

УДК 621.3.078.4+519.876.5

Выбор среднегеометрического корня системы модального управления электроприводом тележки мостового крана из условия обеспечения демпфирования колебаний груза

В. Н. Павлыш, Д. В. Бажутин

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

dv.bazhutin@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы выбора среднегеометрического корня системы модального управления электроприводом тележки мостового крана, синтезированной для обеспечения эффективного демпфирования колебаний груза. Приведены зависимости максимального ускорения и максимальной скорости от среднегеометрического корня системы для различных значений длины подвеса. Показано, что путем изменения среднегеометрического корня в функции частоты собственных колебаний груза достигается сохранение показателей качества переходных процессов на приемлемом уровне в широком диапазоне изменения длины подвеса.

Введение

Системы модального управления хорошо зарекомендовали себя в области подавления упругих колебаний [1, 2, 3], поскольку методика их синтеза позволяет добиться оптимального переходного процесса с точки зрения требований к режиму работы механических узлов промышленных установок. Качество демпфирования и быстродействие системы зависит от выбора методики распределения полюсов замкнутой системы на комплексной плоскости [4]. Одной из наиболее распространенных методик для решения этой задачи является полиномиальный синтез, который предусматривает принудительное формирование характеристического полинома замкнутой системы в соответствии с некоторым желаемым полиномом, который обеспечивает заранее известные динамические характеристики замкнутой системы [5, 6].

В основе полиномиального синтеза лежат т.н. «стандартные нормированные полиномы», для которых характерно специфическое расположение корней в пределах окружности единичного радиуса [7]. В статье [8] приводится анализ динамики системы модального управления, синтезированной для демпфирования упругих колебаний двухмассовой электромеханической системы при использовании стандартных характеристических полиномов. Особенностью таких полиномов является единичные коэффициенты при старшей и нулевой степени оператора Лапласа:

$$G(p) = p^n + \gamma_{n-1}p^{n-1} + \dots + \gamma_1p + 1. \quad (1)$$

Такой подход позволяет получить универсальные выражения, которые можно использовать для получения желаемого быстродействия путем умножения корней стандартного полинома на желаемую величину среднегеометрического корня (СГК) Ω_0 , в результате чего выражение (1) примет вид:

$$G(p) = p^n + \gamma_{n-1}\Omega_0 p^{n-1} + \dots + \gamma_1\Omega_0^{n-1}p + \Omega_0^n. \quad (2)$$

Величина среднегеометрического корня определяет быстродействие системы в целом, а для системы демпфирования колебаний также и перерегулирование. Поэтому важно оценивать, насколько высоким можно принимать быстродействие системы модального управления с целью недопущения больших значений перерегулирования. В [9] приведен анализ динамики системы модального управления мостовым краном с точки зрения качества демпфирования колебаний груза при различных значениях среднегеометрического корня.

В [10] показано, что величина среднегеометрического корня рассматриваемой системы должно изменяться в функции длины подвеса, и приведено эмпирическое выражение, позволяющее сохранить удовлетворительное качество демпфирования колебаний при изменении длины подвеса в широком диапазоне значений. Однако, более подробный анализ временных диаграмм показывает, что использование этого выражения не исключает ухудшение качества регулирования полностью. Кроме того, рассмотренный подход требует

наличия базового значения SGK, которое было получено эмпирически. Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка методики выбора среднегеометрического корня системы модального управления электроприводом тележки мостового крана, обеспечивающей демпфирование колебаний груза, из условий соблюдения требований к системе электропривода и сохранения формы переходных процессов при изменении длины подвеса.

Целью работы является исследование зависимости максимальных значений скорости тележки и ее линейного ускорения от величины среднегеометрического корня при различных значениях длины подвеса и разработка рекомендаций по выбору этого значения.

Модель исследуемой системы

Структурная схема исследуемой системы модального управления электроприводом перемещения грузоподъемной тележки мостового крана приведена на рис.1. Динамика объекта регулирования в данной системе представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, рассмотренных в [6].

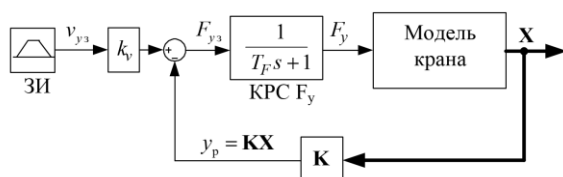


Рисунок 1 – Структурная схема системы модального управления

Дополнительно в системе модального управления учтен контур регулирования тягового усилия электропривода в виде апериодического звена с постоянной времени $T_F = 0.002$ с. Коэффициент k_v вводится для компенсации коэффициента усиления замкнутой системы модального управления. Также на рисунке обозначены: СИ – задатчик интенсивности, КРС F_y – замкнутый оптимизированный контур регулирования тягового усилия электропривода, v_{y3} – задание на скорость, F_{y3} и F_y – соответственно, заданное и истинные значения тягового усилия, X – вектор состояния системы, y_p – задающее воздействие, K – коэффициенты модального регулятора, полученные по методике [6] и вычисляемые по формуле (3):

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0^3 ML}{g} \\ g(M + m) - \Omega_0^2 \gamma_1 LM \\ -M\Omega_0 L(\gamma_2 g - \Omega_0^2 L) \\ g \end{bmatrix}^T. \quad (3)$$

Все исследования будем проводить при следующих значениях параметров модели: масса тележки $M=2000$ кг, масса груза $m=4000$ кг, длина подвеса $L=12$ м, SGK $\Omega_0=1,9$ рад/с. В качестве желаемого характеристического полинома примем полином Бесселя, поскольку он обеспечивает достаточно низкое перерегулирование при достаточно высоком быстродействии. Параметры задатчика интенсивности выбраны исходя из обеспечения разгона до заданной скорости 0.4 м/с с ускорением $0,5$ м/с².

Анализ формы переходных характеристик

При синтезе системы управления электроприводом тележки мостового крана из условия обеспечения демпфирования колебаний груза необходимо обращать внимание на два численных показателя переходных процессов.

Во-первых, пиковое значение ускорения не должно превышать допустимого по технологическим требованиям значения для исключения возникновения режима пробуксовки.

Во-вторых, чем выше максимальное значение скорости на начальном этапе разгона, тем выше быстродействие системы, однако тем менее благоприятным для электропривода будет такой режим работы. С одной стороны, если скорость превысит номинальное значение, привод будет работать либо в режиме ослабления поля, либо с повышенным напряжением. В первом случае будет иметь место ухудшение динамических показателей, а во втором – перегрев и снижение КПД привода. С другой стороны, в этом случае на этапе разгона может присутствовать участок с изменением направления вращения, что отрицательно сказывается на механике привода, в особенности на редукторах и соединительных муфтах.

Проведем анализ формы графиков скорости и ускорения с учетом работы задатчика интенсивности, которые приведены на рис. 2.

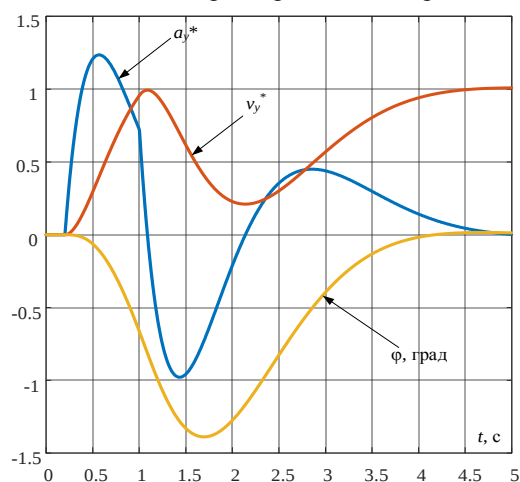


Рисунок 2 – Графики переходных процессов в исследуемой системе

Для наглядности графики скорости и ускорения приведены в относительных единицах. В качестве базовых значений приняты заданное значение ускорения в задатчике интенсивности и заданное значение скорости. Поскольку на практике стремятся достичь максимальной производительности механизмов, заданное значение ускорения будем считать максимальным. Также примем допущение, что заданное значение скорости соответствует номинальной частоте вращения вала двигателя.

На полученных графиках скорость достигает заданного значения, но не превышает его, но пиковое значение ускорения на 23% выше максимального значения. Это свидетельствует о том, что величина СГК выбрана некорректно.

Дополнительно проведем анализ формы переходной функции исследуемой системы, полученной при подаче на ее вход скачкообразного задания на скорость. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

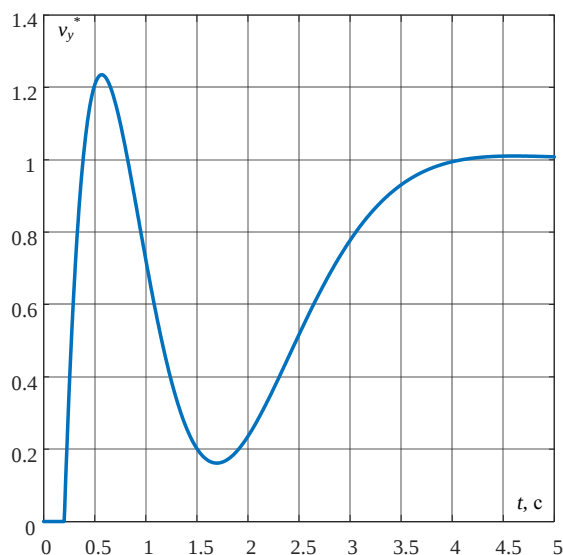


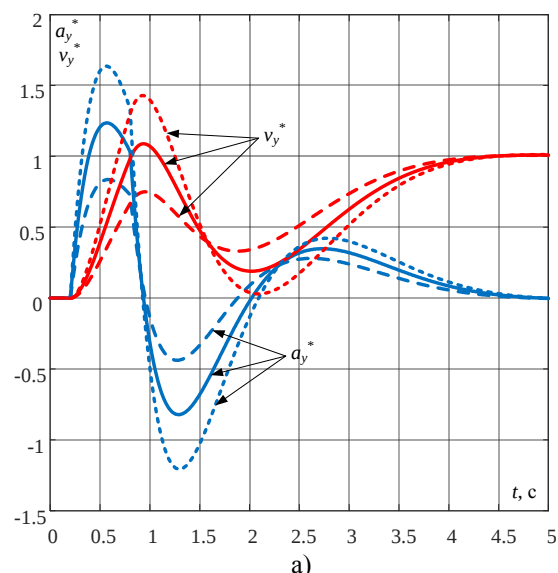
Рисунок 3 – График переходной функции системы

Из приведенных графиков очевидно, что при линейном характере изменения задания на скорость переходный процесс по ускорению приобретает форму переходного процесса по скорости при скачкообразном изменении задания. Исходя из этого можно сделать вывод, что максимальное значение ускорения в рабочем режиме привода можно оценить по максимальному значению скорости на переходной функции.

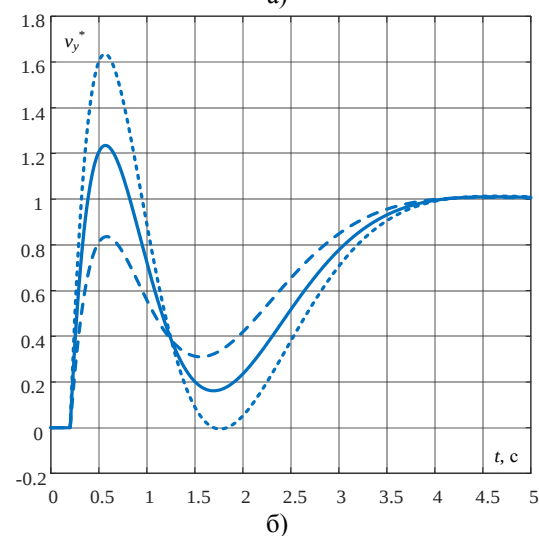
С учетом того, что величина СГК зависит от частоты собственных колебаний груза, необходимо сравнить максимальные значения скорости и ускорения для фиксированного значения СГК и нескольких длинах подвеса. Результаты такого исследования приведены на рисунке 4.

Из графиков видно, что длительность переходных процессов в трех рассмотренных

случаях изменяется незначительно, что определяется постоянным значением среднегеометрического корня. При увеличении длины подвеса максимальное значение скорости также растет и наоборот. Следовательно, при изменении длины подвеса необходимо также изменять быстродействие системы путем изменения СГК из условия обеспечения выполнения технологических требований относительно значений скорости и ускорения.



а)



б)

Рисунок 4 – Переходные процессы при линейном (а) и скачкообразном (б) изменении задания на скорость при длине подвеса 16 м (пунктир), 12 м (сплошная линия), 8 м (штриховая линия)

Анализ влияния величины СГК на показатели качества переходных процессов

Проведем исследование зависимости максимальных значений ускорения $a_{y\max}$ и скорости $v_{y\max}$ от величины СГК. Результаты моделирования при различных значениях длины подвеса приведены на рис. 5.

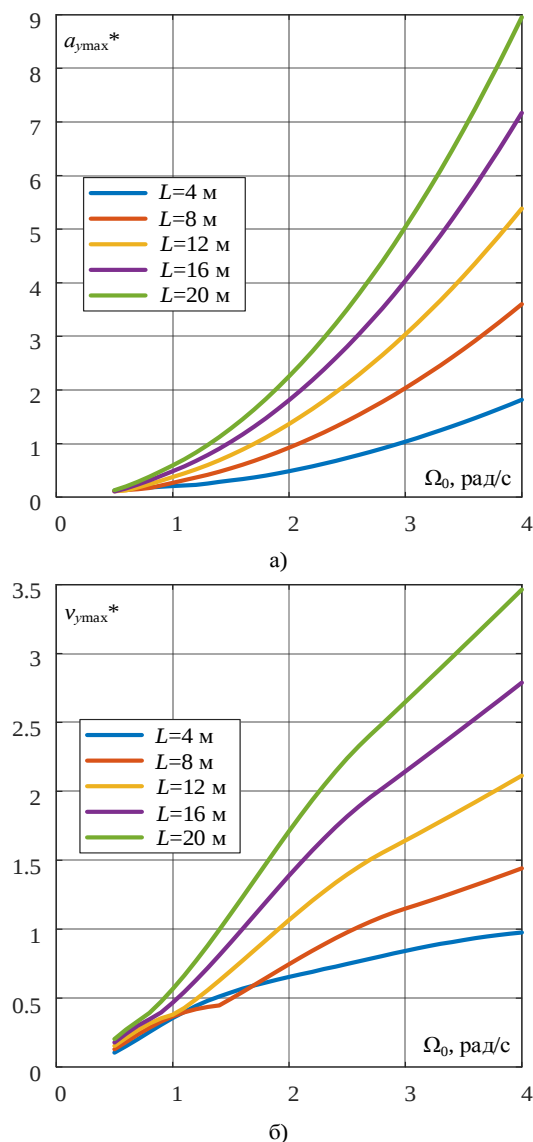


Рисунок 5 – Зависимости максимальных значений ускорения (а) и скорости (б) при различных значениях длины подвеса

Для удобства анализа все значения приведены к базовым: 0,4 м/с и 0,5 м/с² соответственно. Графические зависимости, приведенные на рис. 5, показывают, что максимальные значения ускорения и скорости значительно изменяются при различных значениях длины подвеса. Например, при значении СГК 2 рад/с при длине подвеса $L = 20$ м пиковое ускорение составляет 226% от заданного значения, а при $L = 4$ м – 48%. Очевидно, что величина СГК должна быть обратно пропорциональной длине подвеса. В частности, для $L = 20$ м пиковое ускорение будет равно номинальному при $\Omega_0 = 1,32$ рад/с, а при $L = 4$ м – 2,95 рад/с. Одновременно с этим максимальное значение скорости $v_{y\max}$ при тех же условиях составляет 90% и 83% от заданного значения соответственно. Из этого можно сделать вывод, что при строгом соблюдении критерия

ограничения ускорения скорость на начальном этапе будет гарантированно меньше предельно допустимого значения. Несмотря на некоторое снижение быстродействия такой случай является предпочтительным.

Представленные на рис. 5 зависимости не позволяют более точно оценить значение СГК, обеспечивающее ограничение пикового ускорения. Для большей наглядности построим их в другом масштабе – по горизонтальной оси будем откладывать значение СГК, отнесенное к частоте собственных колебаний груза:

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{g}{L}}. \quad (4)$$

Полученные графические зависимости приведены на рис.6.

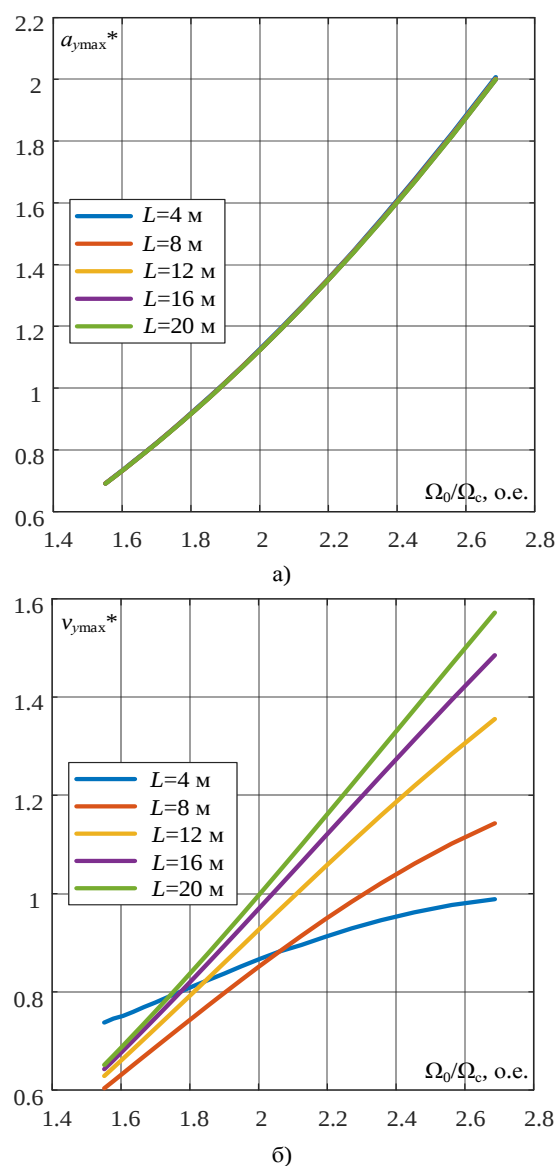


Рисунок 6 – Зависимости максимального значения ускорения (а) и скорости (б) от СГК, приведенного к собственной частоте колебаний груза

Как показано на рис. 6, а, величина $a_{y\max}$ при различных значениях длины подвеса изменяется практически идентично. В частности, при $\Omega_0 \approx 1,88 \Omega_c$ пиковое ускорение равняется максимальному значению, следовательно, данное значение СГК можно использовать при синтезе систем модального управления электроприводом тележки мостового крана независимо от значения длины подвеса.

На рис. 6, б показано, что при таком подходе пиковое значение скорости на начальном этапе разгона будет снижаться с уменьшением длины подвеса.

Проанализируем зависимости $a_{y\max}$ и $v_{y\max}$ от длины подвеса L . Полученные графические зависимости приведены на рис. 7.

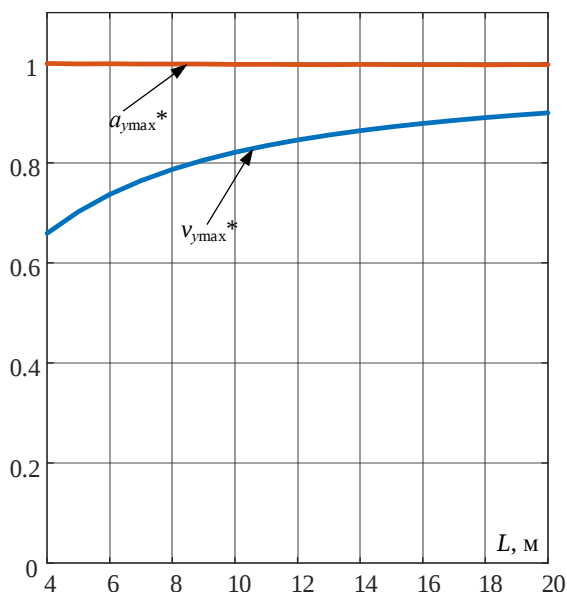


Рисунок 7 – Зависимости максимального значения ускорения и скорости от длины подвеса

Их анализ показывает, что условия ограничения ускорения и скорости движения тележки выполняются, из чего можно сделать вывод о корректности предложенной методики выбора СГК.

Выводы

Выбор значения среднегеометрического корня характеристического полинома системы модального управления электроприводом тележки мостового крана необходимо выполнять с учетом максимально допустимых значений ускорения и линейной скорости перемещения тележки с грузом.

Максимальное ускорение, выбранное из соображений безопасности эксплуатации мостовых кранов, ограничивает максимальное значение СГК. При этом пиковое значение ускорения не зависит от длины подвеса, если величину СГК изменять пропорционально частоте

собственных колебаний груза.

Однако при таком подходе наблюдается снижение максимального значения скорости на начальном этапе разгона, что можно охарактеризовать как снижение быстродействия.

Целью дальнейших исследований может быть анализ быстродействия систем при изменении предельного значения ускорения при разгоне и торможении привода исходя из обеспечения более быстрого протекания переходных процессов по скорости движения грузоподъемной тележки.

Литература

1. Moustafa, K. A. F. Feedback control of overhead cranes swing with variable rope length / K. A. F. Moustafa // American Control Conference Baltimore, Mariland, June 1994. – PP. 691-695.
2. Park, H. A feedback linearization control of container cranes: varying rope length / H. Park, D. Chwa, K.-S. Hong // International Journal of Control, Automation, and System, 2007. - Vol. 5, No. 4, Aug. 2007. – PP. 379-387.
3. Анисимов, А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин, В. В. Аполлонский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2016. – № 2. – С. 21-26.
4. Захватов, В. И. Полиномиальный регулятор с динамическим изменением коэффициентов / В. И. Захватов, С. Л. Подвальный, А. В. Михайлуков // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения, 2020. – Т. 1. – № 1(38). – С. 53-62.
5. Ишматов, З. Ш. Синтез методом полиномиальных уравнений систем электропривода, инвариантных к параметрическим и внешним возмущениям / З. Ш. Ишматов, М. А. Волков, Е. А. Гурентьев // Электротехника, 2007. – № 11. – С. 30а-37.
6. Пахомов, А. Н. Модальное управление асинхронным электроприводом тележки мостового крана с наблюдающим устройством / А. Н. Пахомов, А. А. Федоренко, П. Н. Чертыков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2022. – Т. 15. – № 5. – С. 583-592.
7. Характеристики стандартных распределений корней в синтезе систем управления для электромехатронных модулей / С. К. Лебедев, А. Р. Колганов, Н. Е. Гнездов, Д. М. Зенкин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: Материалы международной научно-технической конференции : (XVIII Бенардосовские чтения), Иваново, 27–29 мая 2015 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2015. – С. 83-86.

8. Задорожня, И. Н. Анализ свойств систем автоматического управления двух-массовым электроприводом при синтезе параметров на основе стандартных характеристических полиномов / И. Н. Задорожня, Н. А. Задорожний // Электротехника и электроэнергетика, 2014. – № 2. – С. 54-58.

9. Helma, V. Active anti-sway crane control using partial state feedback from inertial sensor / V.

Helma, M. Goubej // 23rd International Conference on Process Control (PC), 2021. – PP. 137-142

10. Толочко, О. И. Гашение колебаний перемещаемых мостовыми кранами грузов при переменной длине каната / О. И. Толочко, Д. В. Бажутин // Завалишинские чтения'16: сборник докладов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2016. – С. 250-255.

Павлыш В. Н., Бажутин Д. В. Выбор среднегеометрического корня системы модального управления электроприводом тележки мостового крана из условия обеспечения демпфирования колебаний груза. В статье рассмотрены вопросы выбора среднегеометрического корня системы модального управления электроприводом тележки мостового крана, синтезированной для обеспечения эффективного демпфирования колебаний груза. Приведены зависимости максимального ускорения и максимальной скорости от среднегеометрического корня системы для различных значений длины подвеса. Показано, что путем изменения среднегеометрического корня в функции частоты собственных колебаний груза достигается сохранение показателей качества переходных процессов на приемлемом уровне в широком диапазоне изменения длины подвеса.

Ключевые слова: мостовой кран, система модального управления, среднегеометрический корень, демпфирование колебаний груза.

Pavlysh V., Bazhutin D. Estimation of a mean geometric root of a state-feedback control system for a gantry crane trolley electric drive in terms of payload sway suppression. The article shows the problems of mean geometric root estimation for a state-feedback control system for a gantry crane trolley electric drive designed to effectively eliminate payload sway. The dependencies of maximum acceleration and velocity from the system mean geometric root for various cable length values are presented. It is shown that varying the value of mean geometric root as a function of payload swing eigenfrequency ensures acceptable values of transient quality for a wide range of cable length variation.

Keywords: gantry crane, state-feedback control, mean geometric root, payload sway elimination.

Статья поступила в редакцию 15.12.2022
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А.Я.