

УДК 629.4-592

МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ЗІ СКАЛЯРНИМ ЗАКОНОМ КЕРУВАННЯ

Кандидати техн. наук С. І. Яцько, Я. В. Ващенко, асп. А. М. Сидоренко

МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ СО СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Кандидаты техн. наук С. И. Яцко, Я. В. Ващенко, асп. А. Н. Сидоренко

MODEL OF THE TRACTION ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN THE MODE ELECTRODYNAMIC BRAKING WITH A SCALAR CONTROL SYSTEM

PhD in technical science С. I. Yatsko, Y. V. Vaschenko,
postgraduate student А. М. Sydorenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.177.2018.136575>

Дана стаття присвячена проблемі роботи тягового асинхронного електропривода (ТАЕП) у штатних та аномальних умовах у режимі електродинамічного гальмування. Запропонована імітаційна модель дозволяє проводити дослідження динамічних процесів, які виникають у тяговому асинхронному електроприводі при русі на ділянках з різним коефіцієнтом зчеплення колісних пар з рейкою з урахуванням основного та додаткового опорів руху.

Ключові слова: асинхронний двигун, гальмування, математична модель, електропривод.

Данная статья посвящена проблеме работы тягового асинхронного электропривода в штатных и аномальных условиях в режиме электродинамического торможения. Предложенная имитационная модель позволяет проводить исследования динамических процессов, возникающих в тяговом асинхронном электроприводе при движении на участках с разным коэффициентом сцепления колесных пар с рельсом, а также с учетом основного и дополнительного сопротивлений движения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, торможение, математическая модель, электропривод.

This article is devoted to the problem of traction asynchronous electric drive operation in normal and abnormal conditions in the mode of electrodynamic braking. The proposed simulation model allows us to study the dynamical processes that arise in a traction asynchronous electric drive while driving on sections with different coupling coefficient of wheel pairs with a rail. The simulation model is rather versatile, which allows us to analyze in detail the electromagnetic and electromechanical processes occurring in a frequency controlled driven asynchronous electric drive taking into account changing conditions of rolling stock operation in electrodynamic braking, to evaluate the energy and operational parameters, to investigate the influence of parameters of the frequency converter, traction engine, parameters links of direct current to the nature of the transition processes, using modern methods of mathematics some simulation. As an example, the

results of the simulation of a traction asynchronous electric motor with a scalar control law in the mode of electrodynamic braking with stabilization of the voltage in the DC link and the control of the braking effort, depending on the coupling coefficient of the wheel coupling with the rail, are given. The proposed system of protection against excessive slipping and skid wheel pairs can prevent the occurrence of abnormal operating mode of the traction asynchronous electric drive in the mode of traction and electrodynamic braking with a sharp change in the coupling coefficient of the wheel coupling with a rail, to identify the restoration of a satisfactory coupling coefficient and to analyze the need for adjusting the traction and braking torque of the traction asynchronous electric motor depending on the condition of the surface of the rails.

Key words: asynchronous motor, braking, mathematical model, electric drive.

Вступ. Останнє десятиріччя характеризується світовою тенденцією розширення сфери застосування регульованого електропривода змінного струму. Це обумовлено в основному двома обставинами: по-перше, наявністю технічних розробок у сфері регульованого електропривода змінного струму; по-друге, необхідністю впровадження ресурсо- та енергозберігаючих технологій [1]. Однак, як показує досвід застосування таких систем на залізничному транспорті в нашій країні і за кордоном і велика кількість публікацій з даної проблематики, багато наукових і практичних проблем ще не вирішено. Це стосується і дослідження різних режимів роботи ТАЕП, у тому числі режиму електричного гальмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у сфері тягового асинхронного електропривода ведеться багатьма науковцями, до яких належать А. М. Муха [2], А. Б. Воронко [3] та багато інших. Значний внесок у сфері частотно керованого асинхронного електропривода з урахуванням режиму електродинамічного гальмування зробили З. М. Воронова, розглянувши питання розроблення асинхронних двигунів з урахуванням перехідних процесів при електродинамічному гальмуванні [4], В. С. Копирін, провівши досить глибоке дослідження гальмівних режимів системи перетворювач частоти - двигун [5], а також А. О. Ткачук, дослідивши перехідні процеси електродинамічного гальмування асинхронного двигуна

при живленні від перетворювача частоти з широтно-імпульсною модуляцією [6].

Провідні фірми, такі як Siemens, General Electric, продовжують роботи з дослідження відомих і нових систем управління, при цьому обмежуючи доступ до алгоритмів роботи. Тому розвиток власної наукової бази проектування надійного та конкурентного тягового рухомого складу потребує проведення широкого спектра досліджень, у тому числі шляхом імітаційного моделювання.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження режимів роботи ТАЕП зі скалярним законом керування при електродинамічному гальмуванні в штатних та аномальних умовах шляхом створення імітаційної моделі та моделювання руху поїзда з частотно керованим тяговим асинхронним електроприводом на ділянках з різним потенціальним значенням коефіцієнта зчеплення колісних пар з рейкою. Для досягнення визначеної мети вирішувалися такі завдання:

- встановлення особливостей роботи ТАЕП зі скалярним законом керування при електродинамічному гальмуванні;
- розроблення математичної моделі ТАЕП з урахуванням роботи рухомого складу на ділянках з різним коефіцієнтом зчеплення колісних пар з рейкою;
- проведення імітаційного моделювання математичної моделі ТАЕП з урахуванням роботи рухомого складу на ділянках з різним коефіцієнтом зчеплення колісних пар з рейкою.

Основна частина дослідження. Як правило, сучасний тяговий асинхронний електропривод є електромеханічним комплексом, що включає в себе в якості основних елементів, крім тягових асинхронних двигунів, інвертора, ланки постій-

ного струму та гальмівного модуля, датчики швидкості, датчики струму та напруг, систему керування, драйвери керування силовими напівпровідниковими ключами (рис. 1), а також механізм, що передає і перетворює крутний момент двигуна.

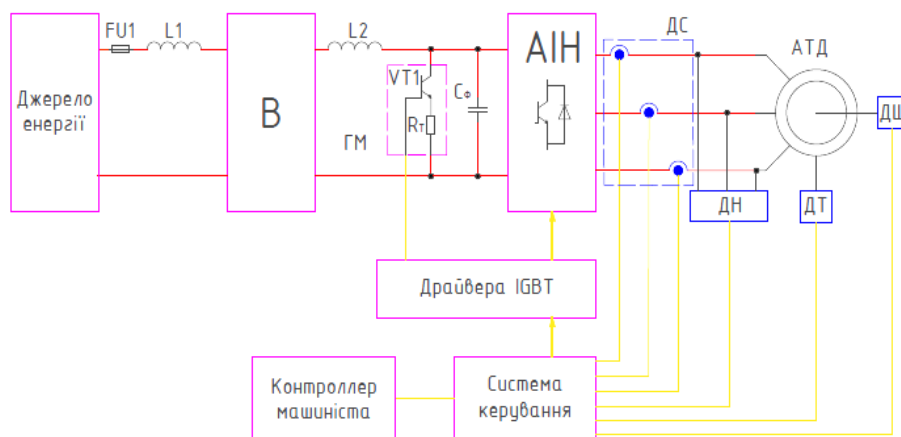


Рис. 1. Структурна схема сучасного тягового асинхронного електропривода:

FU1 – захисне обладнання; L1 – вхідний (мережевий) реактор; В – вхідний випрямляч; L2 – дросель постійного струму; ГМ – гальмівний модуль; C_{ϕ} – конденсатор фільтра ланки постійного струму; АІН – трифазний мостовий інвертор напруги; АТД – асинхронний тяговий двигун; ДС – датчики фазних струмів; ДН – датчики лінійних напруг двигуна; ДШ – цифровий датчик швидкості; ДТ – датчик температури тягового асинхронного двигуна

Електродинамічне гальмування є різновидом електричного гальмування, при якому гальмівний ефект створюється за рахунок перетворення накопиченої кінетичної енергії рухомого складу в електричну завдяки електромеханічному перетворювачу, що працює в генераторному режимі. У загальному випадку даний тип гальмування супроводжується генерацією енергії, що призводить до зростання напруги в ланці постійного струму у зв'язку з односторонньою провідністю нереверсивного випрямляча В. Для підтримання необхідного рівня напруги в ланці постійного струму використовують так званий гальмівний модуль ГМ, що по суті є гальмівним резистором у поєднанні з напівпровідниковим керованим ключем, ввімкнених послідовно, для розсіювання енергії гальмування. При цьому електрична енергія витрачається на покриття втрат в АТД, в

елементах АІН та гальмівному резисторі R_r . Отже, у режимі електродинамічного гальмування АТД працює в генераторному режимі з самозбудженням через АІН.

Основну роль у реалізації електродинамічного гальмування відіграє АІН. Він виконує дві функції: задає частоту обертання електромагнітного поля статора АТД, що дозволяє забезпечувати необхідне проковзування, і забезпечує обмін необхідною реактивною енергією між фазами двигуна. Для нормальної роботи ТАЕП на вході АІН використовується конденсатор великої ємності C_{ϕ} , який створює коло для протікання реактивного струму АТД, що дозволяє забезпечувати необхідне проковзування, і забезпечує обмін необхідною реактивною енергією між фазами двигуна. Для нормальної роботи ТАЕП на вході АІН використовується конденсатор великої ємності C_{ϕ} , який створює коло для протікання реактивного струму АТД, що дозволяє забезпечувати необхідне проковзування, і забезпечує обмін необхідною реактивною енергією між фазами двигуна. Для нормальної роботи ТАЕП на вході АІН використовується конденсатор великої ємності C_{ϕ} , який створює коло для протікання реактивного струму АТД, що дозволяє забезпечувати необхідне проковзування, і забезпечує обмін необхідною реактивною енергією між фазами двигуна. Для нормальної роботи ТАЕП на вході АІН використовується конденсатор великої ємності C_{ϕ} , який створює коло для протікання реактивного струму АТД, що дозволяє забезпечувати необхідне проковзування, і забезпечує обмін необхідною реактивною енергією між фазами двигуна.

ємність C_ϕ , а лише взяти до уваги, що є ніби джерело реактивного струму, яке забезпечує в будь-якому режимі роботи реактивну складову струму статора АТД [5].

Фізична картина перехідних процесів в АТД дещо відрізняється від встановленого режиму. Енергія, накопичена в масах привода, електромагнітному полі АТД і конденсаторі C_ϕ , розсіюється в тих же елементах, що і у встановленому режимі електродинамічного гальмування. Однією з відмінних рис перехідного процесу є активна роль при гальмуванні конденсатора фільтра в ланці постійного струму C_ϕ . Його ємність багато в чому визначає вид перехідного процесу. На характер протікання перехідного процесу електродинамічного гальмування АТД впливають також опір гальмівного резистора R_r ; темп зниження частоти на виході АІН, який у більшості випадків визначає тривалість гальмування, момент інерції привода; момент опору руху і параметри АД [5].

При здійсненні математичного моделювання ТАЕП прийнято загальноприйняті (класичні) допущення в моделюванні. У трифазному короткозамкненому асинхронному двигуні статорні та роторні обмотки всіх трьох фаз симетричні та однакові; повітряний проміжок між статором і ротором залишається незмінним при роботі двигуна (відсутність ексцентриситету і дисбалансу); не враховується неоднорідність магнітного кола двигуна (синусоїдальний розподіл вздовж повітряного проміжку); активні

опори та індуктивності схеми заміщення асинхронного двигуна в процесі роботи залишаються незмінними; трифазна система симетрична (відсутній нульовий струм); характеристика намагнічування машини лінійна; не враховуються втрати на вихрові струми та гістерезис у сталі асинхронного двигуна [7]. При моделюванні статичних перетворювачів їх подають у вигляді комутаційних функцій [8], логічної моделі [9] або з застосуванням уточнених моделей, відповідних типу транзистора (діода) [10]. Основним є питання про спосіб моделювання напівпровідникових вентилів: ідеалізованими (спрощене моделювання ідеальними ключами) або деталізованими напівпровідниковими пристроями, що в останньому випадку може призводити до ускладнення моделі. При моделюванні вхідного випрямляча, гальмівного модуля, АІН прийнято таку систему допущень: напівпровідникові пристрої приймаються безінерційними, тобто процеси їх комутації (переходу з закритого стану у відкритий і навпаки) не враховуються; часовими затримками перемикачів можна нехтувати (перемикач напівпровідникових пристроїв проходить миттєво); транзисторні ключі управляються імпульсними впливами одичної амплітуди ($g=1$); ключі IGBT мають малий опір у відкритому стані ($R_\phi=10^{-2}$ Ом) і великий опір у закритому стані ($R_\phi=10^6$ Ом) [10].

Узагальнена система рівнянь для математичного опису асинхронного двигуна має вигляд

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s \\ \bar{U}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\psi}_r \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \\ \bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \\ M_\delta = \frac{3}{2} p_{II} \frac{L_m}{L_r} \cdot \text{Mod}(\bar{i}_s \times \bar{\psi}_r) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_\delta - M_c)}{J} \end{cases} \quad (1)$$

де \bar{U}_s – вектор напруги статора;
 R_s – активний опір статора;
 \bar{i}_s – вектор струму статора;
 $\bar{\psi}_s$ – вектор потокозчеплення статора;
 ω_k – швидкість обертання поля;
 R_r – активний опір ротора;
 \bar{i}_r – вектор струму ротора;
 $\bar{\psi}_r$ – вектор потокозчеплення ротора;
 ω – швидкість обертання ротора;
 L_s – індуктивність статора;
 L_m – індуктивність намагнічування;
 L_r – індуктивність ротора;
 M_δ – електромагнітний момент двигуна;
 p_Π – кількість пар полюсів;
 M_c – момент опору руху;
 J – момент інерції двигуна.

Процеси, що відбуваються в ланці постійного струму при електродинамічному гальмуванні, описуються такою системою рівнянь [5]:

$$\begin{cases} i_{C_\phi} = C_\phi \cdot \frac{du_{dc}}{dt} \\ i_T = g_T \cdot u_{dc} \\ i_{C_\phi} + i_T + i_{dc} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

де i_{C_ϕ} – струм конденсатора фільтра C_ϕ ;
 C_ϕ – конденсатор фільтра ланки постійного струму;
 u_{dc} – напруга ланки постійного струму;
 i_T – струм гальмівного модуля;
 g_T – провідність силового резистора гальмівного модуля;
 i_{dc} – вхідний струм АІН.

Дану систему рівнянь можна привести до одного диференціального рівняння

$$\frac{C_\phi}{g_T} \cdot \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = -\frac{1}{g_T} \cdot i_{dc}. \quad (3)$$

Для визначення гальмівного зусилля ТАЕП, що реалізується, передбачена модель зчеплення колісних пар з рейкою.

Поточне значення коефіцієнта зчеплення визначається як [11, 12]

$$\psi_i = R_i \cdot \psi_{0i} \cdot \psi_{\delta i}, \quad (4)$$

де R_i – коефіцієнт, який враховує зміну умов зчеплення i -ї колісної пари ($0 < R_i \leq 1$);

ψ_{0i} – потенціальне значення коефіцієнта зчеплення i -ї колісної пари;

$\psi_{\delta i}$ – значення коефіцієнта зчеплення в часткових одиницях i -ї колісної пари, визначеного за універсальною характеристикою зчеплення $\psi_\delta = \psi/\psi_0 = f(u/v)$, де $u_i = v_i - v$ – величина проковзування i -ї колісної пари; v – швидкість руху.

Щодо величини проковзування i -ї колісної пари відносно рейки, то вона визначається шляхом розв'язування диференціального рівняння

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{(F_i - P_i \cdot \psi_i)}{J_i}, \quad (5)$$

де F_i – тягове (гальмівне B_i) зусилля на ободі колісної пари, створюване тяговим електричним двигуном;

P_i – вага локомотива, що припадає на i -ту колісну пару;

ψ_i – реалізований коефіцієнт зчеплення;

J_i – момент інерції, приведений до осі i -ї колісної пари;

v_i – дотична (лінійна) швидкість i -ї колісної пари;
 i – номер колісної пари.
 У свою чергу швидкість руху рухомого складу визначається як

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\sum P_i \cdot \psi_i + \sum W)}{(1 + \gamma) \cdot \sum M}, \quad (6)$$

де v – швидкість руху;

$\sum P_i \cdot \psi_i$ – сумарне тягове (гальмівне) зусилля, що реалізується;
 $\sum W$ – сумарний опір руху поїзда;
 $\sum M$ – сумарна маса поїзда.
 $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас.

На рис. 2 наведена структурна схема скалярної системи керування, що дозволяє формувати необхідне співвідношення між f і U .

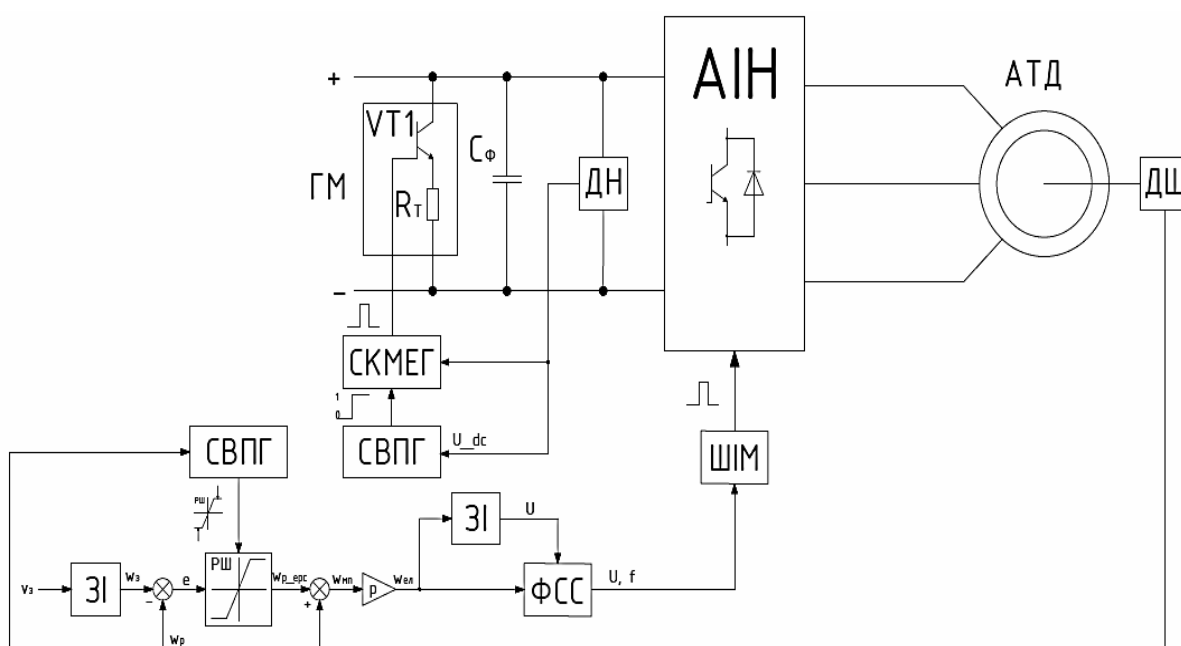


Рис. 2. Структурна схема скалярної системи керування тягового асинхронного електропривода:

ЗІ – задавач інтенсивності; РШ – регулятор швидкості; СЗНП – система захисту від надлишкового проковзування та юза колісних пар; СВПГ – система з визначення переходу в режим електродинамічного гальмування; СКМЕГ – система керування модулем електродинамічного гальмування; ФП – функціональний перетворювач; ФСС – формувач синусоїдальних сигналів; ШІМ – модуль формування сигналів керування АІН

Формування частоти напруги статора f здійснюється шляхом сумування частоти обертання ротора і частоти роторної ЕРС з урахуванням кількості пар полюсів двигуна. Формування величини роторної ЕРС здійснюється регулятором швидкості

(РШ), вхідним сигналом якого є різниця між швидкістю задавання руху на виході задавача інтенсивності (ЗІ) і дійсною швидкістю руху рухомого складу w_p . Регулятор швидкості являє собою

пропорційно-інтегральний регулятор з обмеженням сигналу керування. Коефіцієнти пропорційної і інтегральної частини $K_{II}=15$, $K_I=0,02$. Обмеження сигналу в режимі тяги відбувається на рівні 1,6 рад/с, а в режимі гальмування – 1,2 рад/с, що необхідно для запобігання перевищенню величини струму статора при великих змінах сигналу задавання швидкості та підтримання проковзування двигуна. У цій схемі також передбачений функціональний перетворювач (ФП), який залежно від значення частоти напруги живлення формує сигнал задавання величини діючої фазної напруги U та забезпечує співвідношення $f/U = const$. Після формування сигналів частоти і

величини діючої фазної напруги статора вони подаються на формувач синусоїдальних сигналів (ФСС), де генеруються три сигнали потрібної синусоїдальної обвідної і мають між собою 120° , при порівнянні яких у модулі формування сигналів керування АІН (ШІМ) з опорним сигналом двополярної пилкоподібної напруги частотою 1 кГц формуються сигнали керування для керування ключів інвертора.

Для проведення імітаційного моделювання в якості тягового двигуна взято трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором АД906. Його основні параметри наведені в таблиці.

Таблиця

Технічні характеристики асинхронного електродвигуна АД-906

Параметр	Значення
Номінальна потужність P_n , кВт	240
Номінальна діюча фазна напруга статора U_s , В	665
Номінальний діючий фазний статорний струм I_s , А	135
Номінальний діючий струм ротора I_r , А	128
Номінальна частота статорної напруги f_n , Гц	33,8
Номінальна частота обертання ротора n_n , об/хв	1000
Номінальний електромагнітний момент, Н·м	2366
Номінальне абсолютне ковзання s_n , %	2
Активний опір статора R_s , Ом	0,083
Активний опір ротора R_r , Ом	0,068
Індуктивність розсіювання ротора $L_{\sigma r}$, Гн	0,001615
Індуктивність розсіювання статора $L_{\sigma s}$, Гн	0,001403
Індуктивність намагнічування L_μ , Гн	0,0866
Номінальний ККД η , %	93,7
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, в. о.	0,93

Наведені математичні моделі дозволяють створити повноцінну математичну модель ТАЕП та дослідити його роботу в штатних та аномальних

умовах в режимі електродинамічного гальмування шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab (рис. 3) [13].

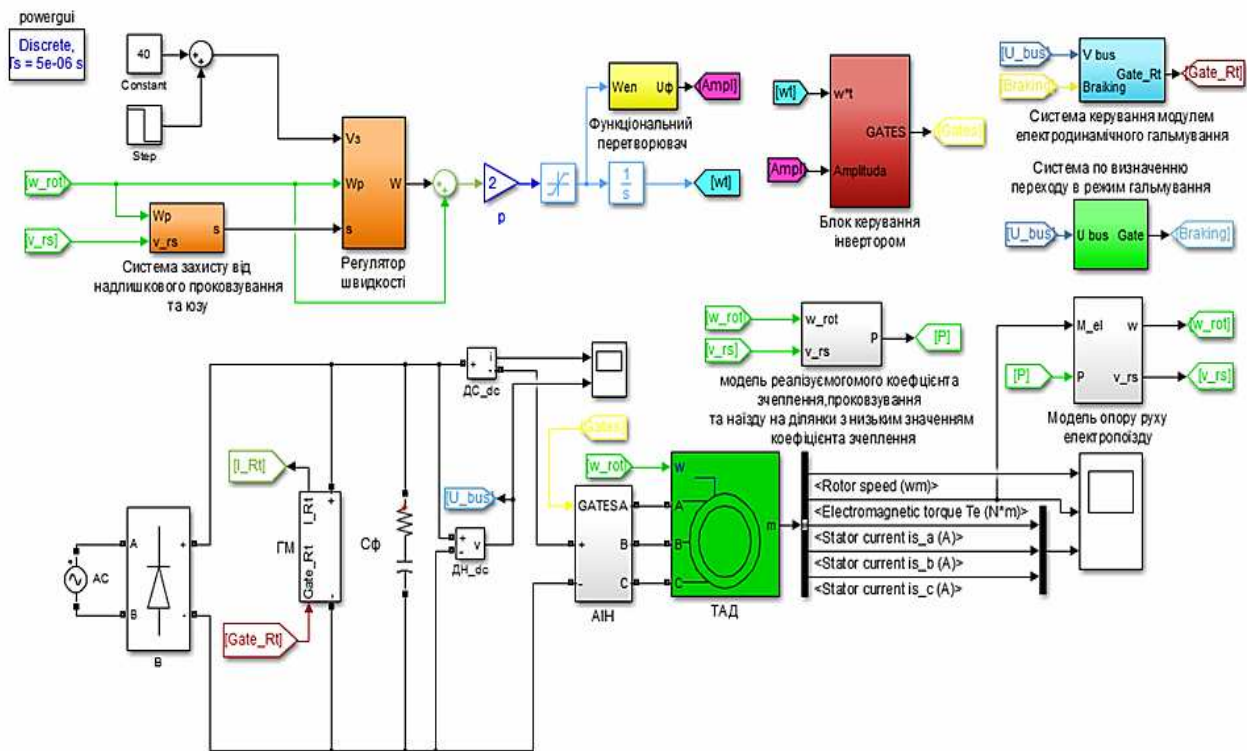


Рис. 3. Імітаційна модель, виконана в програмному середовищі Matlab

Система з визначення переходу в режим електродинамічного гальмування (СВПГ) аналізує величину напруги ланки постійного струму та в разі необхідності активує роботу системи керування модулем електродинамічного гальмування.

Система керування модулем електродинамічного гальмування (СКМЕГ), опір резистора якого становить 6 Ом, забезпечує підтримання заданих умов режиму гальмування (уповільнення, максимально допустима напруга в ланці постійного струму) незалежно від гальмівного моменту двигуна. Вона побудована на основі ШІМ регулятора зі зворотним зв'язком по напрузі в ланці постійного струму.

Система захисту від надлишкового проковзування та юза здійснює обмеження електромагнітного моменту двигуна в разі виникнення надлишкового проковзування чи юза колісної пари. Рівень обмеження електромагнітного моменту визначається двома показниками, величиною проковзування та швидкістю його зростання.

Визначення моменту закінчення ділянки шляху з низьким коефіцієнтом зчеплення та зняття обмеження здійснюється за темпом зміни прискорення колісної пари.

На рис. 4 наведено осцилограми роботи в штатних та аномальних умовах для рухомого складу з ТАЕП в режимі електродинамічного гальмування, де в якості тягового ТАД взято АД906, АІН з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією з опорною частотою 1 кГц. Наїзд на ділянку шляху довжиною 20 м з низьким коефіцієнтом зчеплення імітується з 4,8–7 с.

Висновки. Аналіз отриманих результатів імітаційного моделювання підтвердив коректність розробленої математичної моделі ТАЕП у всіх режимах роботи. Це дозволило провести повноцінне дослідження електромагнітних та електро механічних процесів, що виникають у штатних та аномальних умовах в режимі електродинамічного гальмування. Розроблена модель буде використана при розробленні заходів з підвищення енергоефективності тягового рухомого складу.

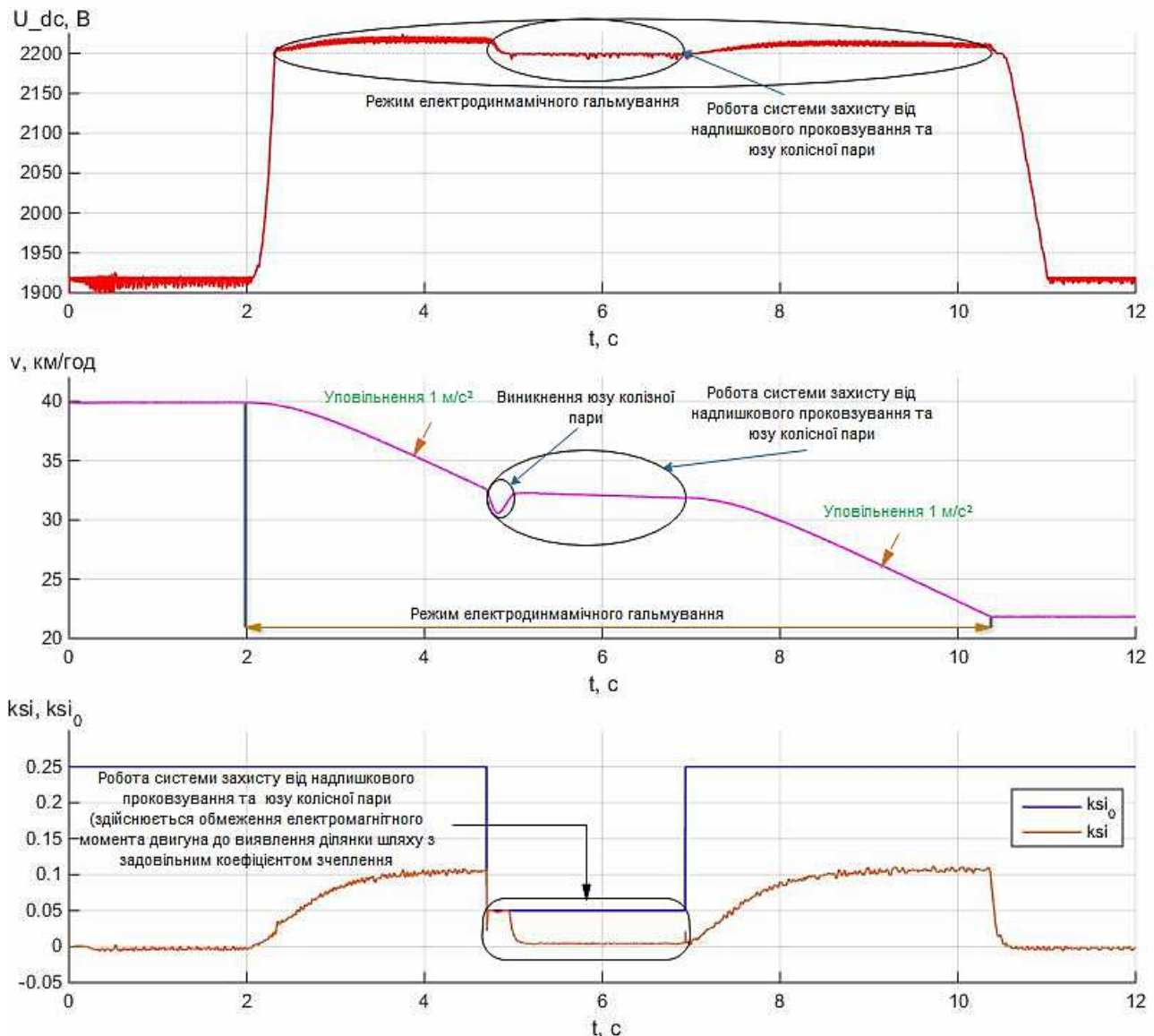


Рис. 4. Осцилограми роботи в штатних та аномальних умовах рухомого складу з частотно керованим тяговим асинхронним електроприводом

Список використаних джерел

1. Frilli, A. “Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems [Text] / A. Frilli, E. Meli, D. Nocciolini, L. Pugi, and A. Rindi // Energy Conversion and Management. – Dec. 2016. – vol. 129. – P. 200–215.
2. Муха, А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТ, 2009. – Вип. 28. – С. 40-47.
3. Воронко, А. Б. Алгоритм формування заданого потокозчеплення в системах векторного управління асинхронними двигателями в режимі ослаблення поля для транспортних применений [Текст] / А. Б. Воронко // Техническая электродинамика. – 2014. – № 5. – С. 121.

4. Воронова, З. М. Разработка асинхронных двигателей с учётом переходных процессов инверторного торможения [Текст] : автореф. дисс... канд. техн. наук. – М. : МЭИ, 1988. – 25 с.
5. Копырин, В. С. Тормозные режимы преобразователь частоты – двигатель [Текст] / В. С. Копырин, В. И. Лихошерст, М. М. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1985 – 72 с.
6. Ткачук, А. А. Исследование переходных процессов инверторного торможения асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией [Текст] : автореф. дисс... канд. техн. наук. – Екатеринбург : УПИ, 1999. – 25 с.
7. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Н. А. Ротанов [и др.]. – М. : Транспорт, 1991. – 336 с.
8. Полтораки, С. Н. Методы расчета и способы реализации защит электропередачи тепловоза с асинхронными двигателями [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07, 05.09.03 / Полтораки Сергей Натанович. – Харьков, 1988. – 201 с.
9. Ергучев, Л. А. Повышение контролепригодности асинхронного тягового привода тепловоза [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ергучев Леонид Александрович. – М. : РГБ, 2007. – 196 с.
10. Колпахчян, П. Г. Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электропоездов [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Колпахчян Павел Григорьевич. – Новочеркасск, 2006. – 398 с.
11. Дяченко, В. С. Побудова моделі електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 [Текст] / В. С. Дяченко, О. О. Шкурпела, С. І. Яцько // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 141. – С. 226-230.
12. Болжеларський, Я. В. Тягові розрахунки при нетипових умовах гальмування [Текст] / Я. В. Болжеларський // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 2. – С. 36-40.
13. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

Яцько Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75. E-mail: ua.yatsko@gmail.com.

Вашченко Ярослав Васильович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)728-21-92. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com.

Сидоренко Анатолій Миколайович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095) 008-92-96. E-mail: sidorenko58@gmail.com.

Яцько Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-75. E-mail: ua.yatsko@gmail.com.

Вашченко Ярослав Васильевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (050) 728-21-92. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com.

Сидоренко Анатолий Николаевич, аспирант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (095) 008-92-96. E-mail: sidorenko58@gmail.com.

Yatsko Serhii, cand. tech. sciences, associate professor Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (057) 730-10-75. E-mail: ua.yatsko@gmail.com.
Vashchenko Yaroslav, cand. tech. sciences, Senior lecturer Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (050) 728-21-92. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com.

Sydorenko Anatolii, postgraduate student Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (095) 008-92-96. E-mail: sidorenko58@gmail.com.

Статтю прийнято 23.04.2018 р.