

УДК 531.43

DOI: 10.18799/29495407/2024/4/73

Шифр специальности ВАК: 2.3.1

Компенсация влияния сухого трения на точность и устойчивость электромеханических систем с трособлочными передачами

С.А. Гайворонский✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉saga@tpu.ru

Аннотация. Рассматриваются электромеханические системы с трособлочными передачами, блоки в которых имеют малую массу и считаются безынерционными. У таких передач, как правило, один блок связан с электроприводом и служит приводным блоком для передачи усилий, а остальные подвижные и неподвижные передающие блоки являются пассивными. При этом во всех блоках действуют моменты сухого трения с заранее неизвестными значениями. Проводится анализ влияния сухого трения в блоках обоих типов на точность и устойчивость электромеханических систем. В результате математического описания с учетом принятых допущений установлено, что действие сухого трения в приводном блоке эквивалентно действию релейного β -звена с опережающей гистерезисной характеристикой. Влияние сухого трения в пассивных безынерционных блоках соответствует влиянию люфтов с отстающими гистерезисными характеристиками. Делается вывод об отрицательном влиянии сухого трения в блоках обоих типов на точность работы электромеханических систем и ухудшении их устойчивости в результате действия сухого трения в пассивных блоках. Разработаны алгоритмы управления, позволяющие уменьшить установленное отрицательное влияние сухого трения на динамику электромеханических систем. Первый адаптивный алгоритм способен ускорить начало движения электромеханической системы из состояния покоя с неопределенным моментом сухого трения, а также при смене направления вращения блоков за счет быстрого преодоления суммарного момента сухого трения. Второй робастный алгоритм реализует псевдолинейный закон коррекции фазочастотной характеристики системы и создает в ней постоянное частотно-независимое фазовое опережение требуемой величины.

Ключевые слова: сухое трение, трособлочная система, приводной блок, пассивный блок, звено «люфт», адаптивный компенсатор сухого трения, робастное фазоопережающее псевдолинейное устройство

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-0737, <https://rscf.ru/project/23-29-0737>

Для цитирования: Гайворонский С.А. Компенсация влияния сухого трения на точность и устойчивость электромеханических систем с трособлочными передачами // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 4. – С. 13–20. DOI: 10.18799/29495407/2024/4/73

UDC 531.43

DOI: 10.18799/29495407/2024/4/73

Compensation of dry friction impact on the accuracy and stability of electromechanical systems with cable-block transmissions

S.A. Gayvoronskiy✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉saga@tpu.ru

Abstract. The paper considers the electromechanical systems with cable-block transmissions. Their blocks have a small mass and are inertialess. In such transmissions, as a rule, one block is connected to the electric drive and serves as a drive block for transmitting forces, and the remaining movable and stationary transmitting blocks are passive. In this case, dry friction

moments with previously unknown values act in all blocks. The author has carried out the analysis of the effect of dry friction in blocks of both types on the accuracy and stability of electromechanical systems. As a result of the mathematical description, taking into account the accepted assumptions, it is established that the effect of dry friction in the drive block is equivalent to the action of a relay β -link with a leading hysteresis characteristic. The effect of dry friction in passive inertialess blocks corresponds to the effect of backlashes with lagging hysteresis characteristics. A conclusion is made about the negative effect of dry friction in blocks of both types on the accuracy of electromechanical systems and the deterioration of their stability as a result of dry friction in passive blocks. The author developed the control algorithms that reduce the established negative effect of dry friction on the dynamics of electromechanical systems. The first adaptive algorithm is capable of accelerating the start of electromechanical system motion from a state of rest with an uncertain moment of dry friction, as well as when changing the direction of rotation of the blocks due to the rapid overcoming of the total moment of dry friction. The second robust algorithm implements a pseudo-linear law of correction of the phase-frequency characteristic of the system and creates a constant frequency-independent phase advance of the required value in it.

Keywords: dry friction, cable-block system, drive block, passive block, "backlash" link, adaptive dry friction compensator, robust phase-advancing pseudo-linear device

Acknowledgments: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 23-29-0737, <https://rscf.ru/project/23-29-0737>

For citation: Gayvoronskiy S.A. Compensation of dry friction impact on the accuracy and stability of electromechanical systems with cable-block transmissions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 13–20. DOI: 10.18799/29495407/2024/4/73

Постановка задачи

Многие промышленные системы автоматического управления являются электромеханическими системами (ЭМС), усилия в которых передаются через трособлочные системы (ТБС). Примерами таких ЭМС служат грузоподъемные системы, сбалансированные манипуляторы, различные испытательные стенды обезвешивания конструкций космических аппаратов [1–3].

В общем случае ТБС представляет собой набор вращающихся блоков, связанных тросом. Так как любой трос является упругим элементом, блоки ТБС делят этот трос на отдельные упругие участки. Они характеризуются коэффициентами жесткости и потерь упругости, значения которых зависят от длины участков троса. В связи с тем, что ТБС могут быть нагружены значительными массами, в блоках возможно наличие больших моментов сухого трения.

Как правило, один из блоков ТБС связан с электроприводом, предназначенным для выполнения ЭМС своего функционального назначения. Такой блок будем называть приводным. Остальные блоки ТБС (как подвижные, так и неподвижные) только передают усилия от приводного блока через трос и поэтому являются пассивными.

При проектировании ЭМС и разработке для них регуляторов необходимо учитывать влияние сухого трения в блоках ТБС на динамику системы управления. Особое внимание при этом следует уделить тому факту, что все блоки ТБС являются практически безынерционными, так как имеют пренебрежимо малую массу по сравнению с массой грузов, перемещаемых ЭМС.

Задача данной работы заключается в анализе влияния сухого трения в приводном и пассивных

блоках ТБС на точность и устойчивость ЭМС и на основе его результатов синтезе алгоритмов управления, компенсирующих отрицательное влияние сухого трения.

Моделирование сухого трения в блоках ТБС

Рассмотрим ТБС на рис. 1. Здесь блок 1 является приводным, а блок 2 – пассивным с подвешенным на нем грузом M_2 массой m . Второй груз M_1 служит противовесом и тоже имеет массу m , уравновешивая ТБС. На рис. 1 также обозначены силы натяжения F_1 , F_2 и F_3 соответствующих участков троса, разделенных блоками. Полагая, что длины второго и третьего участков равны, на основании положений [4] запишем уравнения движения блоков (1) и (2).

$$J_1 s \omega_1 = (F_1 - F_2)r + M_{\text{пр}} - M_{\text{пр}} \text{sign}(\omega_1); \quad (1)$$

$$J_2 s \omega_2 = (F_2 - F_3)r - M_{\text{пр}} \text{sign}(\omega_2), \quad (2)$$

где

$$F_1 = \left(\frac{c_1}{s} + \chi_1 \right) (V_{M_1} - \omega_1 r);$$

$$F_2 = \left(\frac{c_2}{s} + \chi_2 \right) (V_{M_2} + \omega_1 r + \omega_2 r);$$

$$F_3 = \left(\frac{c_2}{s} + \chi_2 \right) (V_{M_2} + \omega_2 r).$$

В приведенных уравнениях приняты следующие обозначения: J_1 – момент инерции электропривода, куда входит момент инерции первого блока, J_2 – момент инерции второго блока, ω_1 и ω_2 – угловые скорости вращения соответственно первого и второго блоков, r – радиус блоков, $M_{\text{пр}}$ – момент

электропривода, $M_{тр}$ – момент сухого трения в блоке, c_1 и χ_1 – соответственно коэффициенты жесткости и потерь упругости участка троса между массой M_1 и первым блоком, c_2 и χ_2 – аналогичные коэффициенты двух остальных участков троса.

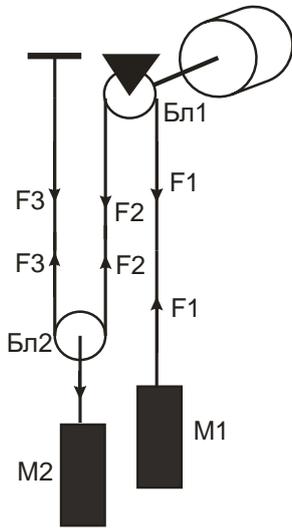


Рис. 1. Трособлочная система
 Fig. 1. Cable block system

Из уравнения (1) получим уравнение скорости вращения приводного блока 1

$$\omega_1 = \frac{1}{J_1 s} (F_1 - F_2) r + M_{пр} - M_{тр} \text{sign}(\omega_1). \quad (3)$$

По уравнению (3) на рис. 2, а построена структурная схема – модель скорости вращения приводного блока. После преобразования она имеет вид, показанный на рис. 2, б.

Выделенная пунктиром часть схемы на рис. 2, б представляет собой нелинейное звено с опережающим гистерезисом (рис. 3). Такое фазоопережающее звено с зоной нечувствительности называют релейным β -звеном [5].

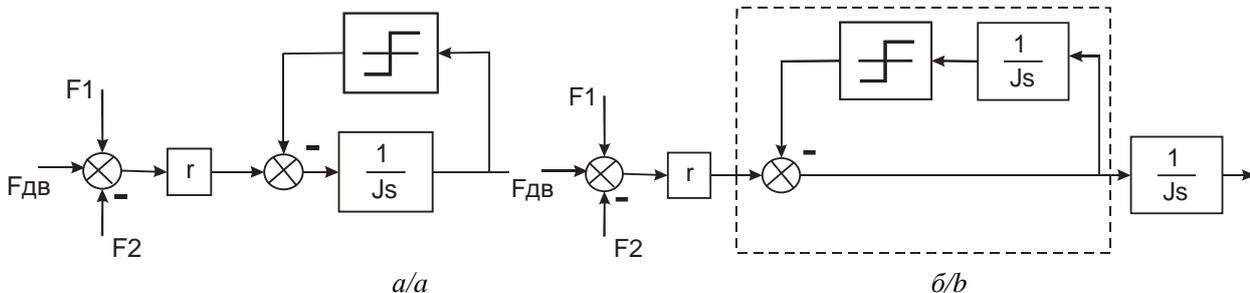


Рис. 2. а) модель скорости вращения приводного блока с учетом сухого трения; б) преобразованная модель
 Fig. 2. а) model of the drive unit rotation speed taking into account dry friction; б) transformed model

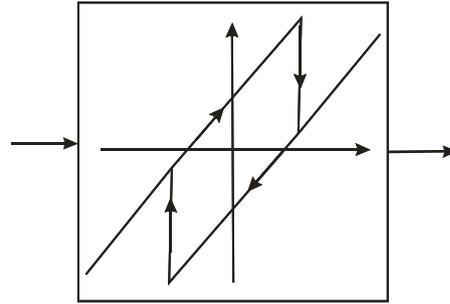


Рис. 3. Характеристика β -звена
 Fig. 3. Characteristics of the β -link

Вернемся к уравнению (2), описывающему динамике пассивного блока. Если радиус блоков, используемых в ТБС, составляет несколько сантиметров, то их масса достаточно мала. На этом основании примем момент инерции блока $J_2=0$. Допустим также, что $\chi_1=\chi_2=0$. С учетом этих допущений преобразуем уравнение (2) к виду

$$\omega_2 = \frac{s}{2c_2 r^2} \left(\frac{c_2 r^2}{s} \omega_1 - M_{тр} \text{sign}(\omega_2) \right). \quad (4)$$

По уравнению (4) построена структурная схема, показанная на рис. 4, а. Дифференцирующее звено в этой схеме имеет передаточную функцию, в знаменатель которой входит сумма коэффициентов жесткости двух равных участков троса, с которыми взаимодействует пассивный блок 2. В нашем случае эти коэффициенты равны c_2 . После преобразования структуры на рис. 4, а получена схема, изображенная на рис. 4, б.

Выделенная пунктиром часть схемы на рис. 4, б имеет характеристику звена «люфт» с отстающим гистерезисом, представленную на рис. 5. Заметим, что ширина «люфта» определяется моментом сухого трения в блоке.

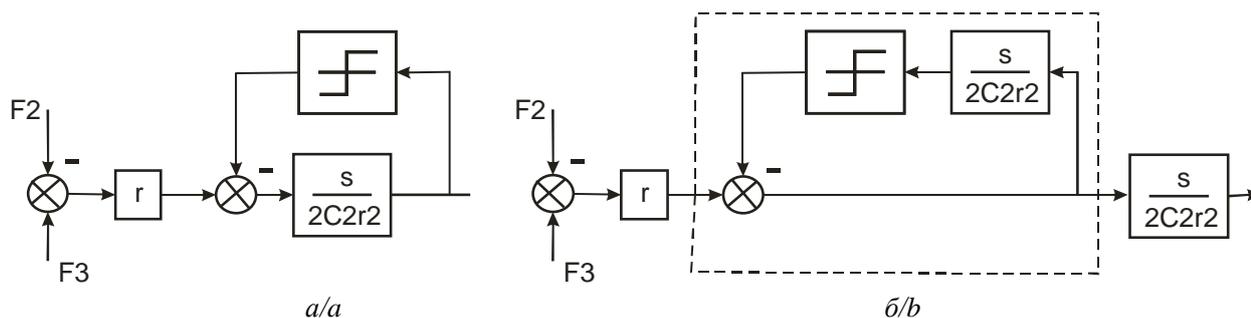


Рис. 4. а) модель скорости вращения пассивного блока с учетом сухого трения; б) преобразованная модель
 Fig. 4. а) model of the passive block rotation speed taking into account dry friction; б) transformed model

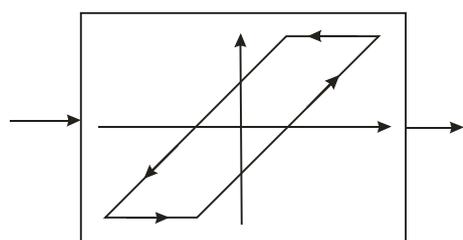


Рис. 5. Характеристика типа «люфт»
 Fig. 5. Characteristic of the "backlash" type

На основании проведенного моделирования сухого трения в блоках двух типов можно сделать следующие выводы.

1. Сухое трение в любых блоках отрицательно влияет на быстродействие системы управления, так как и β -звено, и «люфт» имеют зоны нечувствительности.
2. Сухое трение в приводном блоке благоприятно влияет на устойчивость системы управления, так как моделирующее его β -звено имеет фазопережающую характеристику.
3. Сухое трение в пассивных блоках отрицательно влияет на устойчивость ЭМС, поскольку моделирующее его звено «люфт» имеет фазоотстающую характеристику.
4. Для уменьшения влияния сухого трения в блоках на быстродействие ЭМС необходимо применять специальные компенсаторы, создающие напряжение для ускоренного сдергивания системы с сухого трения и поддержания ее движения.
5. Для уменьшения влияния сухого трения в пассивных блоках на качество работы системы необходимы фазопережающие корректирующие устройства.

Компенсация влияния сухого трения в ТБС на быстродействие ЭМС

Очевидно, что при поступлении на электропривод ЭМС управляющего сигнала движение всей упругомассовой ТБС (ее трогание) начнется только после преодоления электроприводом моментов сухого трения во всех блоках. Как правило, в ЭМС

применяются промышленные астатические регуляторы (ПИ- и ПИД-регуляторы), содержащие интегрирующие звенья. Они в известной степени позволяют устранить статическую ошибку от сухого трения в установившемся режиме. Однако при этом остается нерешенной задача компенсации влияния сухого трения в начальный период движения системы (повышение быстродействия за счет ускоренного трогания).

Известные способы компенсации сухого трения [6–8] разработаны в основном для жестких систем, где сухое трение покоя больше трения движения и может быть приведено к одному месту – валу двигателя. Такие способы при известных заранее величинах сухого трения предусматривают, например, использование корректирующих разрывных связей [9], включение в систему звена с переменным коэффициентом усиления или применение вибрационной линеаризации [7, 8]. Если же величина сухого трения неизвестна, используют способ динамической компенсации [6, 10] или схемы адаптации [11–14], требующие применения наблюдающих устройств или моделей объекта регулирования без трения.

Указанные способы неприемлемы в нашем случае из-за наличия упругих связей между блоками ТБС, к которым приложено сухое трение заранее неизвестной величины. Ограничивает применение известных способов компенсации сухого трения также незначительное отличие величины трения движения от величины трения покоя, что может приводить к остановке системы после ее сдергивания с сухого трения покоя.

Для устранения указанных недостатков предлагается схема компенсатора сухого трения, приведенная на рис. 6.

В ней используется ПИ-регулятор основного контура управления ЭМС с интегральным коэффициентом, принимающим одно из двух значений: повышенное $k_{И}=k_1 \cdot k_3$ (для ускоренного сдергивания ТБС с сухого трения) и расчетное $k_{И}=k_1$ (полученное при синтезе основного контура управления).

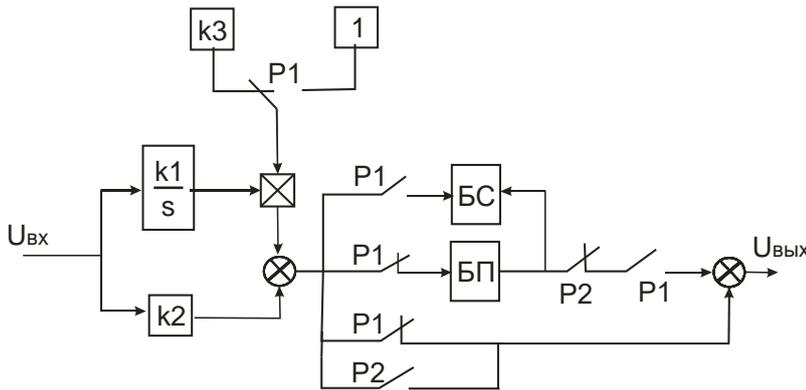


Рис. 6. Схема компенсатора сухого трения
 Fig. 6. Dry friction compensator diagram

Предлагаемый компенсатор содержит блок памяти (БП), который фиксирует напряжение трогания ТБС при $k_{И}=k_1 \cdot k_3$ и обеспечивает этим напряжением движение системы до момента времени, когда выходное напряжение ПИ-регулятора с расчетным параметром $k_{И}=k$ не превысит в блоке сравнения (БС) выходного напряжения БП. После этого работа системы управления полностью определяется ПИ-регулятором с $k_{И}=k$.

Таким образом, в компенсаторе сухого трения происходит два переключения. Первое переключение выполняет реле P_1 в момент $t=t_1$ трогания ТБС в результате ускоренного интегрирования в ПИ-регуляторе с коэффициентом интегрирования $k_1 \cdot k_3$. Этот момент наступает при появлении сигналов с тахогенераторов, установленных на двух крайних блоках ТБС. Второе переключение осуществляет реле P_2 в момент $t=t_2$ достижения выходного сигнала ПИ-регулятора с коэффициентом интегрирования k_1 заданного напряжения трогания U_{TR} . Зависимость выходного напряжения ПИ-регулятора $U_{вых}$ от времени t представлена на рис. 7.

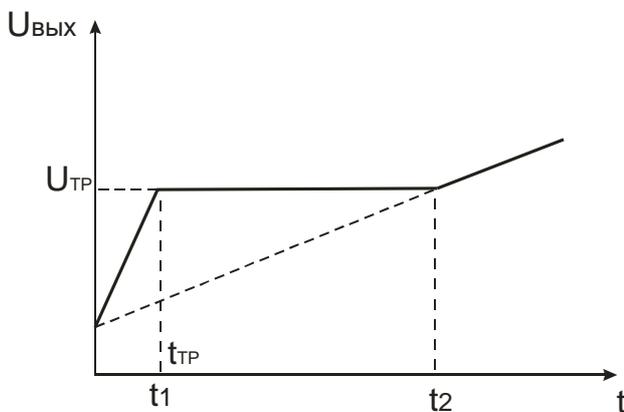


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения ПИ-регулятора от времени
 Fig. 7. Time dependence of the output voltage of the PI controller

При использовании разработанного компенсатора сухого трения необходимо иметь в виду, что чрезмерное увеличение интегральной составляющей ПИ-регулятора для быстрого сдергивания ТБС может нарушить условие устойчивости замкнутой системы управления на начальном этапе ее движения. Поэтому следует контактами реле P_2 включать отрицательную обратную связь в системе в момент времени $t = t_2$.

Компенсация влияния сухого трения ТБС на устойчивость ЭМС

Как уже было отмечено в выводах о влиянии сухого трения в пассивных блоках на динамику ЭМС, для компенсации вносимого сухим трением фазового запаздывания и обеспечения устойчивости в систему необходимо вводить фазопережающие корректирующие устройства. При выборе вида такого устройства следует заметить, что рассматриваемая ЭМС является нестационарной упругомассовой системой. Объясняется это наличием в ЭМС масс, связанных между собой упругими участками троса. Длины этих участков изменяются в процессе движения ТБС, и поэтому фазовая характеристика ЭМС является частотнонестабильной и ее коррекция представляет собой достаточно сложную задачу.

Для ее решения предлагается использовать псевдолинейные корректирующие устройства [15], амплитудные и фазовые частотные характеристики которых не зависят от амплитуды входного сигнала и могут формироваться независимо друг от друга. С целью компенсации вносимого безынерционными блоками ТБС фазового запаздывания с изменяющимся частотным диапазоном предлагается в ЭМС использовать псевдолинейные корректирующие устройства с частотнонезависимым фазовым опережением. Таким свойством обладает разработанное в [16] устройство, схема которого приведена на рис. 8, а.

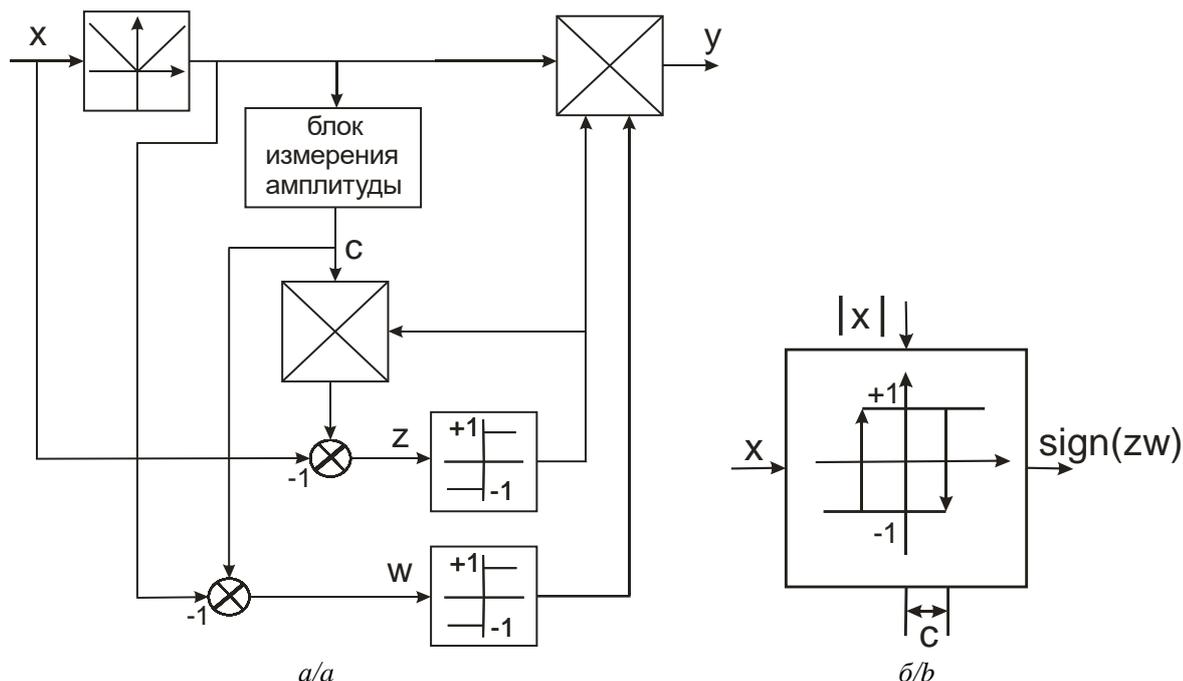


Рис. 8. Фазопережающее устройство: а) структура; б) нелинейная характеристика
Fig. 8. Phase-advancing device: a) structure; b) nonlinear characteristic

Данное устройство описывается уравнением $y=|x|\text{sign}(z)\text{sign}(w)$ и поэтому относится к нелинейным корректирующим устройствам переключающего типа. Оно способно создавать фазовое опережение без изменения амплитуды сигнала. Угол опережения определяется углом переключения входного гармонического сигнала, определяемого формулой $\psi(k)=\arcsin k$, где $0 \leq \psi(k) \leq \pi/2$, k – коэффициент передачи блока измерения амплитуды входного сигнала.

Из выражения угла переключения видно, что создаваемое устройством фазовое опережение не зависит от частоты входного сигнала. Псевдолинейное корректирующее устройство на рис. 8, а имеет эквивалентную нелинейную характеристику, изображенную на рис. 8, б. Она представляет собой двухпозиционное реле с опережающим гистерезисом. Угол фазового опережения устройства определяется величиной сигнала c на выходе блока измерения амплитуды и зависит от коэффициента k .

Заключение

Проведенный анализ влияния сухого трения в блоках ТБС на динамику упругомассовой ЭМС показал, что оно определяется массой вращающихся блоков. Отрицательное влияние на точность ЭМС на начальном этапе движения оказывает суммарный момент сухого трения во всех блоках ЭМС. Отрицательное влияние на устойчивость ЭМС вызвано проявлением у безынерционных блоков свойств

нелинейных звеньев типа «люфт», вносящих в систему управления фазовое запаздывание.

Для устранения указанных негативных проявлений сухого трения блоков разработаны соответствующие устройства. Так, с целью повышения быстродействия ЭМС в начале ее движения предложена структура компенсатора сухого трения на основе двухрежимного ПИ-регулятора и блока памяти. Настраиваемым параметром такого компенсатора является повышенное значение интегрального коэффициента ПИ-регулятора, позволяющее ускоренно сдёрнуть ТБС с сухого трения.

Скомпенсировать вносимое сухим трением фазовое отставание предлагается псевдолинейным корректирующим устройством переключающего типа. Оно создает частотнезависимое постоянное фазовое опережение от 0 до 90 градусов без изменения коэффициента усиления. Данное устройство содержит блок измерения амплитуды входного сигнала с коэффициентом передачи, определяющим момент переключения гармонического сигнала и, следовательно, величину фазового опережения.

Эффективность предложенных устройств зависит от точности поддержания напряжения трогания в блоке памяти компенсатора сухого трения и от точности измерения амплитуды входного гармонического сигнала псевдолинейного фазопережающего устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухенко Н.А., Кравченко О.А. Пути и способы оптимизации структуры и параметров электромеханических систем компенсации силы тяжести // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 5. – С. 30–36.
2. Сухенко Н.А., Пятibrатов Г.Я. Совершенствование систем управления сбалансированных манипуляторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 77–81.
3. Пятibrатов Г.Я., Сухенко Н.А. Применение электропривода переменного тока при создании систем сбалансированных манипуляторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 37–39.
4. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2-х т. Т. I: Статика и динамика. – М.: Наука, 1979. – 272 с.
5. Черников С.А. Динамика нелинейных гироскопических систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
6. Зельченко В.Я., Шаров С.Н. Расчет и проектирование автоматических систем с нелинейными динамическими звеньями. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 174 с.
7. Хлыпало Е.И., Черников С.А. Нелинейная коррекция систем с сухим трением и люфтом // Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления / под общ. Ред. члена-корреспондента АН СССР Е.П. Попова. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 134–196.
8. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1973. – 344 с.
9. О компенсации влияния трения корректирующими разрывными связями / Н.М. Козлова, П.Б. Кондратьев, А.К. Кулаков, В.Г. Стеблецов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – М.; Будапешт: СЭВ, 1987. – Вып. 17. – С. 91–94.
10. Makker S., Hu G., Dixon W.E. Lyapunov based tracking control in the presence of uncertain nonlinear parameterizable friction // IEEE Transaction on Automatic Control. – 2007. – Vol. 52. – P. 1988–1994.
11. Черноруцкий Г.С., Жабреев В.С., Подлинева Т.К. Компенсация сухого трения в автоматических системах // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1976. – № 6. – С. 187–192.
12. De Wit C.C., Braun K., Åström K.J. Adaptive friction compensation in DC-motor drives // IEEE Trans. Robotics and Automation. – 1987. – RA-3. – P. 681–685. URL: <https://typeset.io/pdf/adaptive-friction-compensation-in-dc-motor-drives-552y7uqdiv.pdf> (дата обращения: 17.08.2024).
13. Wen Fang Xie. Sliding mode observer based adaptive control for servo actuator with friction // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – № 3. – P. 1517–1527.
14. Maolin Jin, Hoong Kang Sang, Hun Chang Pyung. Robust compliant motion control of robot with nonlinear friction using time-delay estimation // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – № 1. – pp. 258–269. DOI: 10.1109/TIE.2007.906132
15. Федоров С.М., Быков В.П. Псевдолинейные корректирующие устройства // Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления / под общ. Ред. члена-корреспондента АН СССР Е.П. Попова. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 197–218.
16. Авторское свидетельство № 1193632 СССР, МПК4 G05B5/01. Псевдолинейное корректирующее устройство. 3737182; заявл. 04.05.1984; опубл. 23.11.1985, Бюл. № 43. – 4 с.

Информация об авторах

Сергей Анатольевич Гайворонский, кандидат технических наук, доцент, отделение автоматизации и робототехники, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; saga@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7156-2807>

Поступила в редакцию: 20.10.2024

Поступила после рецензирования: 10.12.2024

Принята к публикации: 28.12.2024

REFERENCES

1. Sukhenko N.A., Kravchenko O.A. Ways and means of optimizing the structure and parameters of electromechanical gravity compensation systems. *Bulletin of universities. Electromechanics*, 2003, no. 5, pp. 30–36. (In Russ.)
2. Sukhenko N.A., Pyatibratov G.Ya. Improving the control systems of balanced manipulators. *Bulletin of universities. Electromechanics*, 2010, no. 5, pp. 77–81. (In Russ.)
3. Pyatibratov G.Ya., Sukhenko N.A. Application of an AC electric drive in creating balanced manipulator systems. *Bulletin of universities. Electromechanics*, 2011, no. 1, pp. 37–39. (In Russ.)
4. Butenin N.V., Lunts Ya.L., Merkin D.R. *Course of theoretical mechanics. In 2 vol. Vol. I: Statics and dynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 272 p. (In Russ.)
5. Chernikov S.A. *Dynamics of nonlinear gyroscopic systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 224 p. (In Russ.)
6. Zelchenko V.Ya., Sharov S.N. *Calculation and design of automatic systems with nonlinear dynamic links*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch, 1986. 174 p. (In Russ.)
7. Khlypalo E.I., Chernikov S.A. Nonlinear correction of systems with dry friction and backlash. *Nonlinear correcting devices in automatic control systems*. Ed. by E.P. Popov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. pp. 134–196. (In Russ.)
8. Khlypalo E.I. *Nonlinear correcting devices in automatic systems*. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch, 1973. 344 p. (In Russ.)

9. Kozlova N.M., Kondratyev P.B., Kulakov A.K., Stebletsov V.G. On compensation for the influence of friction by correcting discontinuous connections. *Problems of mechanical engineering and automation*. Moscow, Budapest, CMEA Publ., 1987. Iss. 17, pp. 91–94. (In Russ.)
10. Makker C., Hu G., Dixon W.E. Lyapunov based tracking control in the presence of uncertain nonlinear parameterizable friction. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2007, vol. 52, pp. 1988–1994.
11. Chernorutsky G.S., Zhabreev V.S., Podlineva T.K. Compensation of dry friction in automatic systems. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*, 1976, no. 6, pp. 187–192. (In Russ.)
12. De Wit C.C., Braun K., Åström K.J. Adaptive friction compensation in DC-motor drives. *IEEE Trans. Robotics and Automation*. 1987, RA-3, pp. 681–685. Available at: <https://typeset.io/pdf/adaptive-friction-compensation-in-dc-motor-drives-552y7uqdiv.pdf> (accessed: 17 August 2024).
13. Wen Fang Xie. Sliding mode observer based adaptive control for servo actuator with friction. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 1517–1527.
14. Maolin Jin, Hoong Kang Sang, Hun Chang Pyung. Robust compliant motion control of robot with nonlinear friction using time-delay estimation. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 1, pp. 258–269. DOI: 10.1109/TIE.2007.906132
15. Fedorov S.M., Bykov V.P. Pseudolinear correcting devices. *Nonlinear correcting devices in automatic control systems*. Ed. by E.P. Popov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. pp. 197–218. (In Russ.)
16. Vadutov O.S., Gaivoronsky S.A. Pseudolinear correcting device. Author's certificate No. 1193632 USSR, IPC4 G05B5/01. 3737182, 1985. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey A. Gayvoronskiy, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; saga@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7156-2807>

Received: 20.10.2024

Revised: 10.12.2024

Accepted: 28.12.2024