

МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРАЛІВ ЗГОРТКИ

Вступ. Процес створення комп'ютерних моделей електромеханічних систем передбачає як необхідний етап дискретизацію неперервної моделі системи (*прототипу*) для отримання моделювальних рекурентних рівнянь (*цифрової моделі*), які й використовуються безпосередньо для програмування задачі на комп'ютері. Традиційне використання з цією метою числових методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь дозволяє отримати деякі переваги:

- запис неперервної моделі у формі системи звичайних диференціальних рівнянь є звичним для опису електромеханічних систем і є традиційною добре відпрацьованою методикою;
- використання стандартних програм розв'язування диференціальних рівнянь, а останнім часом і математичних пакетів, дозволяє значною мірою автоматизувати процес створення комп'ютерної моделі, зробивши його доступним широкому загалу [1, 2].

Водночас таке спрощення у створенні комп'ютерних моделей несе в собі низку недоліків:

- стандартні числові методи не найкращим чином пристосовані до розв'язку кожної конкретної задачі, зокрема, вони практично непридатні для моделювання імпульсних систем [3], якими є більшість сучасних електроприводів;
- дискретизація неперервного прототипу за допомогою числових методів у багатьох випадках створює проблеми з точністю та числовою стійкістю розв'язку і може призводити до накопичення похибок на довгих інтервалах розв'язку.

Як вихід перспективним є застосування числово-аналітичних підходів, які не створюють проблем числової стійкості, тому що базуються на операторних методах, зокрема, *z*-перетворенні. Проте, використання простих числових апроксимацій операторів інтегрування [4] зменшує точність розрахунків. Виходом з цього положення є дискретизація моделі рекурентними рівняннями, які отримані на підставі інтегралу згортки з ненульовими початковими умовами [5].

Постановка задачі досліджень. Метою проведених досліджень є створення ефективних числово-аналітичних методів на підставі апроксимацій інтегралу згортки для моделювання електромеханічних систем і перевірка їхньої роботи на прикладі складної електромеханічної системи, що до цього часу не проводилося.

Матеріали досліджень. Математичною основою побудови моделюючих рекурентних рівнянь є інтеграл згортки з ненульовими початковими умовами. Знаходження такого інтегралу можливе як безпосереднім аналітичним інтегруванням, так і з використанням операторних методів. Одним з найпростіших способів для цього є застосування модифікованого *z*-перетворення, яке є методом знаходження інтегралу згортки для дискретизованих систем.

Спростити задачу дозволяє те, що електромеханічна система, яка допускає фізичну реалізацію, може бути подана правильною дробово-раціональною передатною функцією. Це дає змогу розкласти її на набір елементарних динамічних ланок і відповідно скомпонувати модель системи з набору інтеграторів та аперіодичних ланок. Кожен тип ланки пропонується описувати відповідним моделюючим рекурентним рівнянням, що отримане за допомогою модифікованого *z*-перетворення [6, 7]:

- рекурентне рівняння для опису інтегратора: $y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2T} \cdot (x_i + x_{i+1});$
- рекурентне рівняння для опису аперіодичної ланки: $y_{i+1} = y_i \cdot e^{-\frac{h}{T}} + \left(1 - e^{-\frac{h}{2T}}\right) \cdot \left(x_{i+1} + x_i \cdot e^{-\frac{h}{2T}}\right).$

Для перевірки роботи запропонованого підходу як приклад використано досить складну (десятого порядку) модель електропривода механізму обертання кар'єрного екскаватора за системою Г-Д з тиристорним збудником типу БУТВ (рис. 1). У моделі враховано наявність 2-двигунного привода і відповідної йому еквівалентної 3-масової механічної пружної системи та низку гладких і жорстких нелінійностей, таких як:

- обмеження вихідної координати регулятора напруги;
- статичні та динамічні нелінійності тиристорного збудника типу БУТВ:
 - складна нелінійність регулювальної характеристики, у тому числі через нелінійну залежність кута комутації тиристорів від струму та обмеження мінімального і максимального кутів запалювання;
 - режим інвертування при роботі на індуктивне навантаження під час реверсу;
 - імітація блоку логіки – реверс перетворювача лише після досягнення режиму перервних струмів;

- криву намагнічування та реакцію якоря генератора;
- наявність у механічній частині привода сухого тертя, люфтів і демпфування.

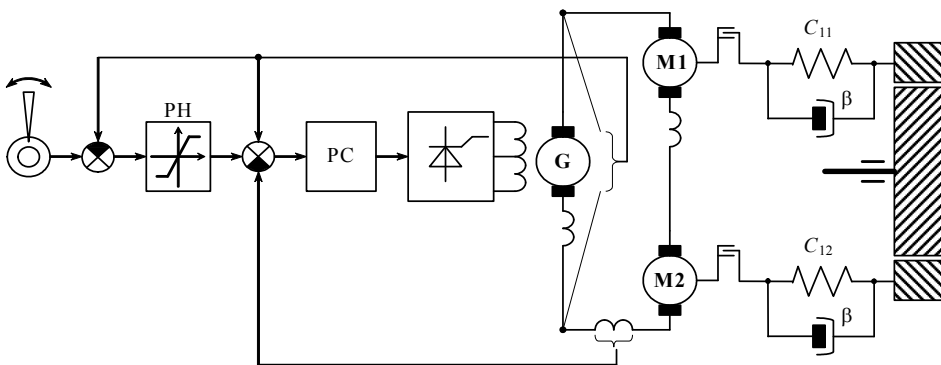
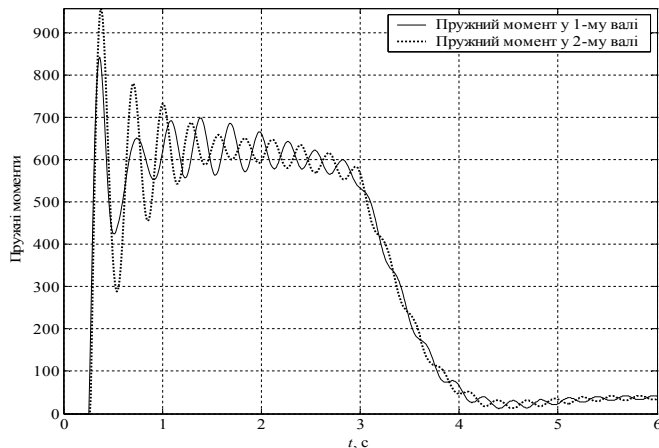


Рис. 1. Функціональна схема електроприводу обертання кар'єрного екскаватора

Перевірка пропонуваного підходу здійснювалася в середовищі MATLAB, який є всесвітньо визнаним пакетом числової математики. Для перевірки отриманих результатів використовувалися стандартні функції пакету (ode23, ode45, ode113) для розв'язування звичайних диференціальних рівнянь з автоматичним вибором кроку інтегрування із заданою точністю. Пропонуваний підхід забезпечував час розрахунку 0.016 с, для згаданих стандартних функцій MATLAB час обчислень зростає на два порядки і був у межах 1.11-2.18 с. Максимальне відхилення між обома результатами не перевищувало 0.5%. У випадку наявності значних люфтів стандартні функції MATLAB взагалі відмовлялися працювати.



Приклади результатів числового експерименту, а саме пружні моменти у валах механізму, показані на рис. 2.

Рис. 2. Пружні моменти під час пуску приводу обертання екскаватора

Висновки. Запропонований математичний підхід для комп'ютерного моделювання електромеханічних систем дозволяє досліджувати перехідні процеси в складних нелінійних об'єктах з високою точністю та значно вищою, порівняно зі стандартними методами, ефективністю.

Література

1. Shampine L., Reichelt M. The MATLAB ODE Suite: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/otherdocs/ode_suite.pdf.
2. Библиотека численного анализа НИВЦ МГУ. – 2007. – http://www.srcc.msu.su/num_anal/lib_na/libnal.htm.
3. В. Мороз. Особливості застосування числових методів у моделюванні сучасних електроприводів// Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 130-137.
4. Шипило В.П. Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.
5. Лозинський О. Ю., Мороз В. І. Синтез і моделювання цифрових електромеханічних систем на основі апроксимації інтегралу згортки// Сборник трудов конференции "Моделирование-2006 (Simulation-2006)". 16-18 травня 2006. Київ. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. – С. 309-313.
6. V. Moroz. High-Speed Precise Simulation Using Modified Z-Transform// Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. July 4-7, 2005, Lviv, Ukraine. – Pp. 184-186.
7. Мороз В. Моделювання електроприводів із застосуванням модифікованого Z-перетворення// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Тематичний випуск "Про-

блеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПІ".- 2005.- № 45. – С. 155-156.

THE MATHEMATICAL BASIS FOR THE COMPUTER SIMULATION OF THE CONTROLLED ELECTROMECHANICAL SYSTEMS USING CONVOLUTION INTEGRAL

The mathematical approach for the computer simulation of the controlled electromechanical systems using convolution integral with nonzero initial condition is proposed in this paper. This approach illustrated by the example – 10th order nonlinear model of the 3-mass 2-motor Ward-Leonard swing electric drive for miner shovel.

Лозинський О.Ю., Мороз В.І.

Математичні засади комп'ютерного моделювання керованих електромеханічних систем з використанням інтегралу згортки – Бібліогр.: 7 назв. – укр.

Пропонуються математичні засади комп'ютерного моделювання керованих електромеханічних систем на підставі інтегралу згортки з ненульовими початковими умовами. Використання такого підходу ілюструється прикладом нелінійної моделі 10-го порядку 3-масового 2-двигунного приводу обертання за системою Г-Д для кар'єрного екскаватора.

Ключові слова: Z-перетворення, рекурентні рівняння, інтеграл згортки, комп'ютерне моделювання, звичайні диференціальні рівняння

Лозинский О. Ю., Мороз В. И.

Математические основы компьютерного моделирования управляемых электромеханических систем с использованием интеграла свёртки. – Библиогр.: 7 назв. – укр.

Предлагается математический подход к компьютерному моделированию управляемых электромеханических систем на основе интеграла свёртки с ненулевыми начальными условиями. Использование такого подхода иллюстрируется примером нелинейной модели 10-го порядка 3-массового 2-двигательного привода поворота по системе Г-Д для карьерного экскаватора.

Ключевые слова: Z-преобразование, рекуррентные уравнения, интеграл свёртки, рекуррентные уравнения, компьютерное моделирование, обыкновенные дифференциальные уравнения

O. Lozynsky, V. Moroz

The mathematical basis for the computer simulation of the controlled electromechanical systems using convolution integral. – Bibliography: 7 titles. – Ukraine

The mathematical approach for the computer simulation of the controlled electromechanical systems using convolution integral with nonzero initial condition is proposed in this paper. This approach illustrated by the example – 10th order nonlinear model of the 3-mass 2-motor Ward-Leonard swing electric drive for miner shovel.

Keywords: Z-transformation, recurrent equations, convolution integral, computer simulation, ordinary differential equation.