

Д-р техн. наук П. Д. Андриенко¹, канд. техн. наук И. А. Орловский²,
канд. техн. наук В. П. Метельский²

¹ НДІ «Перетворювач» м. Запоріжжя, ² Запоріжський національний технічний університет

СИНТЕЗ БАЗОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НЕ ПОЛНОСТЬЮ ИЗВЕСТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Приведен метод синтеза в виде модифицированных рекуррентных нейронных сетей (МРНС) математических моделей электромеханических систем (ЭМС) с не полностью известной структурой по данным режима работы на примере модели асинхронного тягового электропривода (АТЭП) дизель-поезда (ДП) ДЭЛ-02.

Ключевые слова: математическая модель, электромеханическая система, модифицированная рекуррентная нейронная сеть, дизель-поезд, асинхронный тяговый электропривод.

Для повышения технико-экономических показателей (скорости движения, экономичности, простоты обслуживания) в ДП серии ДЕЛ производства ХК «Лугансктепловоз» применен АТЭП, что стало возможным благодаря созданию мощных полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов [1]. В настоящее время четыре ДП находятся в эксплуатации и три в разработке. При создании систем управления АТЭП ДП возникают проблемы, вызванные изменяющимися условиями работы ДП; сложностью математического описания совместной работы дизеля, генератора, механического движения ДП и его частей; существованием фрагментов объекта с не известной структурой математического описания; особенностями моторвагонной тяги и нелинейностями параметров АТЭП ДП [2]. Разработка самонастраивающихся систем управления с использованием средств искусственного интеллекта [3–5] ДП является актуальной.

При проектировании системы управления АТЭП ДП и при оптимальной ее настройке в процессе работы целесообразно использовать математическую модель ЭМС. В работе [6] методом моделирования исследована усовершенствованная система управления АТЭП с учетом механической части ДП. Оптимальная настройка регуляторов сложных ЭМС выполнена генетическими алгоритмами с использованием математической модели [5]. В работах [6–8] разработан метод синтеза математической модели в виде МРНС узлов АТЭП ДП по данным режима его работы при полностью известной (детерминированной) структуре математической модели.

На практике при разработке математической модели ЭМС известной является базовая структура модели, а точное знание деталей отсутствует. Это связано с рядом причин:

- ноу-хау разработчиков (узлы устройства могут рассматриваться как «черный» ящик);

- упрощенным математическим описанием процессов в объекте;

- отсутствием для отдельных узлов даже приближенных математических моделей.

Таким образом, любая ЭМС может рассматриваться как система с не полностью известной структурой математической модели. При этом могут быть известны определенные принципы ее построения.

Исходя из проведенного анализа, возникает задача разработки метода синтеза математической модели в виде МРНС для не полностью известной структуры ЭМС по данным режима ее работы. Ниже изложен алгоритм синтеза такой системы.

Структура математической модели в виде МРНС динамического нелинейного объекта строится по математическому описанию его работы в пространстве состояний [6–8] согласно следующей системе уравнений:

$$\dot{x}_B = A_B x_B + B_B u_B, \quad (1)$$

где x_B – базовый вектор состояния объекта,

$x_B = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T$; u_B – базовый вектор входных

сигналов, $u_B = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$; A_B – базовая матрица нелинейных коэффициентов, размером $q \times q$;

B_B – базовая матрица нелинейных коэффициентов, размером $q \times m$. Считаем, что измеряется весь вектор состояния и выход объекта равен вектору состояний.

Поиск структуры не известной части математической модели выполняется добавлением к базовой структуре различных наиболее вероятных фрагментов структур. При этом возможно появление новых диф-

ференциальных уравнений. Поиск структуры не известной части математической модели выполняется добавлением к базовой структуре различных наиболее вероятных фрагментов структур. При этом возможно появление новых диф-

ференциальных уравнений, что приводит к увеличению числа элементов вектора состояния a , следовательно, числа рекуррентных нейронов; новых уточняющих членов при описании нелинейностей и, в результате чего, добавлению элементов матриц A_B и B_B ; новых, не учитываемых ранее входных воздействий и, следовательно, добавлению элементов входного вектора u_B . Тогда система уравнений (1) примет следующий вид:

$$\dot{x}_{BD} = A_{BD}x_{BD} + B_{BD}u_{BD}, \quad (2)$$

где x_{BD} – расширенный элементами $x_{q+1}, x_{q+2}, \dots, x_Q$ вектор состояния объекта, $x_{BD} = [x_1, x_2, \dots, x_q, x_{q+1}, x_{q+2}, \dots, x_Q]^T$; u_{BD} –

расширенный элементами $u_{m+1}, u_{m+2}, \dots, u_M$ вектор входных сигналов,

$u_{BD} = [u_1, u_2, \dots, u_m, u_{m+1}, u_{m+2}, \dots, u_M]^T$; A_{BD} , B_{BD} – расширенные матрицы нелинейных коэффициентов, размеров $Q \times Q$ и $Q \times M$ соответственно.

Так как происходит добавление элементов вектора состояния, вектора входных сигналов, матриц A_B и B_B , то, в соответствии с этим, формируются дополнительные структуры в МРНС, реализуемые дополнительными блоками (рис. 1). В связи с изменением структуры корректируются алгоритмы обучения МРНС. Дополнительные блоки на рис. 1 показаны штриховыми линиями.

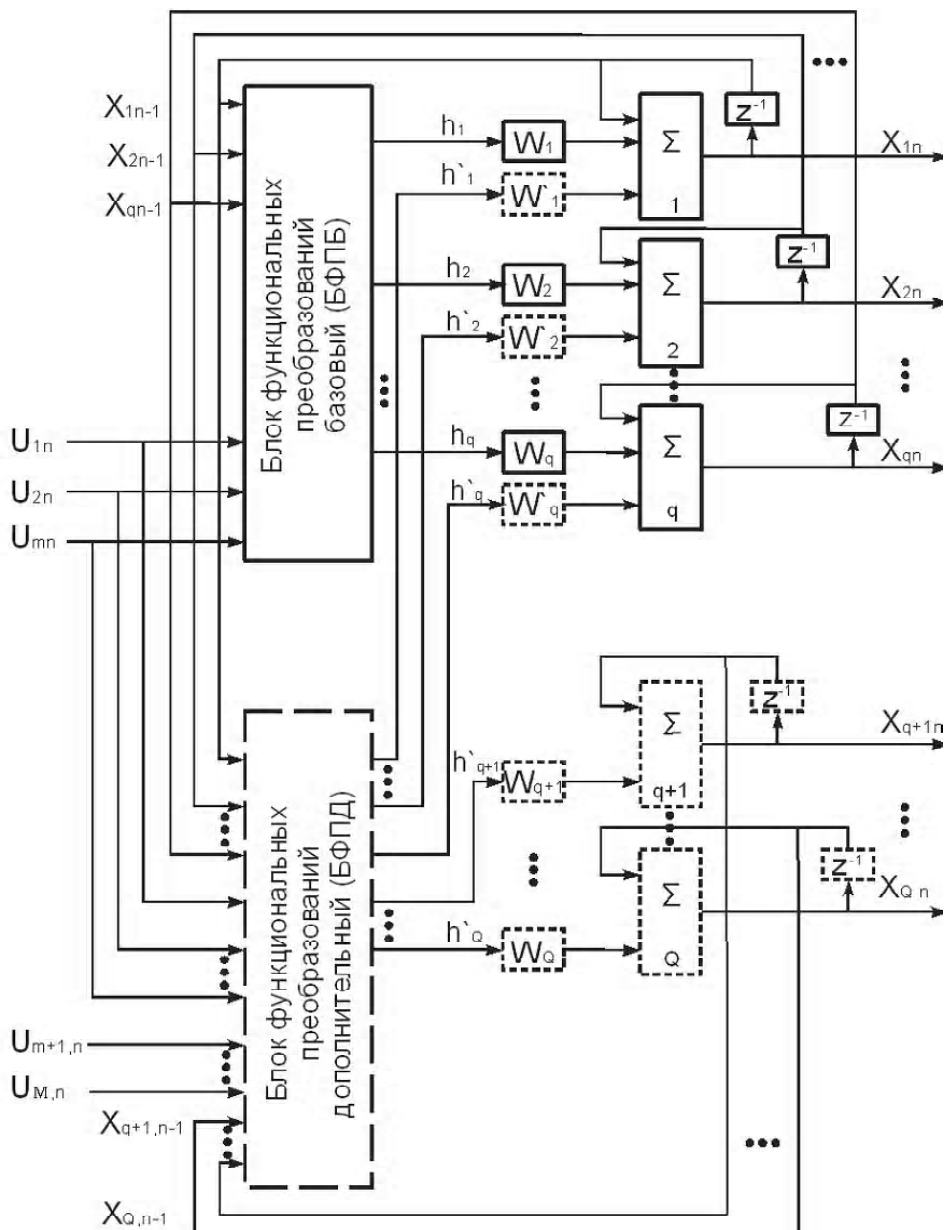


Рис. 1. Общий вид МРНС с изменяющейся структурой

Для обучения весовых коэффициентов базовой модели МРНС по данным режима работы измеряются через одинаковые такты времени (например, через 0,01 с) базовые векторы x_B , u_B и выполняются функциональные преобразования сигналов базовым блоком функциональных преобразований БФПБ для вычисления векторов h_i ($i = 1, \dots, q$). По значениям этих векторов и приращений за такт измерений элементов базового вектора состояния x_B для заданного набора данных осуществляется расчет или обучение весовых коэффициентов МРНС по методам, описанным в работах [6–8]. При добавлении структуры МРНС для обучения базовых нейронов 1, 2, ..., q к элементам вектора h_i ($i=1, \dots, q$) добавляются элементы вектора h_i' ($i = 1, \dots, q$) и формируется общий вектор h_i^* ($i=1, \dots, q$). Векторы h_i' и h_j' ($j=q+1, \dots, Q$) вычисляются дополнительным блоком функциональных преобразований БФПД, где используются также дополнительные входные сигналы u_{m+1}, \dots, u_M . Обучение весовых коэффициентов дополнительных нейронов $q+1, \dots, Q$ осуществляется по векторам h_j' и приращениям выходных сигналов этих нейронов.

Исходя из приведенных выше рассуждений, алгоритм синтеза математической модели ЭМС в виде МРНС при не полностью известной информации об объекте следующий.

1. По известной (базовой) структуре математической модели ЭМС разрабатывается структура математической модели в виде МРНС.

2. Выделяются места в математической модели ЭМС, где существует неопределенность.

3. Формируется множество структур неопределенной части, например, путем добавления полиномиальных членов для описания нелинейностей, с использованием идей Ивахненко А. Г. [3] (метод группового учета аргумента), либо добавлением нескольких новых наиболее возможных структур математического описания неопределенностей.

4. Каждая из добавленных структур преобразуется в дополнительные блоки, которые добавляются в базовую структуру модели в виде МРНС. Формируется столько МРНС, сколько возможных структур рассматривается.

5. Выполняется обучение или расчет (определение весовых коэффициентов) по обучающим наборам данных режима работы ЭМС всех сформированных моделей.

6. Осуществляется проверка обученных моделей на тестовом (не предъявляемом во время обучения) наборе данных. Выбирается модель, у которой имеется минимальная ошибка на обучающих и, главное, на тестовых данных. Такая модель имеет наиболее высокие обобщающие свойства.

7. По весовым коэффициентам выбранной модели в виде МРНС при необходимости идентифицируются внутренние параметры ЭМС.

Проверка возможности реализации данного алгоритма выполнена при разработке и сравнении математической модели АТЭП ДП. Ввиду сложности и невозможности точного математического описания всех узлов АТЭП ДП, а также неизвестного устройства его системы управления («черный ящик») разработана базовая математическая модель данной ЭМС. Выполнено сравнение этой модели с результатами промышленных испытаний и рассмотрено возможное уточнение ее структуры.

Исходные данные для построения модели следующие. ДП ДЭЛ-02, состоящий из трех вагонов: двух моторных (М1 и М2) и одного пассажирского (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид ДП ДЭЛ-02

В каждом моторном вагоне (рис. 3) установлено два тяговых асинхронных двигателя (ТАД) (Д1 и Д2 – в первом моторном вагоне, Д3 и Д4 – во втором), каждый из которых через редуктор приводит во вращение одну колесную пару. Связи между вагонами имеют упругости C_{12} , C_{23} и гасители колебаний B_{12} , B_{23} .

Тяговые двигатели каждого моторного вагона питаются от синхронного генератора через неуправляемые выпрямители (В1 и В2) и автономные инверторы напряжения (АИН1 и АИН2) (рис. 4). Генератор приводится во вращение дизелем, который оснащен регулятором мощности РД [2]. Для питания системы управления и вспомогательных механизмов установлен преобразователь частоты собственных нужд (ПЧСН), питающийся от В1 и В2.

Для управления движением поезда машинист задает частоту вращения дизеля (уровень мощности), изменяя позицию контроллера машиниста. Заданный уровень мощности, отработанный дизелем, сравнивается с мощностью, используемой АТЭП и оборудованием собственных нужд, и по запасу свободной мощности изменяется выходное напряжение и (или) частота на статорных обмотках синхронного генератора.

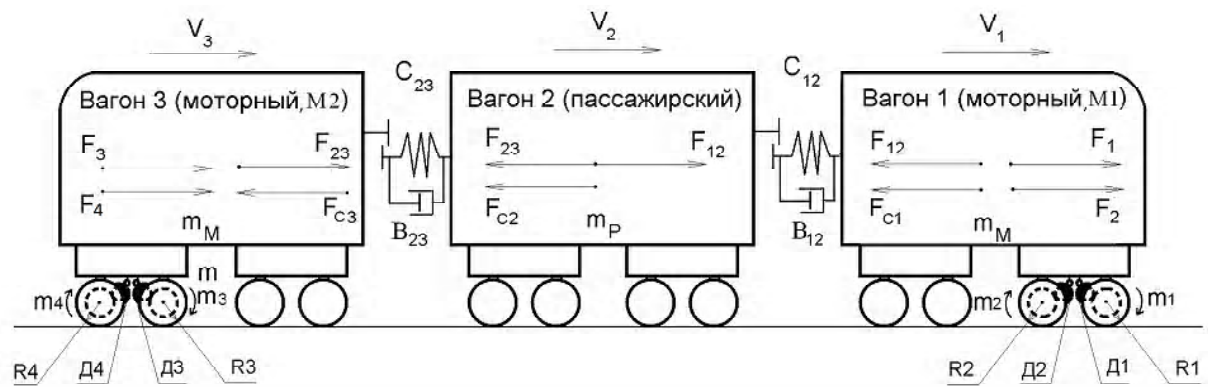


Рис. 3. Упрощенная схема ДП

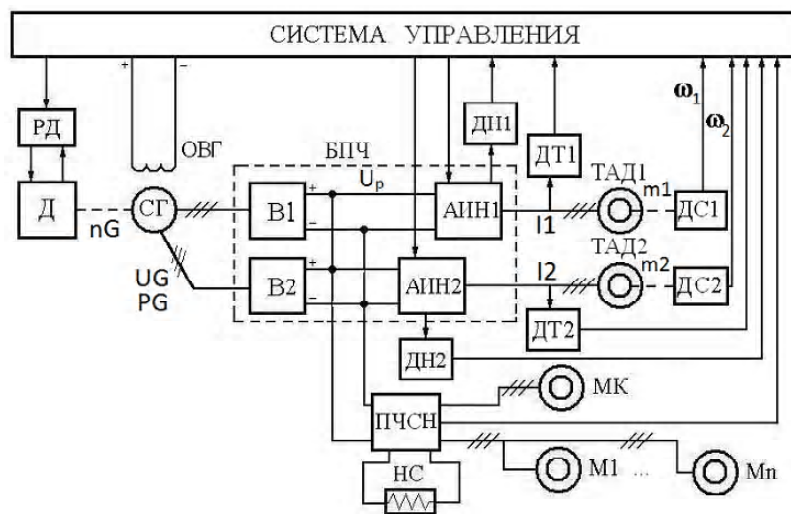


Рис. 4. Функциональная схема силовой электропередачи одного моторного вагона ДП ДЕЛ-02(04)

Характер движения ДП определяется свободной мощностью дизельной установки [2]. Управление оборудованием осуществляет комплектное устройство автоматики, на вход которого приходят сигналы от машиниста, сигналы управления мощностью от электронного регулятора дизеля и сигналы электрических и механических величин электропередачи.

По приведенному выше алгоритму при известных исходных данных и данных измерений разработана базовая математическая модель АТЭП ДП, особенности которой описаны в работах [9, 10]. В качестве неизвестной структуры системы управления ТАД в базовой структуре математической модели принят один из вариантов ее реализации – векторная система управления.

В математической модели АТЭП с векторной системой управления используются модели идеализированных ТАД и преобразователей частоты с АИФН-ШИМ, которые задавались в виде линеаризованных передаточных функций замкнутых контуров регулирования намагничивающей и активной проекций статорного тока, скорости двигателя [9, 10].

Общая базовая математическая модель АТЭП ДП имеет более 60 дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих основные составные части ЭМС и момент сопротивления. Для настройки совместной работы комплекса электроприводов использованы корректоры моментов ТАД и скорости вагонов.

Сравнение параметров режимов работы АТЭП ДП при промышленных испытаниях [9] и моделирования базовой математической модели показало возможность построения математических моделей в виде МРНС, адекватных реальному объекту при не полностью известном его устройстве.

Результаты измерений и моделирования параметров режима ДП при движении на ровном участке пути и создании моментов всеми четырьмя двигателями показаны на рис. 5. Графики процессов при отключении возбуждения синхронного генератора второго моторного вагона (тяговые моменты создаются двумя ТАД первого моторного вагона) и движении под уклон приведены на рис. 6. При этом на рис. 5, а и рис. 6, а даны результаты измерений на ДП.

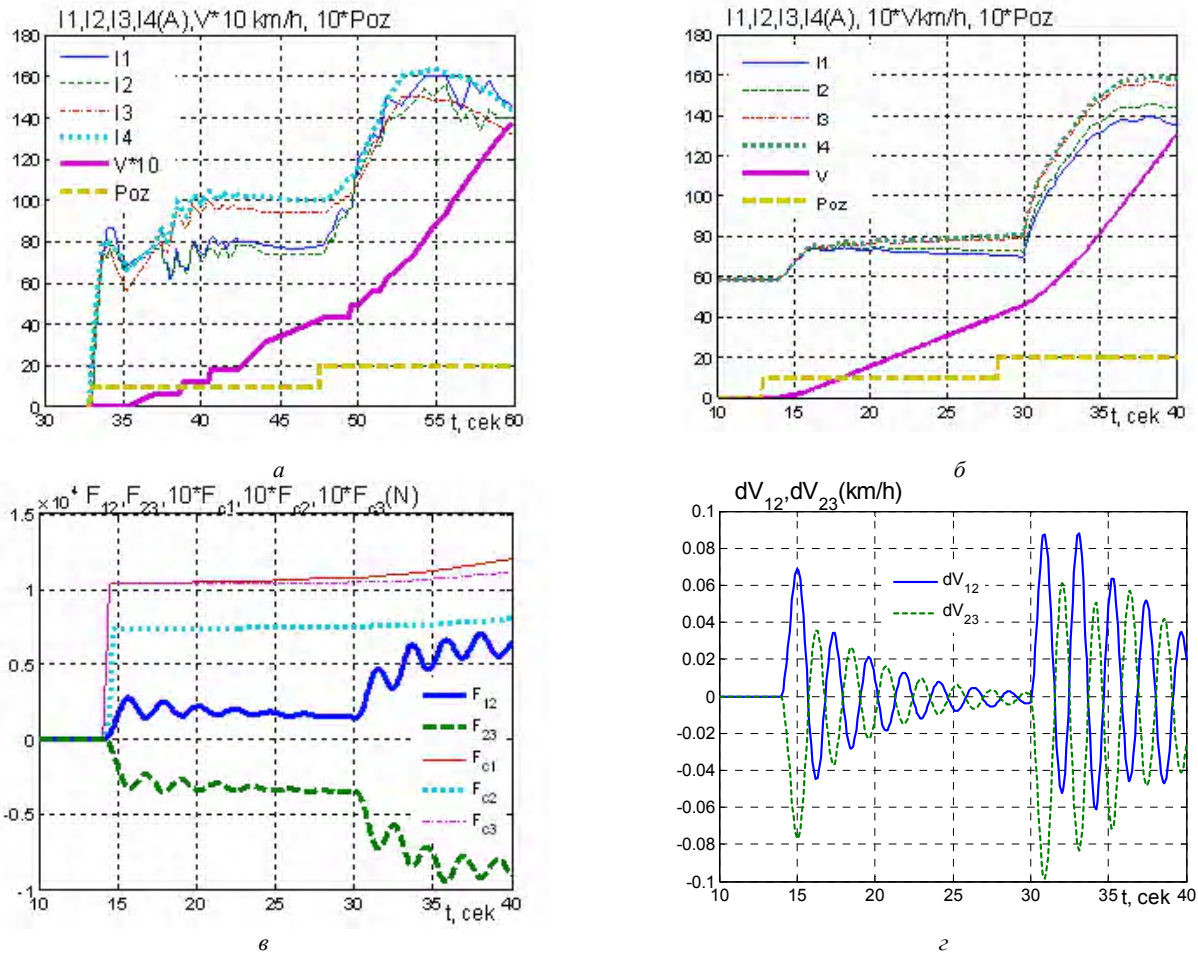


Рис. 5. Результаты измерений и моделирования параметров режима ДП при движении на четырех ТАД:

a, б – токов ТАД, скорости поезда и позиции контроллера машиниста при испытаниях и при моделировании соответственно, *в* – силы между вагонами и силы сопротивления движению каждого вагона, *г* – разности скоростей вагонов

При переключении контроллера машиниста в позицию 1 (сигнал *Poz*, рис. 5, *a*) начинается движение поезда, вызванное увеличением токов *I1 – I4* и моментов ТАД. При переключении контроллера в позицию 2 увеличиваются обороты дизелей и возрастает мощность генераторов. Токи ТАД ограничены, отличаются незначительно и составляют 150–160 А, ускорение ДП при этом максимальное и составляет 0,33 м/с².

При моделировании задавались значения позиции контроллера машиниста и скорости ДП такие же, как при реальном движении ДП. Сопротивления движению вагонов поезда F_{c1}, F_{c2}, F_{c3} вычислялись по уравнениям основного удельного сопротивления. Задавались небольшие отличия в радиусах колес – $R_1 = 0,4700$ м, $R_2 = 0,4704$ м, $R_3 = 0,4741$ м, $R_4 = 0,4750$ м (в обозначениях, сделанных на рис. 3).

Значения токов ТАД при измерениях и моделировании отличаются незначительно, что позволяет оценить адекватность модели и использовать ее для оценки других, не измеряемых параметров, и наблюдать процессы с различными системами управления. Так,

на рис. 5, *в* и рис. 6, *в*) показано изменение сил сопротивления движению вагонов ДП и сил, действующих между вагонами через сцепку (F_{12}, F_{23}). На рис. 5, *г* и рис. 6, *г* отображено изменение разности скоростей вагонов dV_{12} и dV_{23} . Из графиков видно, что при разгоне ДП двумя ТАД (рис. 6, *в*) одного моторного вагона развиваются на порядок большие силы между вагонами и возрастает их амплитуда колебаний, чем при разгоне всеми четырьмя ТАД (рис. 5, *в*).

В зависимости от целей исследования уточняется базовая структура математической модели и осуществляется ее обучение в виде МРНС. Такими уточнениями могут быть:

- изменения структуры СУ ТАД;
- изменения структуры СУ возбуждением синхронного генератора;
- изменения структуры общей СУ всем АГЭП ДП;
- уточнение моделей силовых преобразователей;
- учет упругостей пути и подвески вагонов, люфтов и других параметров.

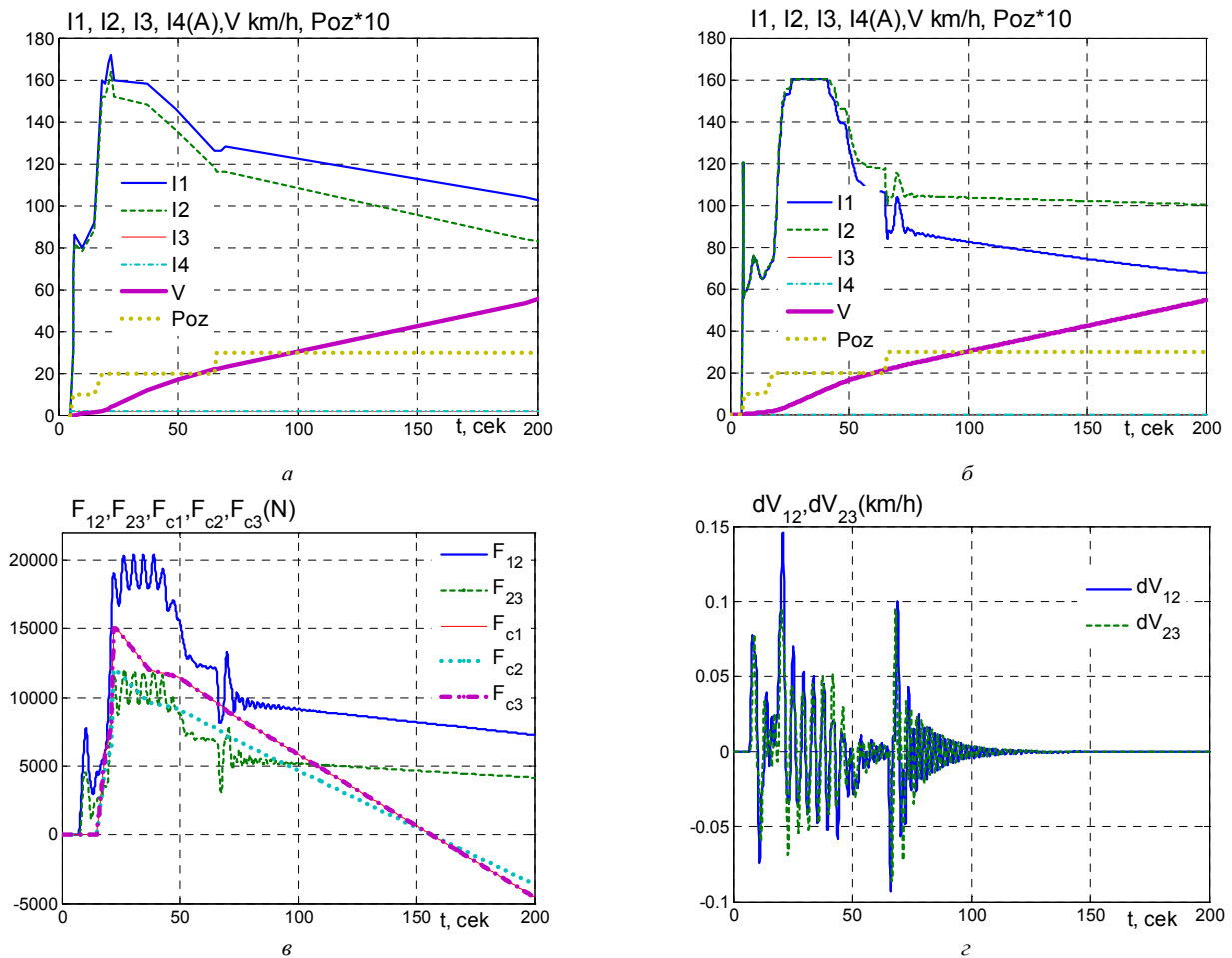


Рис. 6. Результаты измерений параметров режима ДП при движении на двух ТАД:

a, б – токов ТАД при испытаниях и при моделировании; *в* – силы между вагонами и силы сопротивления движению вагонов; *г* – разности скоростей вагонов

Вывод

Разработанный метод позволяет по данным режима работы ЭМС с не полностью известной структурой, с учетом требований к отдельным элементам синтезировать адекватную математическую модель системы тягового электропривода, в том числе по узлам с неизвестной информацией, что позволяет исследовать поведение механической части ЭМС, недоступной для измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриенко П. Д. Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта / П. Д. Андриенко, В. Д. Лобода, А. В. Мищенко // *Электротехника та електроенергетика*. – 2001. – № 1. – С. 55–58.
2. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В. И., Дмитриенко В. Д., Заполовский Н. И., Леонов С. Ю.]. – Харьков : ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248с. – (Научное издание).
3. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления / А. Г. Ивахненко. – К. : – Техніка, 1969. – 392 с.
4. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин ; [2-е изд.] ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
5. Орловский И. А. Настройка системы управления распределенного электропривода дизель-поезда генетическими алгоритмами / И. А. Орловский, Ю. Ю. Туник // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів : ЕКОінформ, 2009. – С. 443–446.
6. Орловский И. А. Математическая модель на рекуррентной нейронной сети механики движения вагонов дизель-поезда / И. А. Орловский, Ю. В. Голянчук // *Вісник Кременчуцького політехнічного університету*. – Кременчук. – 2009. – Вип. 3/2009 (056), Ч. 2. – С. 116–119.
7. Орловский И. А. Математические модели дизеля и синхронного генератора тягового электропривода дизель-поезда на нейронной сети / И. А. Орловский // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 2.
8. Орловский И. А. Расчет на рекуррентных нейронных сетях математических моделей асинхронного двигателя при питании от автономного инвертора напряжения / И. А. Орловский, Ю. В. Голянчук // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2009. – № 1. – С. 28–39.

9. Орловский И. А. Измерение параметров режима дизель-поезда ДЭЛ-02 во время эксплуатации и сравнение их с математической моделью. // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2010. – № 1. – С. 4–18.
10. Волков А. В. Математическая модель многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода дизель-поезда с векторной системой управления / А. В. Волков, И. А. Орловский // *Технічна електродинаміка : тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2008. – Ч. 6. – С. 31–36.

Надійшла до редакції 02.03.2011

Андрієнко П.Д., Орловський І.А., Метельський В.П. Синтез базової математичної моделі у вигляді модифікованої рекурентної нейронної мережі електромеханічної системи з не повністю відомої структурою

Наведено метод синтезу у вигляді модифікованих рекурентних нейронних мереж математичних моделей електромеханічних систем з не повністю відомої структурою за даними режиму роботи на прикладі моделі асинхронного тягового електропривода дизель-поїзда ДЭЛ-02.

Ключові слова: математична модель, електромеханічна система, модифікована рекурентна нейронна мережа, дизель-поїзд, асинхронний тяговий електропривод.

Andrienko P., Orlovsky I., Metelsky V. Synthesis of basic mathematical model in the form of modified recurrent neural network for electromechanical system with incompletely known structure

The authors describe the method of synthesis of mathematical models in the form of modified recurrent neural networks for electromechanical systems with incompletely known structure using the operating mode data. As an example the model of asynchronous drive of Diesel train DEL-02 is considered.

Key words: mathematical model, electromechanical system, modified recurrent neural network, Diesel train, asynchronous drive.

УДК 621.382

Канд. техн. наук Ю. О. Крисан, М. Ю. Залужний
Запорізький національний технічний університет

УНІВЕРСАЛЬНИЙ СТЕНД ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ І КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА MICROMASTER 440

Розроблено стенд для лабораторних практикумів з електротехнічних дисциплін на базі електропривода MICROMASTER 440 з використанням технології віртуальних приладів фірми National Instruments.

Ключові слова: стенд, електропривод, віртуальний прилад, математична модель, LABVIEW.

Вступ

Сучасні енергозберігаючі технології вимагають впровадження у виробництво новітнього електрообладнання, яке забезпечує оптимальні закони керування технологічним процесом. В промисловості отримали широке застосування обладнання таких відомих фірм, як Siemens, Schneider Electric, Moeller та інші. Підприємствам потрібні висококваліфіковані фахівці, здатні впроваджувати у виробництві сучасну техніку, її обслуговувати, експлуатувати, і з її допомогою вирішувати різного роду виробничі і наукові завдання. У зв'язку з цим істотно підвищується роль лабораторно-практикуму в навчальному процесі з використан-

ням сучасного обладнання та панелей віртуальних приладів [1–3]. Для підготовки фахівців, що задовольняють сучасним вимогам виробництва, проведенню наукових досліджень і робіт по вивченню законів керування асинхронними двигунами, на кафедрі «Електропривод та автоматизація промислових установок» Запорізького національного технічного університету розроблено лабораторний стенд електропривода змінного струму з використанням елементної бази фірми «Siemens».

Мета роботи – Створення універсального стенда для дослідження електропривода при різних законах керування асинхронним електродвигуном з використанням панелі віртуальних приладів.