УДК 621.3:681.5
2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования





***А.П. Корнеев*[1], *Г.С. Леневский*[1], *Итонг Ню*[2]**
[1]*Белорусско-Российский университет,*
[2]*Университет Сайнс Малайзия*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Рассмотрена система с распределенными параметрами в механической части. Перечислены допущения при описании механической части установки как системы с распределенными параметрами. Представлены передаточные функции для системы с распределенными параметрами. Использован разработанный метод аппроксимации для системы с распределенными параметрами. Рассмотрены подходы для описания процессов, протекающих в электромеханических системах. Использован MATLAB/Simulink с применением библиотеки Power System Blockset для создания моделей. Представлены модели электромеханической системы с распределенными параметрами, вычислителя резонансной частоты, тиристорного преобразователя. Представлены параметры имитационного моделирования для экспериментального стенда. Получены графики тока на частотах меньше и равной первой резонансной частоте. Представлены выводы имитационного моделирования.

Имитационное моделирование, система с распределенными параметрами, резонансная частота, MATLAB, математическая модель.

Во многих объектах техники можно найти системы с распределенными параметрами (СРП) для механических элементов. Это, например, подъемные механизмы с тросами или канатами, протяженные линии электропередач, трубопроводы для перекачки различной жидкости, буровые установки с длинными колоннами труб [1, 2].

Одно из главных условий, препятствующих повышению эффективного управления СРП, – это деформации упругих механических звеньев.

Наличие упругости в объекте управления оказывает существенное влияние на работу системы управления, что вынуждает изменять стандартные настройки жестких систем, применять наблюдатели состояния или резонансные корректирующие регуляторы [3, 4].

Условиями, при которых невозможно создание качественных систем управления механизмов без учета свойств механической части электропривода (ЭП), являются увеличение требований к точности движений, увеличение быстродействия в современных установках при одновременном увеличении пространственных размеров и появление новых конструкций [4].

Установка представляет собой электромеханическую СРП [5–7].

Ветвь каната или троса, жесткость которой меньше жесткости других звеньев, является самым податливым элементом системы. Работу установки можно рассчитать только рассматривая канат или трос как упругий элемент [8, 9].

Большое влияние на работу всей системы ЭП оказывают упругие деформации, возникающие в СРП [10].

Серьезные ошибки при анализе и синтезе систем управления ЭП, вызванные неточным математическим описанием такого оборудования, приводят к снижению точности работы, потере устойчивости ЭП, а в самых неблагоприятных случаях – к разрушению установки [11].

Следующие допущения применяются при описании установки: механическая часть представляется как стержень, испытывающий продольные колебания, а сосредоточенные массы представлены как бесконечные скачки плотности [11].

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения для любого сечения известна [3]:

$$W(x, p) = \frac{ch(\tilde{p} \cdot \tilde{x}) \cdot sh(\tilde{p})}{2 \cdot a \cdot (sh^2(\tilde{p}) + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \tilde{p}^2 \cdot [ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \tilde{p} \cdot sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p}))}, \quad (1)$$

где x – текущее расстояние между центром массы 1 и грузом, м; L – расстояние между центрами масс, м; $\tilde{x} = 1 - \frac{x}{L}$ – относительная координата выходной точки; $\mu_i = M_i/Mk$ – i-ая относительная масса; a – скорость волны распространения колебаний, м/с, $\tilde{p} = p\frac{L}{a}$ – нормированный оператор Лапласа.

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения, для начального сечения, также известна [15]:

$$W_1(x, p) = \frac{ch(\tilde{p}\cdot\tilde{x})\cdot sh(\tilde{p}) + \mu_2\cdot\tilde{p}\cdot(ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\cdot\tilde{x}))}{2\cdot a\cdot(sh^2(\tilde{p}) + \mu_1\cdot\mu_2\cdot\tilde{p}^2\cdot[ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p}\cdot x)] + (\mu_1+\mu_2)\cdot\tilde{p}\cdot sh(\tilde{p})\cdot ch(\tilde{p}))}. \quad (2)$$

Собственные частоты (собственные значения) и собственные формы (собственные функции) являются основными характеристиками линейных распределенных колебательных систем. Для изучения функционирования такой системы необходимо знание собственных частот [9].

Передаточная функция СРП содержит трансцендентные гиперболические функции – из-за этого моделирование СРП во временной области затруднено. Существующие математические программы используют численные вычисления только для рациональных функций. Моделирование иррациональных функций не представляется возможным, поэтому необходимо выполнить дополнительное преобразование.

Аппроксимация передаточной функции СРП любым известным методом позволяет решить эту проблему. При работе СРП происходит постоянное изменение переменной x, описывающая положение груза (рабочей массы) в пространстве. Из-за этого возникает постоянная необходимость пересчитывать не только резонансные частоты, но и выполнять дополнительные расчеты, зависящие от метода аппроксимации, например вычеты или остатки. Делать это необходимо в режиме реального времени. Это приведет к резкому увеличению мощности компьютера и времени моделирования.

Разработан метод аппроксимации СРП при разложении на произведения $(p^2+\omega^2)$ для решения этой проблемы, подробно описанный в [12]. Не требуется дополнительных вспомогательных вычислений при этом методе аппроксимации, что серьезно упрощает расчет и ускоряет процесс моделирования СРП.

Применение способа, заменяющего непосредственные вычисления резонансных частот в каждой точке моделирования, интерполяцией значений, полученных в некоторых промежуточных точках, используется для дальнейшего упрощения расчета и уменьшения времени моделирования СРП.

В работе применен метод сплайн-интерполяции, который является достаточно простым и точным для инженерных расчетов.

Имитационное моделирование

Существует несколько подходов для описания процессов, протекающих в электромеханических системах (ЭМС) [13]:

1) в средних значениях;

2) в действующих значениях;

3) в мгновенных значениях.

Наиболее часто используется описание и исследование ЭМС по 1 и 2. Однако такое описание не полностью отражает работу ЭМС, что негативно сказывается на его выборе и надежности.

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники появилась возможность исследовать поведение ЭМС в мгновенных значениях в различных режимах, что позволяет более точно определить его характеристики уже на стадии проектирования.

Имитационное моделирование является частным случаем математического моделирования.

Имитационная модель – логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для дальнейших экспериментов на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки качества функционирования объекта.

В экспериментальной установке электрическая часть ЭМС представлена реверсивным управляемым выпрямителем, выполненным по мостовой схеме. Для создания модели преобразователя использовался математический пакет MATLAB. В данном пакете использовались библиотеки Simulink и SimPowerSystems.

Для имитации постоянных вычислений резонансной частоты разработана модель вычислителя, основанная на аппроксимации и интерполяции. Теоретические расчеты вычислителя представлены в [14–16].

Модель вычислителя в MATLAB/Simulink представлена на рисунке 1. На рисунке 2 представлена имитационная математическая модель электромеханической СРП, которая получена в MATLAB/Simulink с использованием ресурсов библиотеки Power System Blockset [17]. Она может быть использована для расчета и изучения как частотных, так энергетических и временных характеристик.

На рисунке 3 представлена имитационная модель тиристорного преобразователя, полученного с применением моделей тиристоров в MATLAB/Power System Blockset для получения данных о мгновенных значениях тока и напряжения для каждого тиристора в отдельности и всего преобразователя в целом [17].

Для экспериментального стенда выполнено имитационное моделирование электромеханической СРП в MATLAB/Simulink [18].

Для имитационного моделирования необходимо измерить линейные размеры системы, определить параметры электродвигателя, преобразователя и механического элемента.

Далее необходимо произвести необходимые расчеты, подставить полученные значения в модель и выполнить имитационное моделирование в MATLAB. В результате получаются графики переходных процессов требуемых значений.

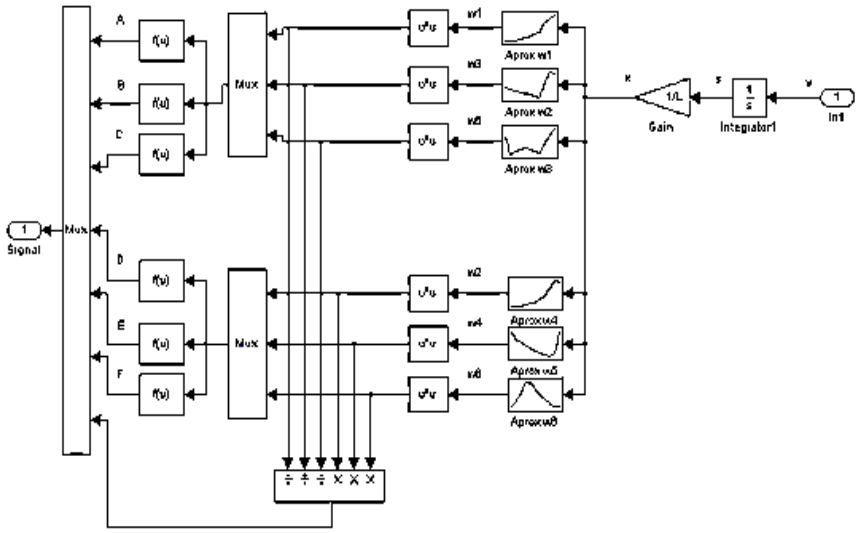


Рис. 1. Модель вычислителя резонансной частоты

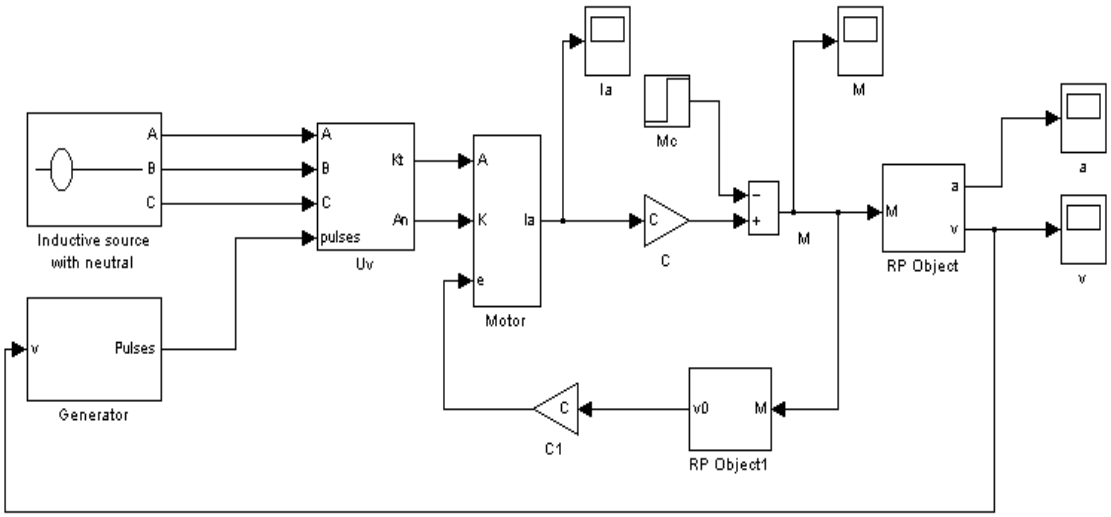


Рис. 2. Имитационная математическая модель электромеханической СРП

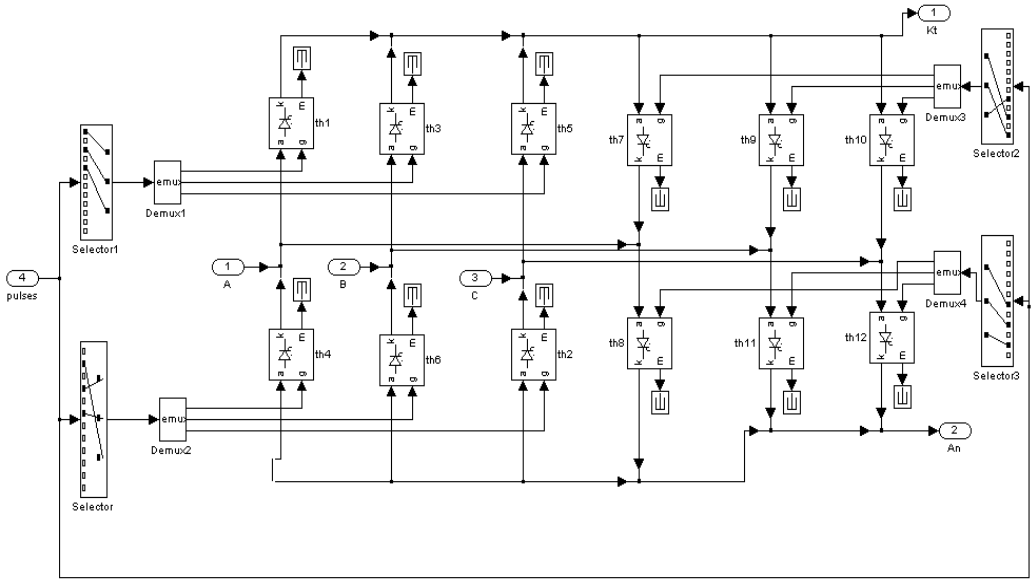


Рис. 3. Модель тиристорного преобразователя

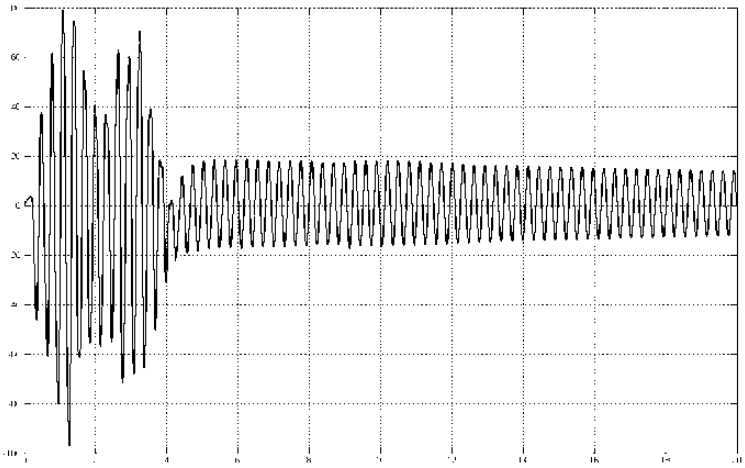


Рис. 4. График тока на частоте меньше резонансной

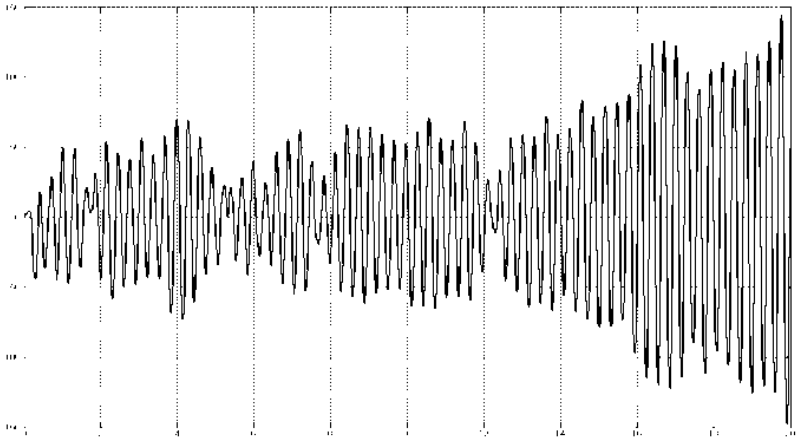


Рис. 5. График тока на резонансной частоте

Параметры имитационного моделирования для экспериментального стенда:

P2nom=850 – мощность электродвигателя, Ватт.

Ra=2.7 – сопротивление якорной обмотки электродвигателя, Ом.

Ta=0.012 – постоянная времени якорной обмотки электродвигателя, с.

Ia=9.6 – номинальный ток электродвигателя, А.

Ua=110 – номинальное напряжение электродвигателя, В.

wnom=230 – номинальная скорость вала электродвигателя, рад/с.

c=(Ua-Ia·Ra)/wnom – конструктивный коэффициент электродвигателя, В·с/рад.

J=0.011 – момент инерции электродвигателя, кг·м^2.

ktp=11 – коэффициент преобразования тиристорного преобразователя.

Ttp=0.01 – постоянная времени тиристорного преобразователя, с.

Mcnom=P2nom/wnom – номинальный момент сопротивления электродвигателя, Н·м.

r=0.05 – радиус кривошипа кривошипно-шатунного механизма, м.

l=0.15 – длина шатуна кривошипно-шатунного механизма, м.

В результате имитационного моделирования получены графики токов на частотах, меньших и равных первой резонансной частоте, представлены соответственно на рисунках 4 и 5.

Выводы:

1. При разложении на произведения получены математические модели для аппроксимации, вычислителя резонансных частот с применением интерполяции значений, рассчитанных в промежуточных точках с помощью метода сплайна, аппроксимации электромеханической СРП в MATLAB для верификации разработанных ранее авторами собственных теоретических расчетов.

2. При имитационном моделировании используется метод замены прямых вычислений резонансных частот на значения, полученные с помощью вычислителя, что значительно ускоряет процесс моделирования.

3. Проведено имитационное моделирование электромеханической СРП в MATLAB для экспериментального стенда, которое подтверждает верность и адекватность теоретических расчетов.

4. Амплитуда тока при резонансной частоте увеличивается более чем в 8 раз (150/18,5=8,1) за 20 секунд, что и должно быть на резонансной частоте.

Литература

1. Zames, G. On spectral mapping, higher order circle criteria and periodically varying system. IEEE Trans / G. Zames, R. Kallman – Automat. Control vol. AC-15, 1970. – S. 649–652

2. Sarangapani, Jagannathan. Neural network control of nonlinear discrete-time systems / Jagannathan Sarangapani – Taylor &, vol. AC-15, 2016. – P. 649–652

3. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987.– 144 с.

4. Brocket, R. W. The status of Stability Theory for deterministic systems / R. W. Brocket – IEEE Trans – Automat. Control. – 2017. – Vol. AC-11, No. 3. – P. 596–606.

5. Ortega, R. Almost periodic equations and conditions of Ambrosetti / R. Ortega, M. Tarallo. – Prodi type. Academic Press, N. Y. and London, 2018. – 217 P.

6. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – Москва : Наука, 2016.– 230 с.

7. Narendra, K. S. Frequency domain criteria for absolute stability / K. S. Narendra, J. H. Taylor. – N. Y. and London : Academic Press, 1973. – 358 p.

8. Corduneanu, C. Integral equations and stability of feedback systems / C. Corduneanu. – N. Y. : Acad. Press, 2016. – 357 p.

9. Терехов, В. М. Учет упругости длинных канатов в динамике электропривода подъемников / В. М. Терехов // Электричество. – 1966. – № 11. – С. 60–65.

10. Willems, J. C. On the asymptotic stability of the null solution on linear differential equations with periodic coefficients / J. C. Willems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1968. – Vol. AC-13, № 1. – P. 65–72.

11. Kyriakos, Vamvoudakis. Control of Complex Systems. Theory and Applications / Vamvoudakis Kyriakos, Jagannathan Sarangapani. – Butterworth-Heinemann, 2020. – 386 p.

12. Корнеев, А. П. Новый способ аппроксимации механической части нестационарной электромеханической системы с распределенными параметрами / А. П. Корнеев // Наука настоящего и будущего: Сборник материалов конференции V научно-практической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 17–18 марта 2017 г.) // ЭТУ «ЛЭТИ» – Санкт-Петербург, 2017. – С. 168–170.

13. Балашов, В. А. Экономико-математическое моделирование производственных систем / В. А. Балашов, А. М. Андронов : учебное пособие для вузов. – Мн.: Універсітэцкае, 2016.– 240 с.

14. Толочко, О. І. Анализ та синтез електромеханічных систем зі спостерігачами стану / О. І. Толочко. – Донецк : Норд-Пресс, 2014. – 298 с.

15. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков – Москва : Машиностроение, 2019. – 184 с.

16. Корнеев, А. П. Применение наблюдателей за состоянием в системах с распределенными параметрами / А. П. Корнеев, Г. С. Леневский // Информационные технологии, энергетика и экономика : материалы II межрегиональной научно-технической конференции (Смоленск. 13–14 апреля 2005 г.) / МЭИ (ТУ). – Смоленск, 2005. – С. 40–44.

17. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : Корона принт, 2021. – 320 с.

18. Karneyev, A. P. Development of a stand for research of systems with the distributed parameters / A.P. Karneyev, G.S. Lenevsky // Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2011. – Vol. 41. – P. 32–35.

***A.P. Korneev*[1], *G.S. Lenevsky*[1], *Yitong Niu*[2]**

[1]Belarusian-Russian University ,[2]Science University Malaysia

SIMULATION MODELING OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN MECHANICAL PART

System with distributed parameters in mechanical part is considered. Assumptions are listed when describing mechanical part of installation as system with distributed parameters. Transfer functions for system with distributed parameters are presented. Developed approximation method for system with distributed parameters is used. Approaches to describing processes occurring in electromechanical systems are considered. MATLAB/Simulink with Power System Blockset library for creating models are used. Models of electromechanical system with distributed parameters, resonant frequency calculator, and thyristor converter are presented. Simulation parameters for experimental setup are presented. Current graphs at frequencies less than and equal to first resonant frequency are obtained. Simulation conclusions are presented.

Simulation modeling, distributed parameter system, resonant frequency, MATLAB, mathematical model.