

УДК 621.313

І. А. Орловський, Ю. О. Крисан

Математична модель та система керування гібридного асинхронного тягового електропривода дизель-потяга

Розроблена математична модель та система керування гібридного асинхронного тягового привода дизель-потяга з використанням потужної акумуляторної батареї. Виконано дослідження розробленої моделі в системі Matlab.

Вступ

В умовах різкого подорожчання нафтопродуктів, вичерпаності природних ресурсів та загрози екологічної кризи у всьому світі постає питання про зменшення енергоспоживання. Одночасно в останні роки значно зросла інтенсивність пасажирських перевезень на залізницях України, зокрема, дизель-потягами (ДП). Мотор-рухомих склад ДП, що налічує понад 200 одиниць, потребує ремонту, переобладнання, та виробництва нових сучасних потягів [1]. Одним з рішень зниження споживання дизельного пального є створення гібридного привода, джерелом енергії у якому разом з дизелем є потужні акумуляторні батареї (АБ). У гібридному приводі разом з зменшенням витрат пального, зменшуються динамічні навантаження на дизель і викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Більш розвинуті дослідження та виробництво гібридного привода відбуваються у автомобілебудуванні [2], де компанія «Toyota», зберігає своє лідерство. Використання гібридного привода у автомобілях в залежності від режиму роботи дозволяє економити до 50 % палива [3].

Існують різні підходи до створення гібридного привода та його алгоритму керування у залізничному транспорті. При створенні у США маневрового локомотива під назвою «Green Goat» («Зелена Коза») [4] зроблено заміну гігантських дизельних двигунів потужністю до 1,5 тисяч кіловат на невеликі дизельні електрогенератори і величезні АБ з великою енергоємністю. Використання дизельного двигуна меншої потужності дозволяє економити від 40 до 60 % палива та значно зменшити забруднення довкілля [4]. Якщо потужності дизеля не вистачає, наприклад зрушити потяг з місця, тоді необхідна потужність споживається від АБ. Коли розгін закінчено, рух потягу підтримується дизелем. Після зупинки потягу дизель деякий час працює на обертаннях вище холостих, заряджаючи АБ. У розробці німецького концерну «Alstom» [5] також гібридний локомотив приводиться в рух електродвигуном, що живиться від АБ. Коли напруга на клеммах АБ опускається нижче певного рівня, включається дизельний генератор і заряджає її. В умовах пікових навантажень обидва джерела енергії можуть працювати одночасно.

В Росії у 2007 році компанія «ТрансМашХолдинг» (основний виробник локомотивів в СНД) прийняла рішення про створення 4-х вісного маневрового тепловоза з дизелем потужністю 315 кВт та накопичува-

чем енергії [6]. В Україні у міжнародному консорціумі енергозбереження м. Харків плануються експериментальні випробування гібридного привода маневрових тепловозів [6]. Розрахунки та дослідження дозволили зробити висновок, що найбільш оптимальним є використання у такому приводі накопичувачів енергії на основі АБ на 150–200 МДж та дизелю потужністю 315–400 кВт, що в 2–3 рази менше, ніж встановлений. Економія дизельного палива за розрахунками складає не менш ніж 40 %, термін окупності 1–2 року.

Для дослідження роботи ДП з асинхронним тяговим приводом (АТП) та удосконаленою системою керування (СК) у [7, 8] розроблена математична модель АТП ДП та його механічної частини, однак привод розглядається без накопичувачів енергії, до того ж динамічні навантаження дизеля не є задовільними, оскільки виникають часті стрибки швидкості дизеля.

Аналіз наведених джерел свідчить, що використання гібридного привода у автомобілях та маневрових тепловозах дозволяє економити до 60 % палива [2–6]. Однак в тепловозах та ДП, що експлуатуються та виготовляються в Україні, не використовуються у тяговій передачі накопичувачі енергії. Не має досліджень, що до економічності використання накопичувачів енергії у ДП. Попередні дослідження нових систем тягового привода ДП доцільно проводити на математичних моделях [8], на жаль математичної моделі гібридного АТП ДП у науково-технічних джерелах не наведено.

Ціль статті. Розробка та дослідження математичної моделі та СК гібридного АТП ДП.

Структурна схема гібридного АТП ДП

Силова частина тягового привода моторного вагона ДП (рис. 1) складається з дизеля, синхронного генератора (СГ) випрямляча В, двох автономних інверторів АІН, конвертора, АБ, двох тягових асинхронних електродвигунів (ТАД), перетворювача частоти власних потреб ПЧВП. Розглядається послідовний гібрид [3], у якому немає ніякого механічного зв'язку між дизелем і колесами, тільки ТАД, що споживають енергію СГ або АБ, приводять до руху колеса. Заряд АБ може відновлюватися від СГ та ТАД.

Принцип роботи даної системи наступний: спочатку запускається дизель до швидкості неробочого ходу і на виході СГ виникає напруга. Сигнал завдання швидкості поїзда V^* від пульта керування машиніста ПКМ

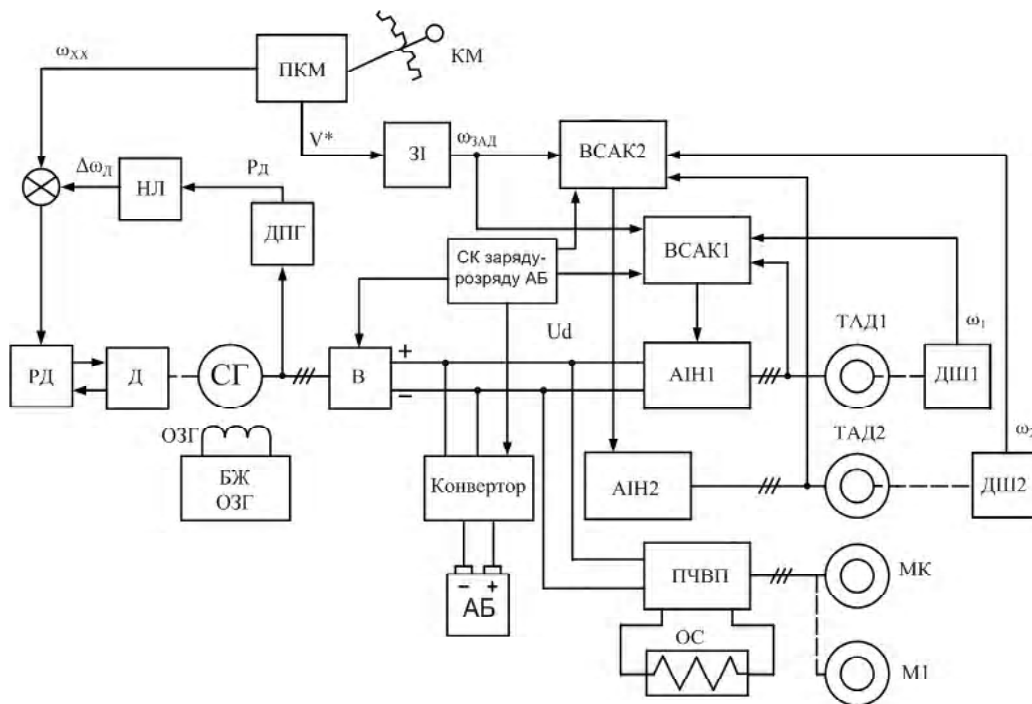


Рис. 1. Структурна схема гібридного АТП ДП

поступає до векторних системи керування ВСАК1, ВСАК2 кожного ТАД, які відпрацьовують сигнал завдання. Давач потужності ДПГ генератора визначає рівень потужності, що споживається всією силовою електропередачею, який у вигляді сигналу P_d поступає до нелінійної ланки НЛ. Вихідний сигнал нелінійної ланки $\Delta\omega_d$ корегує завдання швидкості обертання дизеля відповідно до його економічної характеристики [7]. Таким чином, зворотній зв'язок за потужністю генератора автоматично визначає необхідну поточну потужність дизеля і не потребує постійного втручання машиніста.

Тягові перетворювачі і ПЧВП отримують живлення напругою постійного струму від СГ та АБ. При гальмуванні ДП енергія від двигуна через автономний інвертор, що працює в даному режимі як випрямляч, поступає в ланку постійного струму, де через конвертор відновлює заряд АБ. При зростанні навантаження СГ (наприклад, при включенні опалювання, при зрушенні поїзда з місця або русі на гору) та зарядженій АБ енергія споживається від АБ.

Конвертор може виконуватися у вигляді імпульсного перетворювача, що підвищує напругу з можливістю рекуперації енергії у джерело [9]. Наприклад, при $R_\Sigma/R_H < 0,007$ (де R_Σ – сума опорів джерела, дроселя та транзистора, R_H – опір навантаження) максимальний коефіцієнт підсилювання дорівнює 6, що відповідає потребам.

Розрахунок та вибір АБ виконується за ємністю, напругою, максимальним струмом заряду та розряду. Вибрана напруга батареї $U_B=400$ В. Бажано мати АБ великої ємності, але кошти на таку АБ та її велика маса можуть значно знизити ефективність її використання.

Для дослідження переваг гібридного АТП ємність АБ вибрано такою, щоб запасу її енергії було достатньо для здійснення набору швидкості ДП до номінальної. Вибрано АБ на 72 МДж, ємністю 50 Агод, що значно менше ніж ємність у АК маневрового тепловоза [6]. Струми заряду та розряду АБ вибираються більшими двох струмів ТАД.

Для гібридних приводів можливо застосовувати АБ різної хімічної природи. Найбільш розповсюджені це нікель-метал-гібридні АБ у яких анодом є водневий металогібридний електрод (зазвичай гібрид нікель-лантан або нікель-літій), електроліт – гідроксид калію, катод – оксид нікелю. Також в гібридних приводах використовуються літій-іонні АБ. Як негативні пластини у них застосовується графіт, як позитивні пластини – сплави літію з кобальтом або марганцем. Літій-кобальтові пластини служать довше, а літій-марганцеві значно безпечніші і зазвичай мають вбудований термозапобіжник і термодатчик. Хоча у обох цих типів АБ існують свої недоліки, вони з успіхом використовуються у гібридних приводах [10].

Математична модель гібридного АТП ДП

Для створення математичної моделі гібридного АТП використовувалась модель енергозберігаючої СК ДП [7]. У моделі зроблені наступні допущення: розглядається рух одного моторного вагона ДП, який представлено у вигляді однієї зосередженої маси, пружності в вагоні і дорозі не враховуються, зв'язок коліс з рейками розглядається без прослизання, характеристики обох ТАД та їх векторні СК прийняті відповідно однаковими; механічні витрати в СГ та дизеля P_{xx} приймаються відомими і незмінними; трифазні струми СГ приводяться до ідеального випрямленого струму випрямляча, пульсації струму та напруги, що виникають

при роботі випрямляча, конвертора та інвертора, не враховуються, приймається в усталеному режимі пропорційна залежність ЕРС СГ E_G від частоти обертання та магнітного потоку; передатні функції дизеля і СГ за збуренням та керуванням представляються у вигляді інерційних ланок; динамікою конвертора та АБ нехтується; АБ має можливість заряджатися та розряджатися струмами, що дорівнюють подвійним струмам ТАД; не розглядається режим сумісної одночасної роботи випрямляча, інвертора та конвертора.

Керуючим впливом на дизель є положення h_p рейки паливного насоса дизеля, збурюючим впливом є момент опору M_{CD} , вихідним сигналом є швидкість дизеля ω_D . Керуючими сигналами СГ є швидкість дизеля ω_D і напруга збудження U_B , збурюючим впливом є статорний струм СГ I_G , вихідний сигнал – напруга U_G . Загальна математична модель сумісної роботи дизеля, СГ та АБ моторного вагона ДП представлена у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2} \cdot \text{sign}(I_{1y}), \\
 I_G &= (2I_1 + I_{BII} + I_A / K_{conv}) Zar, \\
 E_G &= \frac{\omega_D \cdot k_B \cdot U_B}{T_B p + 1}, \\
 U_d &= (E_G - I_G R) Zar + E_A K_{conv} \overline{Zar}, \\
 P_d &= E_G \cdot I_G + P_{xx}, \\
 \Delta\omega_D &= \frac{k_{HII}(P_d)}{T_{H3} p + 1}, \\
 \omega_{3d} &= \omega_{xx} + \Delta\omega_D, \\
 \omega_{3d} &= h_p \cdot k_\mu, \\
 M_{CD} &= P_d / \omega_D, \\
 \omega_D &= h_p \frac{k_\mu}{T_\mu p + 1} - M_{CD} \frac{k_\lambda}{T_\lambda p + 1}, \\
 I_A &= \frac{\text{sat}(U_G Zar) - E_A \overline{Zar}}{R_A} - \\
 &\quad - (2I_1 + I_{BII}) K_{conv} \overline{Zar}, \\
 m_M \frac{dV}{dt} &= \frac{2M_1 k_p}{r_1} - F_o, \\
 F_o &= a_0 + a_1 V, \\
 M_1 &= \frac{3}{2} z k \Psi_r I_{1y}, \\
 Q &= Q_{HV} + \int I_A dt.
 \end{aligned} \tag{1}$$

де V – швидкість ДП; E_G – ЕРС генератора, k_B, T_B – коефіцієнт та постійна часу обмотки збудження СГ; T_μ і T_λ – постійні часу дизеля по керуючому та збуджуючому впливам відповідно; k_μ і k_λ – коефіцієнти передачі дизеля по керуванню та збудженню відповідно; ω_{3d} – завдання швидкості дизеля; ω_{xx} – швидкість холостих обертів дизеля; T_{H3} – постійна часу НЗ; R, R_A – активні опори обмотки статора СГ та силового кола АБ відповідно; I_1 – струм першого ТАД, приведений до струму СГ; I_{BII} – струм обладнання власних потреб, P_{xx} – механічна потужність втрат в дизелі та СГ; a_0, a_1 – константи основного опору ДП, I_A – струм АБ; K_{conv} – коефіцієнт передачі конвертора постійного струму (при моделюванні дорівнював 4); Q – поточне значення заряду АБ; Q_{HV} – початкове значення заряду АБ; Zar – бінарний сигнал заряду/розряду АБ, що формується СК; E_A – ЕРС АБ; U_d – напруга на вході інвертора; k_p – передатне число редуктора; r_1 – радіуси коліс 1-ої моторної пари; I_{1x}, I_{1y} – намагнічуюча та активна складові статорного струму відповідно; Ψ_r – модуль узагальненого вектора поточкозчеплення ротора; k – конструктивна постійна ТАД; m_M – маса моторного вагону; M_1 – електромагнітний момент першого ТАД. Характеристика НЛ ($k_{HII}(P_d)$), що розрахована з характеристики дизеля [1], приведена в [7].

Алгоритм керування гібридним АТП ДП

Для забезпечення потрібних режимів сумісної роботи дизеля, АБ та ТАД використовуються регульовані випрямляч, інвертор та конвертор постійного струму, загальне керування якими здійснюється СК (блок «СК заряду-розряду АБ», рис. 1). Можливі варіанти передачі енергії при сумісній роботі обладнання приведені у табл. 1.

Система рівнянь (1) описує роботу обладнання для усіх режимів (табл. 1), окрім останнього, для якого потрібне плавне регулювання напруги конвертора з врахуванням роботи іншого обладнання.

У [2] керування включення/відключення СГ, дизеля та АБ відбувається з врахуванням потужності системи, заданої швидкості автомобіля, існуючої швидкості, заряду АБ, режиму роботи. Однак у цьому алгоритмі не враховуються особливості руху транспортного засобу, що задаються, наприклад, режимними картками руху потягу, та не змінюється при русі бажаний заряд АБ.

У запропонованій моделі СК визначає, який потрібен режим конвертора, випрямляча та інвертора та формує сигнал Zar і коефіцієнт передачі конвертора K_{conv} . Сигналом Zar задається, який буде режим – заряду чи розряду АБ, відповідно наступним виразами:

Таблиця 1

№	Назва режиму	Стан ключів / напрямок енергії		
		Випрямляч	Інвертор	Конвертор
1	СГ, ТАД і АБ відключені	-	-	-
2	Робота АБ на ПЧВП	-	-	+/прямий
3	Робота ТАД на ПЧВП	-	+/прямий	-
4	Робота СГ на ПЧВП	+	-	-
5	Заряд АБ від ТАД	-	+/зворотній	+/зворотній
6	Робота ТАД від конвертора	-	+/прямий	+/прямий
7	Заряд АБ від СГ при відкл. ТАД	+	-	+/зворотній
8	Робота ТАД від СГ	+	+/прямий	-
9	Робота ТАД від СГ і конвертора	+	+/прямий	+/прямий

$$Zar(n) = \begin{cases} 1, \text{ зарядження АБ, коли} \\ (Q < Q_{\min}) \vee [Zar(n-1) \wedge (Q < Q_{\max})], \\ 0 \text{ розрядження АБ, коли} \\ (Q > Q_{\max}) \vee [Zar(n-1) \wedge (Q > Q_{\min})]. \end{cases} \quad (2)$$

де $Zar(n)$ – значення сигналу Zar в дискретний момент часу n .

З виразу (2) витікає, що заряд АБ починається, коли $Q < Q_{\min}$, та продовжується від Q_{\min} до Q_{\max} ; відповідно, розряд починається коли $Q > Q_{\max}$, та продовжується від Q_{\max} до Q_{\min} . Значення мінімального Q_{\min} та максимального Q_{\max} залежать від бажаного значення заряду Q_Z , їх розрахунок у відсотках здійснюється за наступними рівняннями:

$$\begin{cases} Q_{\min} = Q_Z - 10, \\ Q_{\max} = Q_Z + 10. \end{cases} \quad (3)$$

Значення Q_Z змінюється у процесі руху ДП в залежності від режимів та умов руху на даній ділянці. Наприклад, перед спуском з гори або гальмуванням АБ розряджається, а при рекуперативному гальмуванні енергія поступає до АБ і відновлює її заряд.

При зарядженні АБ за допомогою СК змінюється коефіцієнт передачі конвертора K_{conv} для забезпечення максимально можливого струму заряду. При розряді АБ коефіцієнт K_{conv} забезпечує максималь-

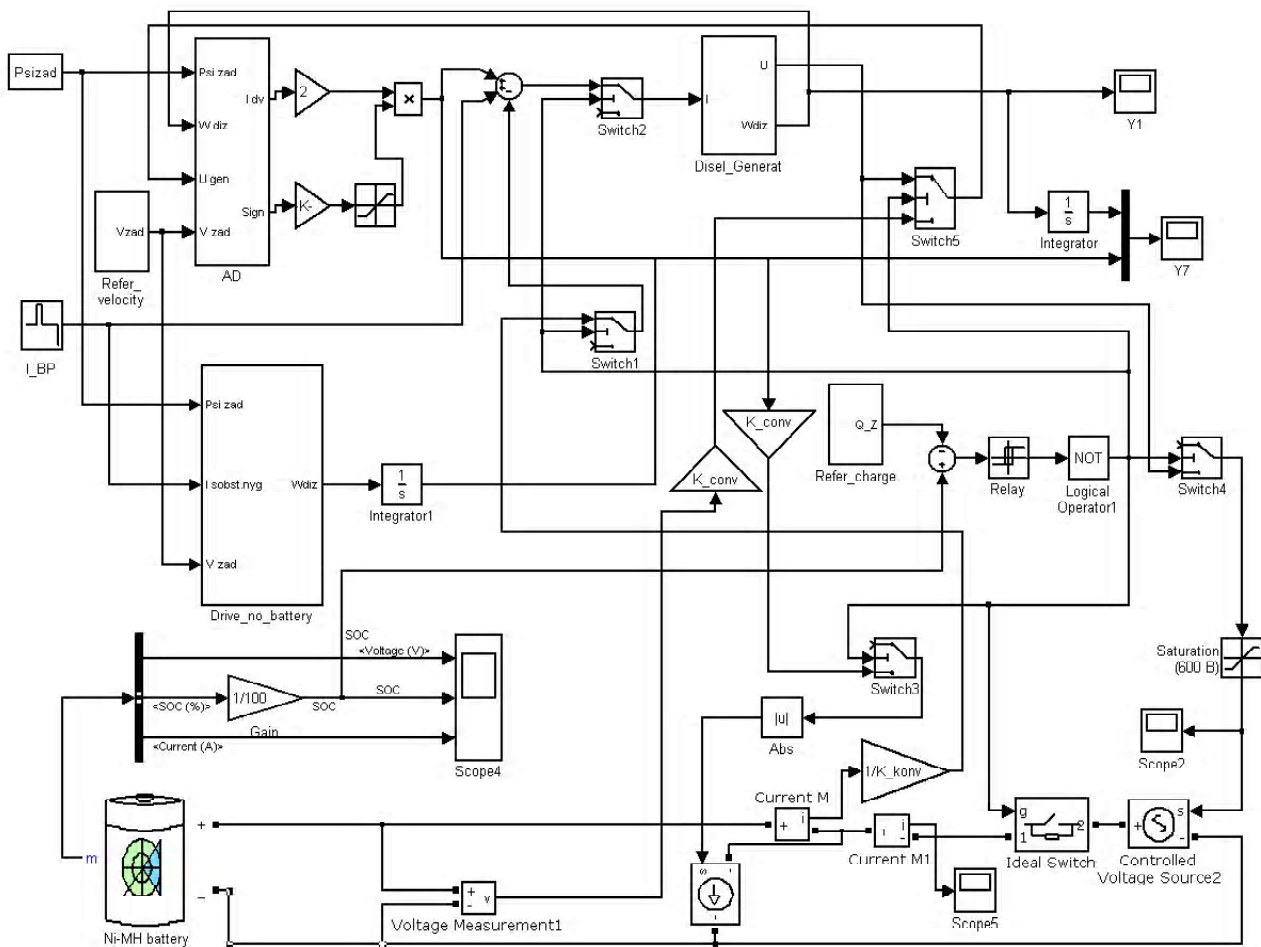


Рис. 2. Імітаційна модель гібридного АТГ ДП

но-дозволену випрямлену напругу, що подається на інвертори. При сумісній роботі випрямляча, інвертора та конвертора (цей режим не моделювався) коефіцієнт K_{conv} потрібно формувати з врахуванням значення напруги у випрямленому ланцюзі, наприклад, забезпечення рівних напруг конвертора та випрямляча. Цей режим може бути корисним, коли потужності дизеля не достатньо.

Результати моделювання

Для дослідження динамічних процесів руху ДП створено імітаційну модель в системі Matlab (рис. 2), відповідно математичній моделі, наведеної у рівняннях (1)–(3). Модель складається з наступних блоків: блок «AD» є модель ТАД з векторною СК та навантаженням; блок «Dizel_Generat» – модель дизеля з СК та СГ, відповідно третього – десятого рівнянь системи (1); блок «Ni-MH battery» – модель АБ; блок «Drive_no_battery» моделює роботу АТП без накопичувачів енергії, що використовується для порівняння з роботою гібридного АТП; блок «refer_charge» формує бажаний заряд відповідно до маршрутних карток; блок «I_BP» моделює зміну навантаження ПЧВП; блоки «Switch» переключають режими заряду або розряду АБ; блоки «Relay» та «Not» формують сигнал Zar ; блок «refer_velocity» задає завдання швидкості ДП. У силовому колі АБ встановлені моделі давачів струму та напруги, а також у спрощеному вигляді модель конвертора.

На рис. 3 штриховою лінією зображено завдання швидкості V^* руху ДП. Спочатку ДП розганяється та рухається зі сталою швидкістю 70 км/год. У момент часу 80 сек. швидкість ДП знижується до 30 км/год і триває до 190-ї секунди, потім швидкість зростає до 100 км/год і триває до 250 секунди, після чого відбувається плавне гальмування й зупинка ДП.

При моделюванні використовувалися наступні значення внутрішніх параметрів дизеля 12V183DE і СГ ГС 530У2, встановлених на ДП: $T_{\mu} = 3$ с; $T_{\lambda} = 3$ с; $k_{\mu} = 1$; $k_{\lambda} = 0,1 \text{ Н}^{-1}\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$; $T_{H3} = 0,01$ с; $R = 0,216$ Ом; $T_B = 0,5$ с.

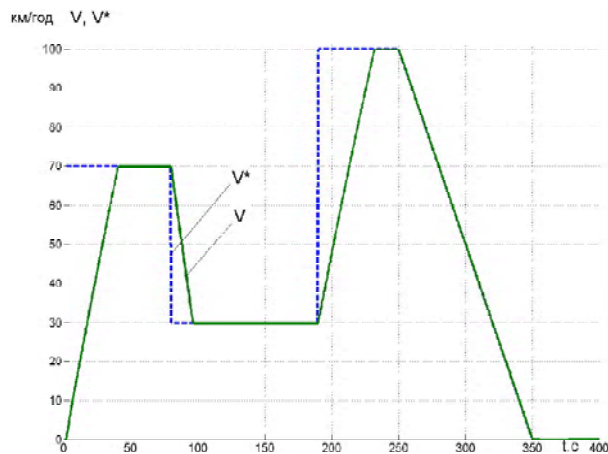


Рис. 3. Задана та дійсна швидкість руху ДП

Маса моторного вагона $m_m = 64000$ кг; радіус колеса $r = 0,475$ м; передатне число редуктора $K_p = 2,37$. ТАД – типу АД906У1, мають наступні параметри: номінальна потужність 240 кВт, номінальна фазна напруга 665 В, номінальний фазний струм 155 А, номінальний момент 2366 Нм, число полюсів – 6. Зусилля опору ДП F_o , відповідно рівнянню тринадцяти системи (1), де $a_0 = 2380$ Н, $a_1 = 50,4$ Нс/м, зображені на рис. 4.

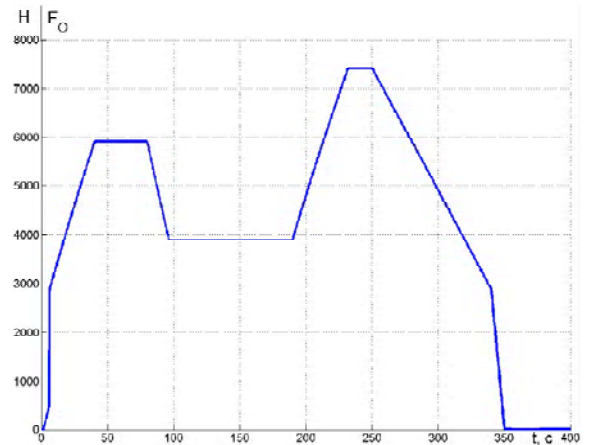


Рис. 4. Зусилля опору ДП

Для дослідження процесів у гібридному АТП задавалися два режими завдання заряду АБ. У першому режимі бажаний заряд АБ Q_{1z} не змінюється при русі ДП, а у другому Q_{2z} – змінюється відповідно маршрутним карткам. В обох режимах, якщо АБ розряджена менше Q_{min} , ДП буде рухатися лише за рахунок дизеля. Зарядження АБ автоматично фіксується, якщо рівень заряду перевищить Q_{max} . Значення бажаного заряду АБ у першому та другому режимах наведено на рис. 5.

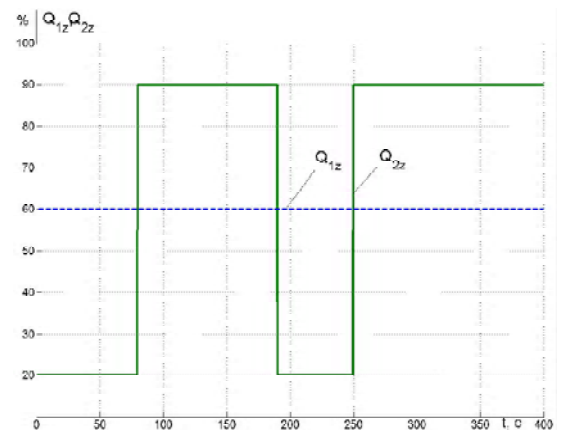


Рис. 5. Значення бажаного заряду АБ у першому та другому режимах

Графіки швидкості дизеля (рис. 6, а та рис. 6, б, де ω_D – швидкість дизеля у АТП без накопичувачів енергії), заряду АБ (рис. 6, в), струму АБ (рис. 6, г) для обох режимів показують, що у другому режимі у 2–3 рази

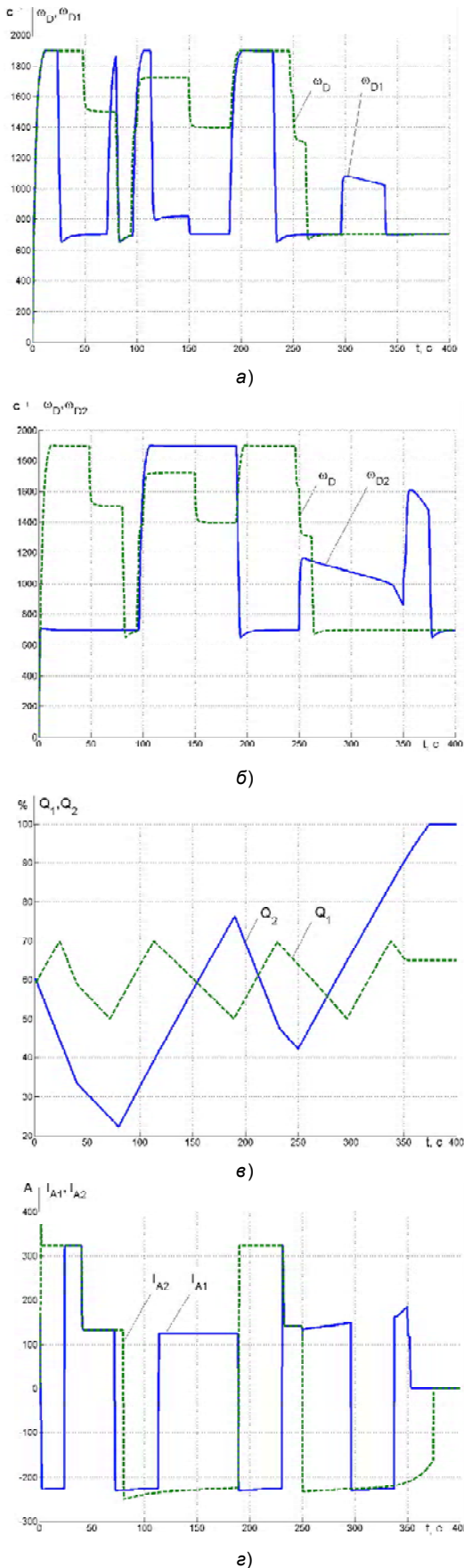


Рис. 6. Графіки швидкості дизеля, заряду та струму АБ

менша кількість циклів заряду розряду АБ та знижено динамічні навантаження на дизель, що зменшує зношення АБ та дизеля. Індекси «1» та «2» у позначеннях відповідають змінним для першого та другого режимів відповідно.

З рис. 4–6 видно, що ДП рушає з місця й розганяється тільки за рахунок заряду батареї, а в проміжок часу від 80 до 190 сек. при зниженні швидкості ДП заряд АБ відновлюється. Після зупинки ДП заряд АБ становить 100 % (а не 60 %, як було на початку) за рахунок якого відбудеться наступний розгін ДП.

Приблизно можна вважати, що споживання палива у дизелі пропорційно швидкості дизеля. Тоді для порівняння споживання палива зроблено інтегрування швидкості дизеля на розглянутій ділянці (рис. 7). Результати споживання палива у АТП без (штрихова лінія) та з накопичувачем енергії (цільна лінія) наведені на рис. 7. Порівняння графіків показує, що економія палива становить приблизно 20 %, крім того, заряд АБ вирів з 60 до 100 %.

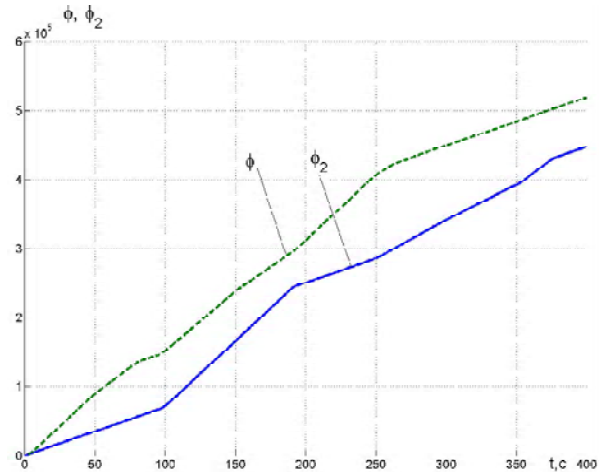


Рис. 7. Куті повернення дизеля (пропорційно, витрати палива) у ДП з АБ та без неї

Висновки

1. Дослідження розроблених математичної та імітаційної моделей гібридного АТП ДП показало доцільність їх використання для дослідження СК та процесів у силових агрегатах.

2. Результати моделювання показали можливість економії пального на розглянутій ділянці приблизно на 20 %, та за рахунок завдання бажаного заряду АБ (відповідно маршрутним карткам) знизити динамічне навантаження у 2–3 рази на дизель та АБ.

Перелік посилань

1. Басов Г. Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. / Басов Г. Г. Ч. 1. – Харків : «Апекс+», 2004. – 240 с.
2. Hybrid Electric Vehicle Power Train using Battery Model / www.mahworks.com/trademarks.
3. Esposito F. A Sub-optimal Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles. / Esposito F., Tutor Meo S. // Universita degli Studi di Napoli Federico II. Интернет. – 2007. – 151 p.

4. <http://www.railpower.com>.
5. <http://www.transport.alstom.com>.
6. Барский В. А. Анализ эффективности применения гибридных тяговых передач на маневровых тепловозах / В. А. Барский, В. А. Иванов, А. Е. Фришман, Г. И. Яровой // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. Тематический выпуск: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск : ДГТУ, 2007. – С. 328–329.
7. Орловський І. А. Математическа модель частотно-регульованого асинхронного тягового електропривода дизель-поезда с усовершенствованной системой управления / И. А. Орловський, Е. В. Страколист // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университе-
та. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск : ДГТУ, 2007. – С. 261–264.
8. 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», Ч. 6. – 2008. – С. 31–36.
9. Шавьолкін О. О. Перетворювальна техніка: навчальний посібник / О. О. Шавьолкін, О. М. Наливайко. Під загальною редакцією канд. техн. наук доц. О. О. Шавьолкіна. – Донецьк-Краматорськ : ДДМА, 2008. – 329 с.
10. <http://hybrids.ru>.

Поступила в редакцію 07.05.09 г.

Разработана математическая модель и система управления гибридного асинхронного тягового привода дизель-поезда с применением мощной аккумуляторной батареи. Выполнено исследование разработанной модели в системе Matlab.

Mathematical model and control system of hybrid asynchronous traction drive of diesel engine-multiple unit train with the powerful storage battery use are designed. The developed model research in system MatLab is executed.

УДК 621.313

В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич

Моделирование автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона

Предложены математическая модель и структурно-логическая схема автоматизированного электропривода дозатора технологической линии приготовления газобетона с учетом параметров управляющих устройств, преобразователя частоты и исполнительных механизмов.

Введение

В настоящее время газобетоны получают все большее распространение в промышленном и гражданском строительстве ввиду ряда физико-технологических преимуществ по сравнению с другими строительными материалами. Их технологические процессы характеризуются большими темпами совершенствования и разнообразием используемого технологического оборудования [1–6]. Управление системами автоматизированного электропривода технологического процесса осуществляются по совокупности сигналов с линейными и нелинейными электромеханическими параметрами [7]. Для повышения эффективности технологических процессов приготовления газобетона и согласования режимов исполнительных механизмов и параметров используются современные цифровые и микропроцессорные устройства и привода [2–6]. Однако такие технические решения не удов-

летворяют технико-экономическим требованиям в условиях неопределенностей и несогласованностей отдельных электромеханических параметров управления при колебаниях напряжения, набросах и сбросах мощности, изменениях внешних факторов (температуры, влажности, вибрации и т. д.) [1, 3, 5, 6]. Для повышения эффективности управления техпроцессом в таких условиях, системы управления электропривода приготовления газобетона целесообразно исследовать как многопараметрические, а сигналы управления, в зависимости от электромеханических параметров, классифицировать по характерным признакам [7, 8]. Это позволяет отыскивать критерии оптимальности для линейных и нелинейных параметров независимо [9]. Анализ литературных источников свидетельствует о необходимости дальнейшего развития и конкретизации данного вопроса в сочетании с современными исполнительными механизмами и уп-

© В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич 2009 г.