

Питання управління в складних системах

УДК 621.3

В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко

Національний технічний університет «ХПИ», Харків

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ БОКСОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Предлагается способ обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда на основе нечёткой логики. Выполнена доработка математической модели тягового асинхронного привода, описана работа системы обнаружения и защиты от боксования и приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: боксование, тяговый асинхронный привод, дизель-поезд, нечёткая логика.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Блок обнаружения и защиты от боксования является неотъемлемой частью системы управления любого локомотива, так как боксование ведёт к потере тяги и повышенному износу рельс и бандажей колес локомотива. Так как боксование является стохастическим процессом, то стохастический характер имеет и функция изменения коэффициента сцепления. До настоящего времени не удалось создать единую теорию сцепления, которая учитывала бы всё многообразие факторов, оказывающих влияние на силу сцепления колес с рельсами, и с приемлемой точностью позволяла бы прогнозировать изменение величины этого коэффициента. Особенно мало изучен характер его изменения при скоростях ниже 10 км/ч [1]. Существующие противобоксовочные системы включают в себя устройства обнаружения боксования и подавления его развития. Для этого используются различные методы и средства, которые повышают коэффициент сцепления: механическая и химическая очистка рельсов, подсыпка песка, кратковременное снижение силы тяги, приложение на короткое время тормозной силы [2, 3].

В тяговых расчётах используют расчётную характеристику сцепления, которая представляется как безразмерная величина K_{ψ} , зависящая от относительной скорости скольжения колеса относительно рельса $V_{ск}$ (рис. 1).

Эту характеристику получают путём обобщения результатов экспериментальных исследований [4, 5] и на ней можно выделить три области:

– в области устойчивой реализации силы тяги (1) K_{ψ} изменяется пропорционально относительно скорости скольжения $V_{ск}$;

– в области (2) наблюдается неустойчивая реализация силы тяги;

– в области (3) K_{ψ} начинает снижаться и наступает боксование [6 – 8].

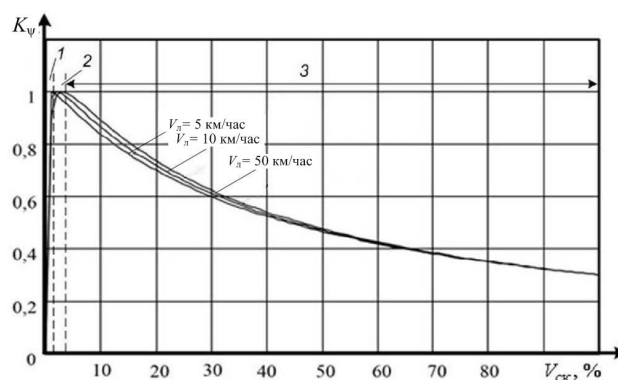


Рис. 1. Характеристика сцепления

Необходимо отметить, что процессы, протекающие в ТАД в каждой из областей, носят «размытый» характер. Поэтому в работе предлагается применить механизм нечёткой логики для реализации компьютерной подсистемы обнаружения боксования. В то же время, для получения характера изменения процессов, по которым будет производиться настройка подсистемы на нечеткой логике, необходимо иметь модель, которая бы адекватно отражала процессы в каждом из ТАД при возникновении боксования. В связи с этим, далее рассматривается разработка такой модели.

Целью статьи является разработка и исследование на математической модели способа обнаружения и защиты от боксования тягового асинхронного привода дизель-поезда.

Основная часть. Наиболее часто боксование выявляют по разности скоростей вращения колес-

ных пар; по ускорению колёсной пары; по разности токов тяговых двигателей; по скорости изменения тока тягового двигателя и др. Необходимо отметить, что процесс боксования требует дальнейшего изучения и в настоящее время нет такого метода, который бы не имел недостатков. Например, если сравнивать параметры боксующей и небоксующей колёсных пар, то если сцепление потеряют обе колёсные пары, защита от боксования может не сработать. Кроме этого, повышение чувствительности устройств обнаружения боксования приводит к ложным срабатываниям, а понижение чувствительности приводит к неспособности распознать начавшийся процесс боксования [9]. Эту задачу представляется возможным решить путём объединения нескольких подходов.

В качестве объекта регулирования рассматривается механическая часть тягового электропривода одного обмоточного вагона дизель-поезда ДЭЛ-02, включающая в себя два ТАД и два понижающих редуктора, представляемая как крутильная система, состоящая из двух колесных пар (КП) и вращающихся масс привода, моменты инерции которых приведены к осям КП. Математическая модель, описывающая такую систему и включающая уравнение движения дизель-поезда, имеет вид ($i = \overline{1, 2}$):

$$\frac{dS}{dt} = V_L; \tag{1}$$

$$\frac{d\phi_{p_i}}{dt} = \omega_{p_i}; \tag{2}$$

$$\frac{d\phi_{k_i}}{dt} = \omega_{k_i}; \tag{3}$$

$$J_{p_i} \frac{d\omega_{p_i}}{dt} = M_{T_i} - c_{дкi}(\phi_{p_i} - \mu_i \phi_{k_i}) - \beta_{дкi}(\omega_{p_i} - \mu_i \omega_{k_i}); \tag{4}$$

$$J_{k_i} \frac{d\omega_{k_i}}{dt} = c_{дкi}(\phi_{p_i} - \mu_i \phi_{k_i}) + \beta_{дкi}(\omega_{p_i} - \mu_i \omega_{k_i}) - M_{сцi} / \mu_i; \tag{5}$$

$$m \frac{dV_L}{dt} = \sum_{i=1}^2 M_{сцi} / (R_{k_i} \mu_i) - F_c, \tag{6}$$

где S – путь, пройденный дизель-поездом; t – время; V_L – линейная скорость движения дизель-поезда; ϕ_{p_i} , ϕ_{k_i} – углы поворота ротора i -го ТАД и i -й КП относительно оси вращения; ω_{p_i} , ω_{k_i} – соответственно частота вращения ротора i -го ТАД и i -й КП; J_{p_i} , J_{k_i} – моменты инерции ротора i -го ТАД и i -й КП; M_{T_i} – тяговый момент i -го ТАД; $c_{дкi}$ – жёсткость связи КП с ТАД; μ_i – передаточное число i -го редуктора; $\beta_{дкi}$ – коэффициент демпфирования связи КП с ТАД; $M_{сцi}$ – момент сцепления i -й КП с

поверхностью рельса; m – масса дизель-поезда; R_{k_i} – радиус колес i -й КП; F_c – сила сопротивления движению, в общем случае зависящая от линейной скорости движения дизель-поезда [5].

Математическую модель каждого из ТАД в неподвижной системе координат $(\alpha, \beta, 0)$ можно записать следующим образом [10]:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} - \gamma i_{s\alpha} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\alpha} + p\beta\omega \Psi_{r\beta}, \tag{7}$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} - p\beta\omega \Psi_{r\alpha}, \tag{8}$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\beta}, \tag{9}$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} + p\omega \Psi_{r\alpha}, \tag{10}$$

$$M_T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \tag{11}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_T - M_c), \tag{12}$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – соответственно проекции тока статора на оси α и β ; t – время; $\sigma = 1 - K_s K_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – полный коэффициент рассеяния; $K_s = L_m / L_s$; $K_r = L_m / L_r$; L_s, L_r, L_m – соответственно индуктивность статора, ротора и взаимная индуктивность; $L_m = \sqrt{(1 - \sigma) L_s L_r}$; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – соответственно проекции напряжения статора на оси α и β ; $\gamma = R_s / (\sigma L_s) + R_r L_m^2 / (\sigma L_s L_r^2)$; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\beta = L_m / (\sigma L_s L_r)$; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора; $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – соответственно проекции потокоцеплений ротора на оси α и β ; p – число пар полюсов; ω – частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции двигателя; M – тяговый момент ТАД; M_c – момент сопротивления движению [10].

Момент сцепления i -й колёсной пары с поверхностью рельса задается выражением ($i = \overline{1, 2}$):

$$M_{сцi} = K_{\psi}(V_{ск}) R_{k_i} \Psi_i P_i, \tag{13}$$

где $K_{\psi}(V_{ск})$ – характеристика сцепления i -й КП ($i = \overline{1, 2}$); Ψ_i – коэффициент сцепления; P_i – нагрузка КП на путь i -й КП.

Характеристику сцепления i -й КП можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией:

$$K_{\Psi_i}(V_{ск}) = \begin{cases} 0,33V_{ск}, & \text{если } 0 \leq V_{ск} < 3\%; \\ 1 - 0,0125(V_{ск} - 3), & \text{если } 3\% \leq V_{ск} < 43\%; \\ 0,5 - 0,0087(V_{ск} - 43), & \text{если } V_{ск} \geq 43\%. \end{cases} \tag{14}$$

Коэффициент сцепления i -й КП зависит от скорости движения дизель-поезда V_d . Данную зависимость для дизель-поезда можно представить в следующем виде:

$$\Psi_i = a_0 + \frac{a_1}{a_2 V_d + a_3}, \quad (i = \overline{1, 2}), \quad (15)$$

где a_0, \dots, a_3 – постоянные коэффициенты.

Так как при реализации тяги выделяются три области (рис. 1), то целесообразно получить изменение электромеханических процессов в каждой из них. Тогда по характеру изменения процессов можно определить область, в которой функционирует объект.

Для проектирования нечеткого контроллера, выполняющего задачу обнаружения боксования, необходимо выбрать процессы, которые наиболее информативно свидетельствуют о данном режиме. Исходя из анализа литературы, а также исследований, проведенных на разработанной модели, к таким процессам можно отнести следующие: разность скоростей вращения колесных пар; изменение тока каждого из ТАД; ускорение колесной пары.

Общая структура нечеткого контроллера приведена на рис. 2: X_1, X_2, X_3 – входные переменные; НК – нечеткий контроллер; ПНЗ – блок перехода к нечетким значениям; БП – база правил для нечеткого контроллера; БПП – блок применения правил; БД – база данных; ПЧЗ – блок перехода к четким значениям; Y – выходная переменная.

В качестве нечетких переменных рассматриваются следующие входные переменные: сигнал модуля разности скоростей вращения колесных пар (X_1); сигнал изменения тока ТАД (X_2); сигнал ускорения колесной пары (X_3). Каждая из этих переменных имеет следующие значения: NO – нормальное значение сигнала (без боксования); PRED – небольшое

отклонение от нормы (предбоксование); BOKS – большое отклонение от нормы (боксование).

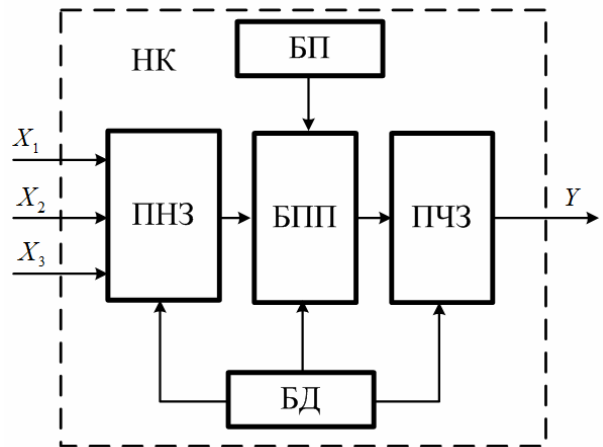


Рис. 2. Общая структура нечеткого контроллера

Правила, по которым работает нечеткий контроллер, строятся по типу:

1. если $X_1 = NO_1$ и $X_2 = NO_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = NO$,
2. если $X_1 = NO_1$ и $X_2 = PRED_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = NO$,
3. если $X_1 = PRED_1$ и $X_2 = PRED_2$ и $X_3 = NO_3$ то $Y = PRED$,
4. если $X_1 = PRED_1$ и $X_2 = BOKS_2$ и $X_3 = BOKS_3$ то $Y = BOKS$,
5. если $X_1 = BOKS_1$ и $X_2 = BOKS_2$ и $X_3 = PRED_3$ то $Y = BOKS$ и т.д.

Такой нечеткий контроллер ставится для каждого ТАД, что позволяет выявлять синхронное боксование. После обнаружения боксования, разработанная система выполняет его устранение.

Структурная схема системы обнаружения и защиты от боксования приведена на рис. 3.

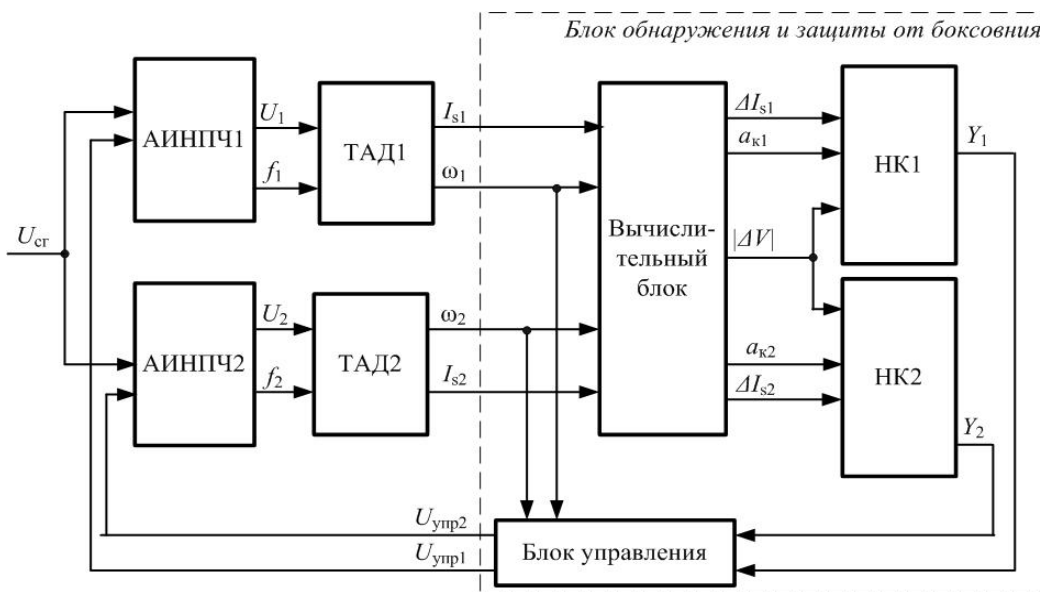


Рис. 3. Структурная схема системы обнаружения и защиты от боксования

На структурній схемі рис. 3 приведені наступні позначення ($i=1, 2$): U_{cr} – напруга синхронного генератора; АИНПЧ1 і АИНПЧ2 – автономні інвертори напруги – перетворювачі частоти; ТАД1 і ТАД2 – тягові асинхронні двигатели; НК1 і НК2 – нечіткі контролери; U_i , f_i – амплітуда і частота живлячого напруги; ω_i , I_{si} – частота обертання ротора і струм статора; ΔI_{si} – зміна струму статора i -го ТАД; a_{ki} – прискорення колісної пари; $|\Delta V|$ – модуль різниці швидкостей обертання колісних пар; Y_i – вихідний сигнал нечіткого контролера; $U_{упрi}$ – керуючий вплив.

Сигнали з виходів нечітких контролерів поступають на блок управління, який виробляє сигнали управління для АИНПЧ1 і АИНПЧ2. При наявності буксування система формує керуючі впливи, які обмежують амплітуду живлячого напруги ТАД буксуючої колісної пари.

Для перевірки розробленої моделі в момент часу $t_1 = 8$ сек (рис. 4) смодельовано ситуацію втрати сцеплення першої колісної парою, а в момент часу $t_2 = 8,1$ сек – другою колісною парою. Це виконано шляхом зменшення величини коефіцієнта сцеплення відповідної колісної пари.

Коли нечіткий контролер розпізнає процес буксування, амплітуда сигналу на його виході становить більше 0,5.

На рис. 4 показані сигнали на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при відсутності захисту від буксування (Y_1, Y_2).

На рис. 5 показані сигнали на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при наявності захисту від буксування (Y_1^*, Y_2^*).

Відмінно від наведених на рис. 4 сигналів, завдяки спрацюванню захисту від буксування, сигнали на виході нечітких контролерів в момент часу $t = 11,5$ сек. стають менше 0,2, що сигналізує про припинення буксування.

На рис. 6 наведені графіки зміни швидкостей колісних пар при наявності (V_{k1}^*, V_{k2}^*) і при відсутності захисту від буксування (V_{k1}, V_{k2}).

З наведених залежностей (рис. 6) видно, що при відсутності захисту від буксування швидкості колісних пар V_{k1} і V_{k2} поступово зростають, що свідчить про наявність буксування.

В разі наявності захисту від буксування, швидкості колісних пар V_{k1}^* і V_{k2}^* в момент часу $t = 11$ сек. повернулися до норми, що свідчить про припинення буксування.

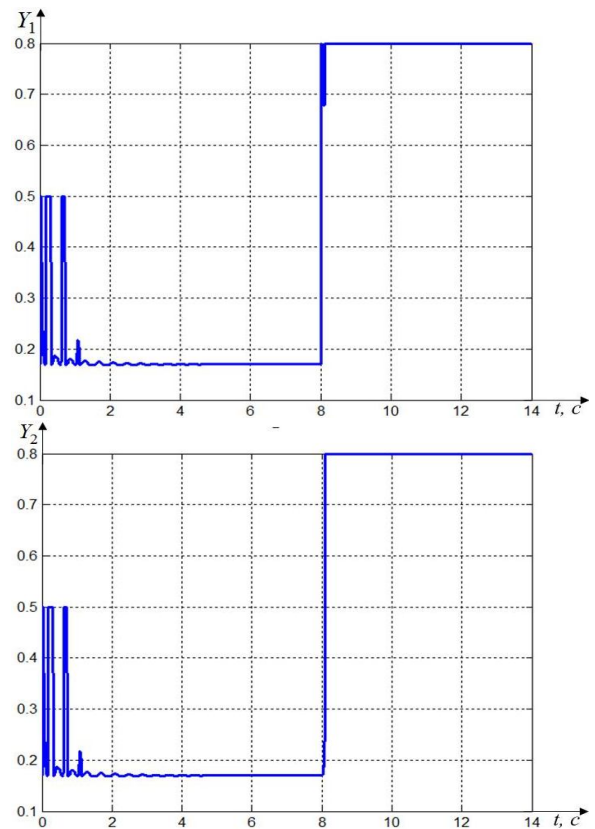


Рис. 4. Сигнали Y_1 і Y_2 на виході нечітких контролерів при синхронному буксуванні (при відсутності захисту від буксування)

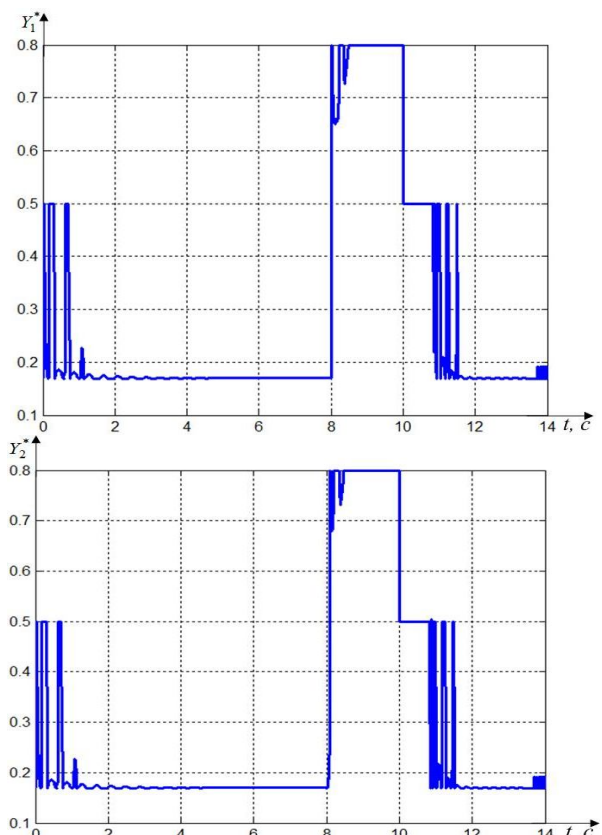


Рис. 5. Сигнали Y_1^* і Y_2^* на виході нечітких контролерів НК1 і НК2 при синхронному буксуванні (при наявності захисту від буксування)

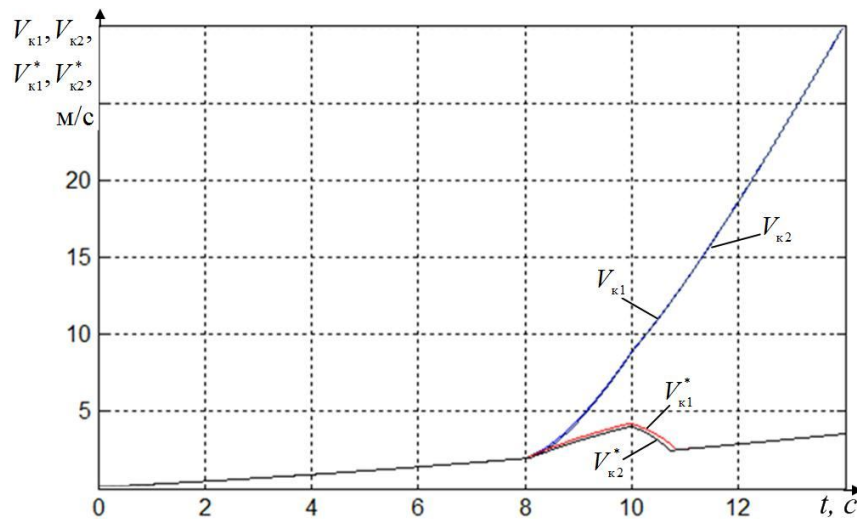


Рис. 6. Графіки змінення швидкостей колісних пар при синхронному боксованні

Выводы

Для дослідження тягових асинхронних приводів розроблена математична модель, що дозволяє досліджувати як синхронне, так і несинхронне боксовання. Предложено спосіб виявлення та захисту від боксовання, який має універсальність і дозволяє виконувати ефективну захисту від боксовання. Це підтверджується результатами досліджень на математичній моделі.

Список литературы

1. Самме Г.В. Новые результаты в теории сцепления локомотива / Г.В. Самме // Транспорт российской федерации. Подвижной состав. – 2010. – № 3 (28). – С. 14 – 16.
2. Андриенко П.Д. Исследование переходных режимов при последовательном соединении серийных электродвигателей постоянного тока / П.Д. Андриенко, С.И. Шило, А.О. Каплиенко, И.Ю. Немудрый // Электротехника та електроенергетика. Науковий журнал. – Запоріжжя: 2009. – №1. – С. 10 – 16.
3. Фролов А.В. Повышение тяговых свойств тепловозов / А.В. Фролов // Известия ПГУПС. Исторические аспекты науки и техники. – 2011. – № 1. – С. 391 – 402.
4. Pichlik P. Overview of Slip Control Methods Used in Locomotives / P. Pichlik, J. Zdenek // Transactions on Electrical Engineering. – 2014. – № 2. – Vol. 3. – P. 38 – 43.
5. Усов В.А. Тяговая устойчивость при взаимодействии колёсной пары локомотива с рельсами. / В.А. Усов

// Транспорт урала. УрГУПС. – 2015. – №1 (44). – С. 97– 101.

6. Процив В.В. Алгоритм работы системы регулирования тягового усилия шахтного локомотива / В.В. Процив, А.М. Твердохлеб // Вісник КНУ. – Кривий Ріг: 2012. – № 32. – С. 234 – 239.

7. Артеменко А.Н. Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электровоза / А.Н. Артеменко // Електромеханічні системи та автоматизація. Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 4 (63). – С. 56 – 58.

8. Зиборов К.А. Принципы построения системы согласования тягового усилия приводных колесных пар шахтного локомотива / К.А. Зиборов, А.М. Твердохлеб, С.А. Воскобойник // Гірнична електромеханіка та автоматика. Вісник КНУ. – 2012. – № 88. – С. 115-120.

9. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия. – 1974. – 328 с.

10. Попов А.Н. Антибоксовочная система управления движением рельсового подвижного состава / А.Н. Попов, И.А. Радионов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №8. – С. 201 – 211.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ВІД БОКСУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В.Д. Дмитрієнко, В.І. Носков, М.В. Мезенцев, Г.В. Гейко

Пропонується спосіб перевірки і захисту від боксування тягового асинхронного приводу дизель-потяга на основі нечіткої логіки. Виконано доопрацювання математичної моделі тягового асинхронного приводу, опису роботи системи контролю та захисту від боксування і наводяться результати моделювання.

Ключові слова: боксування, тяговий асинхронний привід, дизель-потяг, нечітка логіка.

METHOD OF DETECTION AND PROTECTION FROM DIESEL-TRAIN BOXING BASED ON FINE LOGIC

V.D. Dmitrienko, V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, G.V. Geiko

A method is proposed for detecting and protecting from traction of a traction asynchronous drive of a diesel train on the basis of fuzzy logic. The mathematical model of the traction asynchronous drive has been modified, the operation of the detection and protection against boxing system is described and the results of the simulation are given.

Keywords: boxing, traction asynchronous drive, diesel train, fuzzy logic.