signal V reaches $V_{T.o}$; b) $V_T = V_H + 2V_a$; c) $V_T = V_K + 2V_a$

Рисунок 4. Диаграмма граничных перемещений

Figure 4. Boundary displacement diagram

Аналогично находим $S_{Г2}$ и $S_{Г3}$:

$$S_{Г2} = \frac{(2V_a + V_H)^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{(2V_a + V_H)^2 - (V_a + V_H)^2}{a_T} +$$

$$+ \frac{(V_a + V_H)^2 - (V_a + V_K)^2}{2a_T} + \frac{(V_a + V_K)^2 - V_K^2}{a_T},$$

$$S_{Г2} = \frac{16V_a(V_a + V_H) + (V_H - V_a)^2 - (V_K - V_a)^2}{2a_T}, \quad (3)$$

$$S_{Г2} = \frac{(2V_a + V_K)^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{(2V_a + V_K)^2 - V_K^2}{a_T} =$$

$$= \frac{2(2V_a + V_K)^2 - V_H^2 - V_K^2}{a_T}. \quad (4)$$

В случае $V_H = V_K = 0$ получим $S_{Г1} = \frac{V_{T,0}(V_{T,0} + 2V_a)}{a_T}$, $S_{Г2} = S_{Г3} = \frac{8V_a^2}{a_T}$.

Величина V_T определяется из выражения (2) подстановкой $V_{T,0} = V_T$ и $S_{Г1} = S_1$, т.е. в результате решения:

$$V_T^2 + 2V_TV_a - 0,5(V_H^2 - 2V_HV_a) -$$

$$- 0,5(V_K^2 - 2V_KV_a) - a_TS_1 = 0,$$

откуда

$$V_T = \sqrt{V_a^2 + a_TS_1 + 0,5(V_H^2 + V_K^2) - V_a(V_H + V_K) - V_a}. \quad (5)$$

По диаграмме на рисунке 4, *b* находим V_T в области $V_H + 2V_a > V_T > V_K + 2V_a$, для чего обозначим сигнал максимальной скорости $V_{T,0}$ через V_T , примем $S_{Г2} = S_1$ и запишем равенство

$$S_1 = \frac{V_T^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{V_T^2 - (V_T - V_a)^2}{a_T} +$$

$$+ \frac{(V_T - V_a)^2 - (V_K + V_a)^2}{2a_T} + \frac{(V_K + V_a)^2 - V_K^2}{a_T} =$$

$$= \frac{3V_T^2 + 2V_TV_a - V_K^2 - 2V_H^2 + 2V_KV_a}{2a_T},$$

из которого получим:

$$V_m = \sqrt{\frac{1}{9}V_a^2 + \frac{2a_TS_1 + V_K^2 + 2V_H^2 - 2V_KV_a}{3}} - \frac{1}{3}V_a. \quad (6)$$

Если максимальная скорость находится в пределах $V_H < V_T \leq V_K + 2V_a$, то согласно диаграмме на рисунке 4, *c*:

$$S_1 = \frac{V_T^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{V_T^2 - V_K^2}{a_T},$$

откуда

$$V_m = \sqrt{0,5(a_TS_1 + V_K^2 + V_H^2)}. \quad (7)$$

В случае, когда конечная скорость превышает начальную скорость V_K (условие $V_K > V_H$ выполняется), граничные перемещения S_1 и сигналы максимальной скорости V_T также определяются с использованием формул (2)–(7). Для этого необходимо лишь поменять местами индексы «н» и «к» в символьных обозначениях скоростей V . Полученные в результате аналитические зависимости обеспечивают формирование задающих воздействий S' (перемещение), V (скорость) и a_1 (ускорение) до того момента, когда разница между заданным перемещением S_m и его текущим значением S превышает значение S_K . Если выполняется условие $S_T - S < S_K$, то в начальный период времени сигнал V будет принимать значение V_K , а в конечный период сигнал ошибки ΔS должен поддерживаться близким к нулевому значению в соответствии с уравнением:

$$\Delta S = S_T - S - V^2/(2a_K) \approx 0. \quad (8)$$

Если разность ΔS положительна и разность $V_K - V$ также положительна, то сигнал скорости V должен увеличиваться с ускорением $a_1 = a_K$. В противоположном случае, когда $V_K - V$ отрицательна, скорость V будет уменьшаться с ускорением (или, точнее, замедлением) $a_1 = -a_K$.

В конце рабочего цикла на второй интегратор подается корректирующий сигнал $U_K = \Delta S_1 K_0$ при $\Delta S_1 = S_T - S < 0$.

Выводы

Из результатов моделирования видно, что ступенчатое изменение ускорения приводит к существенному снижению момента, возникающего в упругом звене. При этом время цикла уменьшается незначительно и может оставаться прежним при некотором увеличении максимального значения ускорения [6].

В данной системе полное исключение колебаний не достигнуто по той причине, что происходит при определенных

скоростях ступенчатое изменение коэффициента жесткости предельной механической характеристики. При непрерывном плавном регулировании, которое

имеет место в частотно регулируемых приводах переменного тока, колебательные процессы практически могут быть полностью исключены.

Список источников

1. Гудзь Ю.В., Чермалых А.В. Двухканальная система управления асинхронным электроприводом подъемно-транспортных установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 1. С. 103–107.

2. Чермалых Т.В., Мадхи Халед, Шабо Камил. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью. Киев, 1994. 49 с.

3. Чермалых В.М., Афанасьев Ю.А., Чермалых Т.В. Построение адаптивных систем позиционного управления электроприводами машин и установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1992. № 10. С. 73–77.

4. Глазырин А.С., Полищук В.И., Тимошкин В.В., Баннов Д.М., Исаев Ю.Н., Антяскин Д.И., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Ланграф С.В., Котин Д.А., Ковалев В.З. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 10. С. 213–227. EDN: SOILSV. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404.

5. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов. СПб.: Лань, 2022. 208 с. ISBN 978-5-8114-1468-0.

6. Вульфсон И.И., Шарапин И.А., Преображенская М.В. Расчет колебаний привода машины: учеб. пособие. СПб.: ФГБОУ ВПО «СПГУТД», 2013. 180 с. ISBN 978-5-7937-0817-0.

References

1. Gudz' Yu.V., Chermalykh A.V. Dvukhkanal'naya sistema upravleniya asinkhronnym elektropriivodom pod'emno-transportnykh ustanovok [Two-Channel Control System for Asynchronous Electric Drive of Hoisting and Transport Installations]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal*

– *Proceedings of the Universities. Mining Journal*, 1983, No. 1, pp. 103–107. [in Russian].

2. Chermalykh T.V., Madkhi Khaled, Shabo Kamil. *Sistemy optimal'nogo upravleniya pozitsionnym tiristornym elektropriivodom s mnogokanal'noi zadayushchei model'yu* [Optimal Control Systems of Positional Thyristor Electric Drive with a Multi-Channel Defining Model]. Kiev, 1994. 49 p. [in Russian].

3. Chermalykh V.M., Afanas'ev Yu.A., Chermalykh T.V. Postroenie adaptivnykh sistem pozitsionnogo upravleniya elektropriivodami mashin i ustanovok [Construction of Adaptive Positional Control Systems of Electric Machines and Plants]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal – Proceedings of the Universities. Mining Journal*, 1992, No. 10, pp. 73–77. [in Russian].

4. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Bannov D.M., Isaev Yu.N., Antyaskin D.I., Kladiev S.N., Filipas A.A., Langraf S.V., Kotin D.A., Kovalev V.Z. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v mul'tifaznoi sisteme koordinat pri nesimmetrii rotornykh tsepei [Modeling of Induction Motor in Multiphase Coordinate System for Asymmetry Rotor Cage]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, No. 10, pp. 213–227. EDN: SOILSV. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404. [in Russian].

5. Nikitenko G.V. *Elektropriivod proizvodstvennykh mekhanizmov* [Electric Drive of Production Mechanisms]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 208 p. ISBN 978-5-8114-1468-0. [in Russian].

6. Vul'fson I.I., Sharapin I.A., Preobrazhenskaya M.V. *Raschet kolebanii privoda mashiny: ucheb. posobie* [Calculation of Machine Drive Oscillations: Training Manual]. Saint-Petersburg, FGBOU VPO «SPGUTD», 2013. 180 p. ISBN 978-5-7937-0817-0. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; одобрена после рецензирования 09.10.2024; принята к публикации 24.10.2024.

The article was submitted 02.10.2024; approved after reviewing 09.10.2024; accepted for publication 24.10.2024.