

УДК 629.4.083:629.424

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.62357>

ДО ПИТАННЯ ЕНЕРГОРАЦІОНАЛЬНОГО ВЕДЕННЯ ПОЇЗДІВ

Д-р техн. наук В.С. Блиндюк

К ВОПРОСУ ЭНЕРГОРАЦИОНАЛЬНОГО ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Д-р техн. наук В.С. Блиндюк

TO THE QUESTION POWER RATIONAL MAINTAINING TRAINS

Doct. of techn. sciences V.S. Blinduk

Проведено аналіз існуючих методів і засобів автоматичного регулювання та управління рухомим складом залізничного транспорту. Показано, що задачу енерготораціонального ведення поїздів слід розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації, а саме, обґрунтованого вибору з множини альтернативних рішень числових критеріїв такої альтернативи, котра при заданій системі переваг є кращою, аніж ті альтернативи, котрі не було обрано.

Ключові слова: *рухомий склад, енергоспоживання, критерії оптимізації, тяга поїздів, часові характеристики.*

Проведен анализ существующих методов и средств автоматического регулирования и управления подвижным составом железнодорожного транспорта. Показано, что задачу энерготораціонального ведения поездов нужно рассматривать как задачу многокритериальной

оптимизации, а именно, обоснованного выбора из множества альтернативных решений числовых критериев такой альтернативы, которая при заданной системе преимуществ является лучшей, чем те альтернативы, которые не были выбраны.

Ключевые слова: подвижной состав, энергопотребление, критерии оптимизации, тяга поездов, временные характеристики.

The analysis of the existing methods and means of self-regulation and management of rolling stock of railway transport is carried out. It is shown that the problem of power rational maintaining trains needs to be considered as problem of multicriteria optimization, namely, reasonable choice from set of alternative solutions of numerical criteria of such alternative which at the set system of advantages is the best, than those alternatives which have not been chosen. It is shown that systems of autocontrol of train movements allow to solve problem of optimum use of energy and temporary resources of the railroads. At the same time, systems of autocontrol of rolling stock which are mainly expected solutions of this problem, consider restrictions which are imposed for their work insufficiently. Technical means which realize the concept of traffic control of rail transport on polygon and according to it create and give the managing signals defining the movement mode on mobile structure, now are quite widely acquired. However these actions have mainly directive character, leaving to the ability of their implementation opened problem.

Keywords: rolling stock, energy consumption, criteria of optimization, draft of trains, temporary characteristics.

Вступ. Як впливає з робіт фахівців, що мають досвід розроблення, конструювання та впровадження систем автоматичного регулювання та управління рухомим складом (АРУ) [1-4], у процесі вирішення завдання енергоефективного ведення поїздів неможливо визначити функцію водночас усіх тих критеріїв, оптимізація яких забезпечила б раціональні числові значення кожного з них. Тому для досягнення мети керування слід розглядати задачу обґрунтованого вибору з множини альтернативних сукупностей числових критеріїв (надалі – «альтернатив») такої альтернативи, яка при заданій системі переваг є кращою, тобто вирішити задачу багатокритеріальної оптимізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При веденні поїзда машиністом останній є особою, що приймає рішення, керуючись сигналами, інформацією про характеристики поїзда, профіль і стан колії, обмеження швидкостей відповідно до вимог нормативних документів. Усе це є входною інформацією для особи, що приймає рішення. У класичному випадку альтернативами, серед яких вибирає ця особа, є позиції контролера машиніста як апарату комплексного керування рухом поїзда.

Розглянемо теоретичні та практичні аспекти системи АРУ, які базуються на критеріях, за якими вона оптимізує рух поїзда:

- мінімум енергоспоживання на тягу;

- точність виконання часових параметрів руху в цілому або його окремих фрагментів;
- точність прицільного гальмування;
- точність дотримання заданої швидкості поїзда;
- забезпечення мінімально можливого безпечного просторового інтервалу між сусідніми поїздами.

Аналіз літературних джерел показав, що найбільше застосовуються на практиці системи АРУ, які забезпечують мінімальну величину електроенергії, спожитої на тягу. Класичний тяговий розрахунок проводиться на базі розрахунку залежності швидкості руху поїзда як функції часу проходження $v(t)$ і як функції пройденого шляху $v(s)$, а також розрахункової залежності $t(s)$ часу ходу від пройденого шляху [5]; ці функції отримали назву кривих руху поїзда. На їх базі визначають величини струму, споживаного поїздом у кожний момент часу, числові показники використання потужності електрорухомого складу та системи енергозабезпечення, а також поточну температуру обмоток тягових електродвигунів. За цими показниками обчислюють кількість електроенергії, спожитої поїздом визначеного маршруту. Саме цю величину або її складові – величини енергії, спожитої при русі кожним окремим перегonom, – мінімізують при енергооптимальному автоведенні поїзда.

До найбільш поширених належать системи АРУ, які мінімізують спожиту на тягу

електроенергію за умови забезпечення заданого часу проходження t_x перегоню та оптимальним розподілом на ділянках часу проходження перегоню [2]. Ці часові характеристики, що в даній задачі оптимізації відіграють роль обмежень, задовольняють вибір належного режиму ведення (тяга, вибіг, гальмування) і належного часу ввімкнення даного режиму, причому в режимі тяги можуть бути доступними одна швидкість ведення, дві швидкості ведення або (хоча б принципово) плавно регульована швидкість ведення [6]. Відомі роботи, в яких розглянуто питання врахування профілю шляху при розв'язанні задачі мінімізації енерговитрат і стану найближчого автотранспортного переїзду [7]. Регулювання швидкості (а отже, і часу) руху поїзда в режимі тяги здійснюють або перемиканням груп тягових двигунів, або плавним регулюванням їхніх електромагнітних моментів [6]. У режимі гальмування частину витраченої на тягу енергії повертають до живильної мережі, використовуючи рекуперативне гальмування, при якому тягові двигуни працюють у генераторному режимі. Додатковим лімітуючим фактором при тязі та гальмуванні можуть бути граничні величини повздовжніх сил у складі поїзда. Низка робіт присвячена енергореєструючому блоку системи АРУ. Сукупність вироблених і зареєстрованих системою даних дає змогу також коригувати швидкість поїзда з урахуванням зупинки або зменшення швидкості поїзда, що прямує попереду [7, 8]. Це забезпечує можливість уникнути зайвих зупинок поїзда, які найбільш несприятливі з енергетичної точки зору при їх здійсненні на підйомах; у цілому ж таке прогнозує коригування забезпечує також підвищення швидкості поїзда на перегоні, що створює регулюючий швидкісний запас при коригуванні часу проходження прогоном.

Основна частина дослідження. Задача енергорационального ведення поїзда формується таким чином [1-3]. Нехай $U_T(t)$ –

квазіпостійна напруга на струмоприймачі локомотива (або залежність діючого значення тієї самої напруги від часу при тязі змінного струму), $I_T(t)$ – квазіпостійний тяговий струм (або залежність діючого значення тягового струму від часу), $T_{\text{ХП}}$ – час проходження перегоню. З урахуванням введених позначень енергія, спожита на тягу за цей час, дорівнює

$$A_T = \int_0^{T_{\text{ХП}}} U_T(t) \cdot I_T(t) dt, \quad (1)$$

припускаючи, що рекуперация не здійснювалася. Цю енергію застосовано для створення сили тяги F , яка являє собою керуючу дію. Іншою доступною системою керуючою дією є сила гальмування $B(v)$. Вважатимемо додатково, що електропривод і гальмівна система є безінерційними. Зберігаючи введені вище позначення $v(t)$ для миттєвої величини швидкості в момент t та $s(t)$ – для шляху, пройденого на той самий момент, а також $w(v)$ для питомої сили опору руху поїзда, додамо до них P – сумарну вагу тягових одиниць і решти поїзда в цілому, включаючи вантаж.

Нехай шляховими координатами початку та кінця перегону є відповідно $s(0) = s_B$ та $s(T_{\text{ХП}}) = s_E$, а величини швидкості в тих самих точках шляху (тобто в ті самі моменти часу) дорівнюють відповідно $v(0) = v_B$ та $v(T_{\text{ХП}}) = v_E$. Також враховують, що при кожній конкретній величині S пройденого шляху швидкість повинна задовольняти діючі на лінії обмеження, тобто

$$v \in (0, v_{\max}(s)). \quad (2)$$

Можливості здійснення керуючих дій лімітовані так званими обмеженнями, накладеними на керування:

$$F \in [0, F_{\max}(v)]; \quad I_T \in [0, I_{T\max}(v)]; \quad B \in [0, B_{\max}(v)]. \quad (3)$$

Задача енергорационального ведення поїзда за введених позначень має таке формулювання: визначити такі часові

залежності керуючих дій $F(t)$ і $B(t)$ і відповідні їм траєкторії $v(t)$ і $s(t)$, котрі забезпечують мінімальне споживання

електроенергії A_T при забезпеченні заданого часу $T_{ХП}$ проходження перегону, забезпеченні відповідності граничним умовам руху та дотриманні обмежень, накладених на швидкість і керуючі дії. Оскільки величина A_T , яка підлягає мінімізації, залежить від струму I_T , який у свою чергу є функцією часу t , визначеною відповідно до сили тяги F , котру необхідно створити в даний момент часу t , то маємо, що A_T залежить від керованого вибору функції $I_T(t)$, тобто A_T є функціоналом [2]. Наявність умов та обмежень визначає клас розв'язуваної задачі як задачі на умовний екстремум, а нелінійність швидкості v робить її ще й нелінійною.

З'являється також нове рівняння, яке пов'язує диференціал шляху ds в кожній точці перегону з величиною швидкості в цій точці і називається ізопериметричною умовою [2]:

$$T_{ХП} = \int_{s_B}^{s_E} \frac{ds}{v}. \quad (4)$$

Оскільки ж $dt = ds/v$, то функціонал (1) набуває вигляду

$$A_T = \int_{s_B}^{s_E} \frac{U_T(s)I_T(s)}{v} ds,$$

який з причини пропорційності сили тяги F струмові I_T [6] при визначальному коефіцієнті корисної дії η в даному режимі тяги перетворюється на пропорційну величину

$$A_{TE} = \int_{s_B}^{s_E} \frac{F}{\eta} ds. \quad (5)$$

Траєкторіями руху поїзда тепер будуть функції $v(s)$ та $t(s)$, формулювання ж задачі мінімізації залишається у цілому попереднім, з урахуванням заміни аргументу t на аргумент S та необхідності додержання ізопериметричної умови (4). У роботі [2] наведено досить детальний і вичерпний (на той час) огляд варіантів розв'язання сформульованої задачі, які відповідають конкретним умовам здійснення тяги,

додержання графіка руху та врахування профілю колії. Арсенал методів розв'язання на той час включав до себе традиційну оптимізацію скалярної функції кількох змінних, застосування принципу максимуму Понтрягіна [3] і динамічного програмування Беллмана.

У подальшому до цієї вже відомої сукупності методів [3] додалися багатокритеріальна оптимізація, застосування апарату нечітких множин при формуванні рішень і регулювання за спадковими алгоритмами [9,10]. Звернення до цих нових методів стало можливим завдяки розвитку апарату матричних обчислень у теорії автоматичного управління [3], методів нечіткої логіки, методології нейромережних структур і реалізації теоретичних напрацювань у галузі мікропроцесорних контролерів і спеціалізованих великих інтегральних схем [11-13].

Розглянемо системи АРУ, у яких віддано пріоритет найвищій точності виконання часових параметрів руху в цілому або його окремих складових. У роботі [14] описано відмовостійку систему автоведення швидкісного тягового рухомого складу, яка на базі отриманих сигналів автоблокування та АЛС реалізує заданий графік руху поїзда за допомогою керуючої апаратури, розташованої на борту локомотива. Централізовану систему АР-900 інтервального регулювання та автоведення поїзда приміського сполучення, здійснення роботи якої суто автоматичне, без використання поїзних бригад описано в роботі [15].

Класичним прикладом системи АРУ, метою роботи якої за безумовного виконання умов безпеки є додержання графіка руху поїздів, стала комплексна система управління поїздами метрополітену КСАУПМ. Вона може працювати у двох режимах: без регулювання відхилень від графіка руху та з регулюванням цих відхилень. У першому режимі час відправлення поїзда зі станції дорівнює часу його прибуття на станцію плюс нормативний час, відведений на висадку та посадку пасажирів і технологічні операції, пов'язані із відправленням поїзда. У другому режимі час відправлення поїзда зі станції вираховують виходячи з часу відправлення з цієї самої станції поїзда, що прямує попереду, і часу відправлення з попередньої станції поїзда, що прямує позаду, а також з величини часового ресурсу, яка доступна шляхом регулювання

швидкостей руху поїздів на перегонах, які суміжні з даною станцією. Таким чином, КСАУПМ є графіково-інтервальною системою за класифікацією, встановленою в роботі [2].

Різновид графіково-інтервальної системи розглянутий у роботі [1]. Така система формує керуючі дії відповідно до певної узагальненої в масштабах лінії величини, а саме – суми квадратів різниць між фактичними T_{ϕ} і графіковими T_{Γ} часами прибуття всіх поїздів лінії до платформ:

$$\Delta = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (T_{\phi mn} - T_{\Gamma mn})^2, \quad (6)$$

де M – кількість поїздів;

N – кількість платформ.

Оскільки величина Δ змінюється в часі відповідно до ситуації на лінії, то керуючі дії системи, націлені на мінімізацію величини Δ , постійно підлаштовуються під поточну ситуацію; тому автори назвали цю систему адаптивною. У ній два керуючих контури – регулятор часу ходу на базі стаціонарного комп'ютера пункту диспетчерського керування та бортовий регулятор швидкості.

У системах автоведення електропоїздів приміського сполучення як вхідну величину використовують різницю між фактичним і графіковим часом ходу по контрольних станціях [2] і здійснюють керування регулюванням часу стоянки та часу проходження між зупинними пунктами (застосований до цього виду поїздів відрізок шляху між зупинними пунктами теж прийнято називати перегонем). Згідно з даними роботи [2] використовують такі закони керування рухом:

1) регулювання часу руху поїзда під струмом T_C як функції часу $T_{\text{хп}}$ ходу руху перегонем;

2) регулювання довжини шляху s_C , пройденого під струмом, як функції величини $T_{\text{хп}}$;

3) регулювання часу руху під струмом від контрольної точки як функції величини $T_{\text{хп}}$;

4) регулювання швидкості в момент переходу на вибіг як функції від $T_{\text{хп}}$;

5) регулювання середньої швидкості на момент ввімкнення тягових двигунів як функції $T_{\text{хп}}$;

6) для двоконтурних систем АРУ-регулювання заданої швидкості та шляхової точки переходу на вибіг як функцій величини $T_{\text{хп}}$.

Отже, можна констатувати наявність та практичну і теоретичну апробованість деякої усталеної сукупності систем АРУ, які забезпечують дотримання заданих часових параметрів руху.

Вимога забезпечення високої точності прицільного гальмування характерна перш за все для метрополітенів і обумовлена дуже обмеженими габаритами платформ: відхилення від заданого місця зупинки на станції з відкритою платформою не повинно перевищувати $\pm 1,5$ м, а на станції із закритою платформою не повинне перевищувати $\pm 0,45$ м [8]. Як варіант забезпечення гнучкості формування завдання на прицільне гальмування відмітимо алгоритми адаптивної зміни точки прицільного гальмування, який забезпечує її підлаштування під поточну поїзну ситуацію згідно з характером руху (станція, перегін, депо і т. п.).

Питання забезпечення заданої точності прицільного гальмування тісно пов'язане з точністю реалізації розрахункового режиму гальмування і з точністю підтримання швидкості руху як початкової умови для гальмівних розрахунків і як одного з критеріїв функціонування АРУ, синтезованої на базі комплексного, багатокритеріального підходу [16]. Існують дослідницькі напрацювання та розробки щодо виведення поїзда на задану швидкість і її стабілізації в заданих межах, які, у принципі, забезпечують її поточне коригування та підтримку її величини з більшою точністю, аніж це дає змогу оперування динамікою руху в рамках прийнятої на метрополітенах і поїздах приміського сполучення трійки режимів «тяга-вибіг-гальмування». Так, у роботі [17] розглянуто можливість визначення оптимальної точності підтримки заданої швидкості при ступінчастому керуванні силою тяги, а в роботі [18] – моделі та характеристики системи автоматичного управління швидкістю електрорухомого складу при використанні неперервного керування силою тяги. Відоме

також запатентоване технічне розв'язання задачі регулювання потужності тягових двигунів електрорухомого складу в режимах зрушення з місця, розгону до заданої швидкості та подальшої стабілізації цієї величини швидкості.

Важливим фактором, який впливає на рух поїзда під тягою, є нестабільність напруги живильної мережі як у часі (з причини зміни в часі кількості тягових одиниць на даній тяговій ділянці), так і в просторі (з причини повздовжнього падіння напруги на проводах). При тяговому розрахунку, який є складовою частиною здійснення енергорационального автоведення поїзда [2], цей фактор враховують у вигляді напруги на струмоприймачі електротягової одиниці. Зазвичай враховують тільки детермінований процес зміни напруги, більш адекватний реальній ситуації випадок наявності як детермінованої, так і випадково змінної в часі (стохастичної) складової напруги на струмоприймачі, розглянутий у роботі [19].

Мінімізація інтервалу попутного прямуювання є дуже обмеженою за можливостями; обмежуючим фактором є вимоги безпеки руху. Нижня межа цього інтервалу жорстко закладена в алгоритмах функціонування систем АРУ всіх трьох розглянутих вище типів – графікової, інтервальної та графіково-інтервальної [2]. Все ж слід зазначити, що певний ресурс регулювання закладений і тут, як це свідчить досвід роботи французьких систем Maggaly (метрополітен) [20] та Astrée (лінії швидкісних електропоїздів) [21]. Ці системи здійснюють інтервальне регулювання без використання фіксованих меж блок-ділянок, обчислюючи та реалізуючи (за необхідністю) мінімально безпечний інтервал на базі даних, що безперервно надходять до бортового комп'ютера, про власну швидкість поїзда, його місцезнаходження та про місцезнаходження інших поїздів на лінії; за цими даними та результатами обчислень здійснюється автоведення кожного з поїздів.

Отже, забезпечення кожного з перелічених критеріїв оптимальності роботи системи АРУ так чи інакше обов'язково включає в себе вибір комбінації режимів руху поїзда перегонном. Усталеною трійкою режимів, що використовуються на метрополітені та в тяговому рухомому складі приміського сполучення, є тяга, подальший рух із

вимкненими двигунами (рух по інерції – вибіг) і гальмування. На довгих перегонах може бути використане повторне ввімкнення двигунів – додатковий режим тяги [2].

Для визначення результатів застосування вибраного режиму руху – пройденого шляху, досягнутої швидкості та прискорення – є необхідною вимірювальна складова системи АРУ. Зазвичай це певний комплекс апаратних засобів, установлений на електротяговій одиниці. Його наявність і забезпечення ним високої точності вимірювання шляху та швидкості суттєво підвищують пропускну спроможність транспортної лінії: очікуваний ефект, виражений через величину міжпоїздного інтервалу, виглядав як зменшення цього інтервалу в 2,5...3 рази. Відомими типовими методами вимірювання пройденого шляху тягового рухомого складу є [2]: тахометричний з перерахунком кількості поділок датчикового диска в пройдений шлях; кутовий, при якому пройдений шлях обчислюється через кут повороту колеса, що котиться (цей спосіб був випробуваний на Харківському метрополітені; похибка вимірювання на перегоні довжиною 2405 м лежала в межах $(0,550 \pm 0,275)$ м); радіотехнічний по радарних даних.

Уточнення величини пройденого шляху, яка використовується в системі автоведення, досягають урахуванням поточних величин швидкості та прискорення.

Відомими типовими методами вимірювання швидкості тягового рухомого складу є [2]: за кутовою швидкістю колісної пари за допомогою осьових датчиків або датчиків, встановлених у редукторі привода колісної пари; вся апаратура, розташована на поїзді; за відрізками точно відомої довжини, розташованими точно на колії з використанням шлейфів проводів, що схрещуються [22, 23], рейкових кіл [24] або точкових датчиків [25, 26]; апаратура, розташована частково на поїзді, а частково на колії; застосування радіотехнічних доплерівських або кореляційних вимірювачів швидкості, або вимірювання швидкості за координатними даними, отриманими із штучних супутників Землі. Підвищення точності вимірювань досягають шляхом використання бортових інтелектуальних засобів обробки сигналів первинних датчиків [27-30].

Останнім часом відчутну увагу дослідники та розробники приділяють методології використання сигналів

супутникових систем глобальної навігації GPS та ГЛОНАСС для вимірювання параметрів руху поїздів при пересуванні останніх на відкритих ділянках колії. За даними роботи [31], доступна точність визначення місцезнаходження складає ± 15 м, а похибка вимірювання швидкості таким методом складала менш ніж 0,5 %. Подальшого покращення точності вимірювань можна очікувати, якщо вони проводитимуться з використанням створених за супутниковими даними еталонних координатних моделей колії.

Останнє десятиріччя характеризується майже повним переходом від використання систем АРУ одиночного виготовлення до типових систем, запропонованих на ринку транспортного будівництва низкою фірм та організацій, перш за все Siemens, Alstom, Thales, Національним товариством французьких залізниць [7, 21, 32-34]. Дані системи, як правило, встановлюються «під ключ» на метрополітенах, міських, приміських

та (рідше) швидкісних міжміських залізницях, забезпечуючи їх ефективне, безпечне та енергооптимальне функціонування.

Висновок. Автоматичне керування рухом поїздів покликане в найзагальнішому сенсі розв'язати проблему раціонального використання енергетичного та часового ресурсів залізниці. У той же час існуючі системи АРУ, які переважно розраховані на розв'язання цієї проблеми, недостатньо враховують обмеження, що накладаються на їхню роботу. На цей час склалася стабільна концепція керування рухом рейкового транспорту на полігоні. Технічні засоби, які реалізують цю концепцію і відповідно до неї формують та подають до рухомого складу керуючі діяння, що визначають режим руху, досить широко напрацьовані. Однак щонайменше у вітчизняних реаліях ці діяння мають переважно директивний характер, залишаючи відкритою проблему спроможності їх реалізації.

Список використаних джерел

1. Астрахан, В.И. Системы автоведения для управления поездами метрополитена [Текст] / В.И. Астрахан, Ю.А. Барышев. – М.: Транспорт, 1989. – 88 с.
2. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 270 с.
3. Определение оптимальных законов управления процессами движения электропоезда [Текст] / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, В.С. Блиндюк [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 38. – С. 55-69.
4. Ананьева, О.М. Підвищення ефективності роботи засобів інтервального регулювання рухом поїздів [Текст] / О.М. Ананьева // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 102. – С. 209-215.
5. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров; под ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
6. Дюбей Гопал, К. Основные принципы устройства электроприводов [Текст] / К. Дюбей Гопал. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
7. Система автоведения для скоростных электропоездов [Текст] / Т. Окамото, Я. Танака, Х. Мориками [и др.] // Sharyo to denki. – 1993. – Vol. 44, № 3. – Р. 8-11.
8. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики [Текст] / Вл.В. Сапожников, И.М. Кокурин, В.А. Кононов [и др.]; под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2006. – 248 с.
9. Chang, C.S. Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system [Text] / C.S. Chang, D.Y. Xu // IEE Proceedings Electric Power Applications. – 2000. – Vol. 147, № 3. – Р. 206-212.
10. Mei, T.X. LOG and GA solutions for active steering of railway vehicles [Text] / T.X. Mei, R.M. Goodall // IEE Proceedings Control Theory @ Applications. – 2000. – Vol. 147, № 1. – Р. 111-117.
11. Чепцов, М.М. Нейромережева модель динамічного логічного елементу “НІ” [Текст] / М.М. Чепцов, М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 128. – С. 165-175.

12. Сотник, В.О. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН [Текст] / В.О. Сотник, М.М. Бабаєв, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 36. – С. 67-78.
13. Кухарев, Г.А. Системные процессоры для обработки сигналов [Текст] / Г.А. Кухарев, А.Ю. Тропченко, В.П. Шмерко. – Минск: Беларусь, 1988. – 128 с.
14. Watanabe, K. Development of “navigation system” for high-speed train [Text] / K. Watanabe // Japanese Railway Engineering. – 1992. – № 116. – P. 21-24.
15. Egnot, J.R. Green line ATO builds on tried technology [Text] / J.R. Egnot, G.M. Babicz // Railway Gazette International. – 1993. – Vol. 149, № 3. – P. 177-178.
16. Руденко, В.Ф. О проблеме создания системы автоматизированного ведения поезда [Текст] / В.Ф. Руденко // Развитие отечественного локомотивостроения: межвуз. сб. науч. трудов. – СПб.: ПГУПС, 2005. – С. 45-51.
17. Милич, А.М. Выбор управления электропоездом со ступенчатым управлением силой тяги при поддержании постоянной скорости [Текст] / А.М. Милич // Сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1989. – Вип. 811. – С. 71-75.
18. Баранов, Л.А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем автоматического управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой [Текст] / Л.А. Баранов // Вестник МИИТа. – 2004. – № 10. – С. 3-16.
19. Выбор энергетически оптимальных режимов движения поездов [Текст] / Е.П. Блохин, А.Н. Пшинько, Г.В. Евдомах [и др.] // Залізничний транспорт України. – 2001. – № 6. – С. 19-22, 53, 54.
20. Masse, J.-P. Le metro le plus moderne du monde [Text] / J.-P. Masse // La Vie du Rail. – 1992. – № 2364. – P. 17-20.
21. Lancien L. Astrée, le contrôle-commande ferroviaire du XXI^e siècle [Text] / L. Lancien // Arts et métiers magazine. – 1995. – № 195. – P. 38-41.
22. Бабаєв, М.М. Індуктивно-проводний датчик контролю подвижних об'єктів залізничного транспорту [Текст] / М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк, В.Ю. Гребенюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 32. – С. 91-99.
23. Бабаєв, М.М. Нейросетевая модель функционирования индуктивно-проводного датчика с использованием сети с прямой передачей сигнала и обратным распространением ошибки [Текст] / М.М. Бабаєв, В.Ю. Гребенюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2014. – Вип. 38. – С. 5-13.
24. Ананьева, О.М. Частотний метод виміру швидкості руху шунта в тональних рейкових колах [Текст] / О.М. Ананьева // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 80. – С. 149-155.
25. Бабаєв, М.М. Математична модель колійного перетворювача індукційного типу [Текст] / М.М. Бабаєв, А.А. Прилипко // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2009. – Вип. 19. – С. 33-43.
26. Бабаєв, М.М. Оптимізація параметрів точкового колійного датчика [Текст] / М.М. Бабаєв, А.А. Прилипко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 113. – С. 62-67.
27. Ананьева, О.М. Динамічна модель каналу передачі сигналів АЛСН [Текст] / О.М. Ананьева // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 121. – С. 120-132.
28. Математична модель каналу передачі сигналів числових кодів АЛСН [Текст] / М.М. Бабаєв, О.М. Ананьева, М.Г. Давиденко, В.О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 134. – С. 187-198.
29. Ананьева, О.М. Временные зависимости сигнального тока локомотивного приемника числовых кодов АЛСН [Текст] / О.М. Ананьева, М.Г. Давиденко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 126-135.
30. Сотник, М.М. Аналіз кореляційних залежностей для синтезу приймача кодів АЛСН [Текст] / В.О. Сотник, М.М. Бабаєв, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 34. – С. 49-56.
31. Зорин, В.И. Применение спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС в системах управления и обеспечения безопасности движения поездов [Текст] / В.И. Зорин // ВКСС. Connect! – 2007. – № 2. – С. 102-104.
32. SIEMENS-Un VAL olympique [Text] // La vie du rail. – 2005. – № 3007. – P. 31.

33. Hohe Verfügbarkeit der fahrerlosen Canada-Line [Text] // Signal+Draht. – 2010. – Vol. 102. – № 1-2. – P. 45.

34. Singapore orders driverless cars [Text] // International Railway Journal. – 2008. – Vol. 48, № 12. – P. 16.

Блиндюк Василь Степанович, д-р техн. наук, професор, кафедра електротехніки та електричних машин Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: (057) 730-10-03.

Vasiliy Blinduk, doct. of techn. sciences, professor department of electrical engineering and electrical machines Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: (057) 730-10-03.

Наукова праця здана до друку 08.09.2015 р.