ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ТРОСОБЛОЧНЫЙ СИСТЕМЫ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНРАНОСТИ МАССЫ ГРУЗА И ДЛИНЫ ТРОСА

Переселяк М.Ю.[1], Гайворонский С.А.[2], Хожаев И.В.[3]
[1] Национальный исследовательский Томский Политехнический ун-т, ИШИТР, 8Е22, e-mail: myp12@tpu.ru
[2] Национальный исследовательский Томский Политехнический ун-т, Отделение автоматизации и робототехники (ОАР), доцент, e-mail: saga@tpu.ru
[3] Национальный исследовательский Томский Политехнический ун-т, Отделение автоматизации и робототехники (ОАР), доцент, e-mail: ivh1@tpu.ru

Введение

Системы обезвешивания используются для компенсации в механических конструкциях сил и моментов сил, вызванных силой тяжести. Они находят применение в медицинской, космической и строительной отраслях: проведение испытаний трансформируемых конструкций космический аппаратов, компенсирование веса пациентов, страдающих проблемами с опорно-двигательным аппаратом, крановые системы [1].

В системах обезвешивания часто требуется обеспечить апериодический переходный процесс заданной длительности. При этом важно учитывать, что система имеет изменяющиеся параметры, например, масса груза и длина троса, на котором он подвешен. Исходя из этого, решением задачи синтеза должен быть регулятор, который позволяет достичь требуемого переходного процесса в системе, и обеспечивает её робастность относительно изменяющихся в ней параметров. Пример синтеза такого регулятора представлен в [2].

В [2] решена задача синтеза робастного ПИД-регулятора с учётом интервальных параметров массы груза и длины троса в системе. Требуемый апериодический переходный процесс обеспечивается в соответствии с принципом доминирующих полюсов: один из параметров регулятора делается свободным для задания желаемого расположения полюсов, а другие два позволяют задать требуемые границы отрезка вещественного доминирующего полюса. Желаемое расположение полюсов было достигнуто, прямые показатели качества системы рассчитаны на основе переходных характеристик системы в вершинах ее параметрического многогранника. Однако в литературе [3] системы с интервальными параметрами считаются стационарными системами с неопределенными параметрами. В связи с этим актуально проверить работоспособность системы методом имитационного моделирования с учетом нестационарности ее параметров.

Таким образом, целью работы является реализация математической модели системы с учетом нестационарности ее параметров: длины троса и массы груза; и проверка работоспособности системы с ранее синтезированным регулятором.

Составление имитационной модели

Рассмотрим представленную в [2] структурную схему системы обезвешивания (рис. 1).

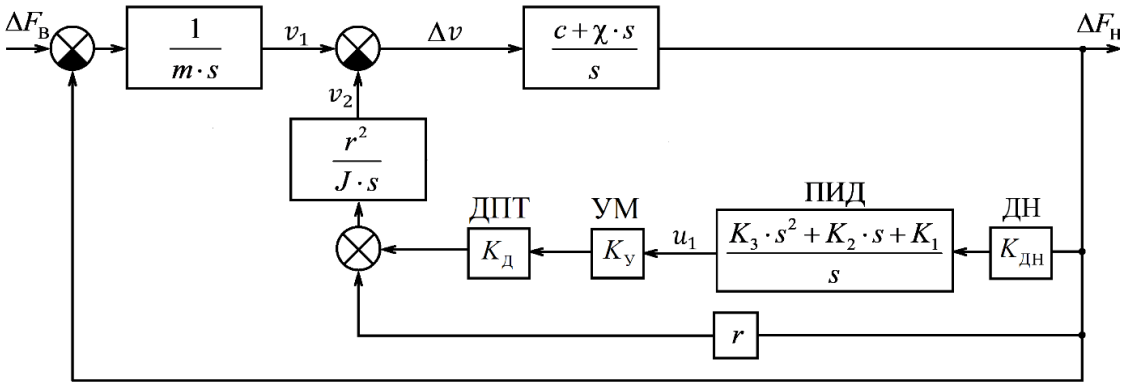

Рис. 1. Структурная схема системы обезвешивания

В структурной схеме использованы следующие обозначения: m − масса груза, кг; l − длина троса, м; J – момент инерции электропривода системы, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; χ – удельный коэффициент демпфирования троса, $\text{Н}\cdot\text{с}$; c − удельная жесткость троса, Н; r − радиус приводного шкива электропривода, м; $K_{\text{Д}}$ − передаточный коэффициент двигателя постоянного тока, $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{В}^{-1}$; $K_{\text{У}}$ − передаточный коэффициент усилителя мощности, $\text{В}\cdot\text{Н}^{-1}$; K_1, K_2, K_3 − интегральный, пропорциональный и дифференциальный коэффициенты регулятора; $K_{\text{ДН}}$ − передаточный коэффициент датчика натяжения, u_1 − сигнал управления регулятора, В; v_1 − скорость груза, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; v_2 − скорость сматывания троса, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. Постоянные параметры системы принимают следующие значения: $J = 0{,}5$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, $\chi = 10^4$ $\text{Н}\cdot\text{с}$, $c = 2\cdot 10^4$ Н, $r = 0{,}1$ м, $K_{\text{Д}} = 5$ $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{В}^{-1}$, $K_{\text{У}} = 10$ $\text{В}\cdot\text{Н}^{-1}$, $K_{\text{ДН}} = 1$, $K_1 = 0{,}0309$, $K_2 = 0{,}0778$, $K_3 = 0{,}0549$. Интервальные параметры системы заданы диапазонами: $m = [50;500]$ кг, $l = [50;100]$ м.

Согласно структурной схеме системы на её вход подается сигнал возмущающей силы $\Delta F_{\text{В}}$. Затем в сумматоре происходит вычисление разности этого сигнала и текущего значения силы натяжения троса. Поступающая разность сил делится на массу груза и интегрируется для расчета скорости движения груза v_1 под действием возмущающей силы. Эта сила также измеряется датчиком натяжения. Сигнал с него поступает на ПИД-регулятор, формирующий управляющий сигнал u_1 с регулятора, который проходит через блок усилителя мощности и попадает на двигатель постоянного тока, вращающий барабан с тросом. Скорость сматывания троса v_2, поступает на сумматор и вычитается из v_1. Рассчитанная разность скоростей Δv поступает на блок моделирования упругого троса, в котором интегрируется для поиска приращения длины троса вследствие его растяжения. На выходе данного блока формируется сигнал силы натяжения $\Delta F_{\text{Н}}$. Имитационная модель представлена на рис. 2.

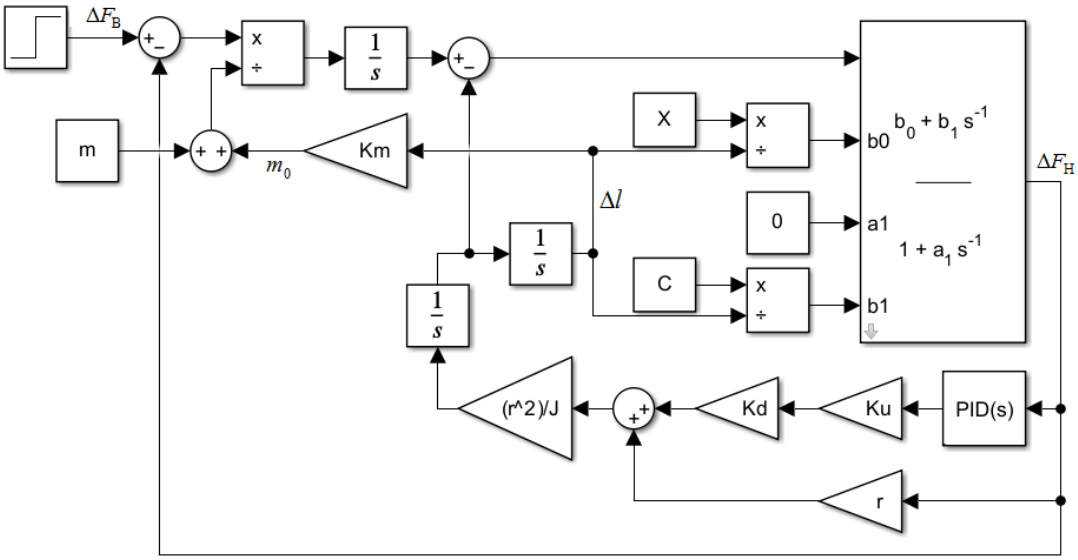

Рис. 2. Имитационная модель системы обезвешивания

В имитационной модели использованы следующие обозначения: $K_m = 0{,}06$ − коэффициент удельной массы троса, равный $0{,}06$ $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}$; m_0 − масса размотанного троса, кг.

Имитационная модель имеет ряд особенностей, которые позволяют провести моделирование рассматриваемой системы как нестационарной.

В процессе уравновешивания груза в системе меняется длина троса, которая регулируется посредством вращения шкива на валу двигателя постоянного тока. Это приводит к изменению рабочей массы системы и изменению характеристик самого каната, на котором подвешен груз. Под рабочей массой системы следует понимать сумму массы подвешенного груза и массы отмотанного троса.

Массу отмотанного троса можно найти по формуле (1):

$$m_0 = K_m \cdot \int v_2 dt \tag{1}$$

Для того чтобы учесть массу троса в системе, проведем после сумматора дополнительную ветвь, в которой полученное значение скорости движения каната будет интегрироваться и перемножаться на коэффициент удельной массы K_m. Рассчитанное значение массы троса далее подается на сумматор для расчета рабочей массы системы.

Для того чтобы учесть изменения характеристик троса, которые описываются передаточной функцией, используется специальный блок. Блок реализует уравнение (2), описывающее передаточную функцию троса в системе:

$$W(s) = \frac{\frac{c}{l} + \frac{x}{l} \cdot s}{s} \tag{2}$$

На вход блока подается скорость разматывания, коэффициенты демпфирования и сопротивления, последние два из которых делятся на текущую длину троса. Блок производит расчет коэффициентов передаточной функции и затем интегрирует полученное выражение и на его выходе формируется сигнал силы натяжения.

Моделирование переходного процесса

В результате имитационного моделирования получены графики переходных процессов для комбинаций пороговых значений интервальных параметров (рис. 3).

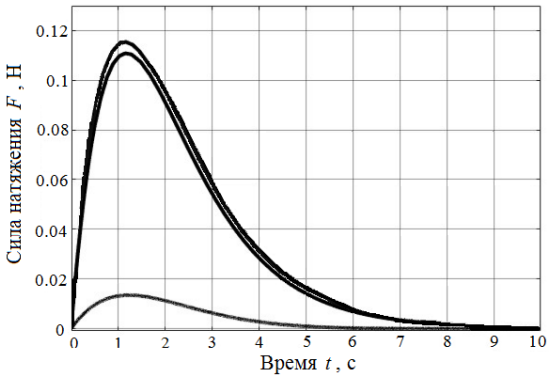

Рис. 3. Графики переходных характеристик имитационной модели для разных комбинаций интервальных параметров

По полученным графикам можно прийти к выводу, что переходные процессы в имитационной модели протекают быстрее, нежели в стационарной, что объясняется повышенным уровнем консерватизма линейной модели с интервальными параметрами. Вид переходных характеристик и время переходных процессов не противоречит полученному семейству в [2].

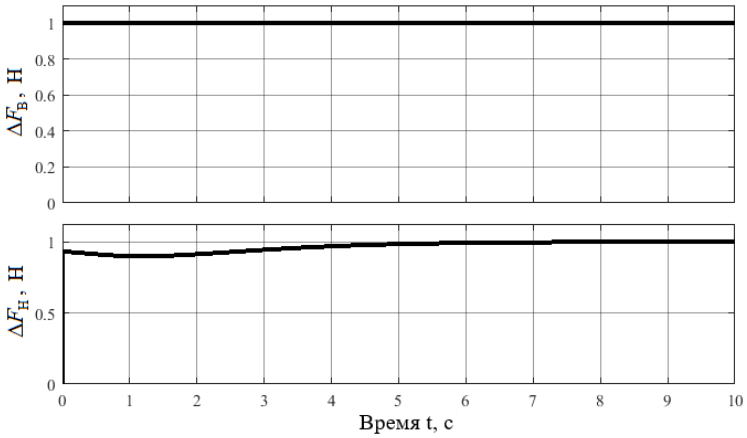

Рис. 4. Возмущающая и выходная силы

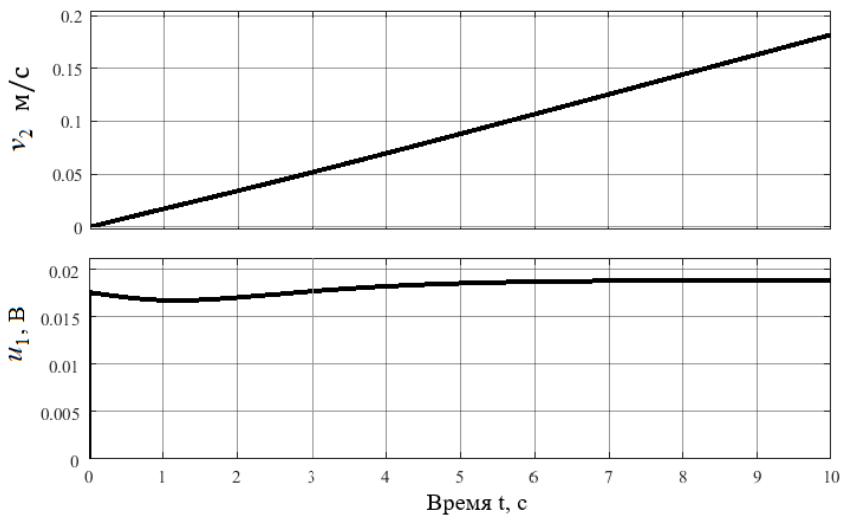

Рис. 5. Скорость троса и управляющий сигнал регулятора

Опишем физические процессы в системе. На вход модели подается единичной ступенчатое воздействие, вызывающее возникновение возмущающей силы $\Delta F_{\text{В}} = 1$ Н (рис. 4). На это воздействие начинает реагировать система посредством сматывания троса на шкив, который закреплен на валу ДПТ. За управление процессом сматывания троса отвечает ПИД-регулятор, который формирует управляющий сигнал, обеспечивающий линейное нарастание скорости сматывания троса с барабана для компенсации внешнего возмущения в виде функции Хэвисайда (рис. 5). Благодаря апериодическому переходному процессу в системе, скорость сматывания троса меняется без колебаний. Процесс изменения длины троса прекращается при полном компенсировании внешней возмущающей силы.

Заключение

При описании нестационарных систем при помощи стационарных моделей с интервальными параметрами требуется провести дополнительные проверки для оценки её качества регулирования.

Проверка рассматриваемой системы была реализована в виде создания имитационной модели, в которой учитывались изменения параметров системы в ходе протекания в ней переходных процессов. Результаты моделирования показали, что синтезированный ПИД-регулятор обеспечивает желаемое качество регулирования, не смотря на то, что был рассчитан по упрощенной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00737).

Список использованных источников

1. Беляев А.С., Филипас А.А., Курганов В.В., Поберезкин Н.И. Четырехтроссовая система обезвешивания с управлением по вектору силы // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. Т. 18, №. 2. – С. 98–106.
2. Переселяк М.Ю., Гайворонский С.А., Хожаев И.В. Синтез робастного регулятора системы обезвешивания с интервальными параметрами и аффинной неопределенностью коэффициентов характеристического полинома // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIX Международной научно-практической конференции (20-22 ноября 2024 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В–спектр, 2024 (в печати).
3. Bartlett A.C., Hollot C.V., Lin H. Root locations of an entire polytope of polynomials: it suffices to check the edges // Mathematics of Control, Signals and Systems. – 1988. – Т.1, № 1. – С. 61−71.