

СИТНИК Б. Т., канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій,
БРИКСІН В. О., канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій,
ЛОМОТЬКО Д. В., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики,
СИТНИК В. В., магістрант кафедри керування експлуатаційною роботою,
ДАВИДОВ І. В., аспірант кафедри інформаційних технологій
(Український державний університет залізничного транспорту)

Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду

Частина 1. Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду

Сформульовано основні вимоги до моделі системи автоматичного керування поїздом з нечітким заданням швидкості руху, запропоновано структуру моделі системи нечіткого задання швидкості з адаптивною корекцією помилки регулювання швидкості за фактичними параметрами проїзду на ділянках прямування, побудовано варіант нелінійного графіка зміни заданої швидкості руху для різних режимів проходження ділянок прямування.

Ключові слова: модель, адаптивна система, графік руху, високошвидкісний поїзд, адаптивна корекція швидкості, фактичні параметри проїзду.

Вступ

Об'єктом дослідження і проектування є адаптивні системи автоматичного керування рейковим високошвидкісним транспортом. Відомості про технічну реалізацію і характеристики адаптивних систем автоматичного керування засобами рейкового високошвидкісного транспорту (СУРВТ) розвинених країн, в яких використовуються швидкості руху 200–350 км/год, у літературі відсутні, мають рекламний характер [1–4, 17–22], оскільки такі системи разом з новітніми інформаційними технологіями і технологіями автоматичного керування засобами рейкового транспорту становлять стратегічний ресурс держав, світових фірм-виробників залізничного складу та обладнання [3].

Ці системи мають вирішувати такі завдання автоматичного оперативно-диспетчерського керування:

- збір і обробку інформації про поточний технічний стан поїздів, їх розміщення і параметри руху;

- автоматичне ведення, зміну і оптимізацію графіків руху поїздів;

- документування даних і дій машиністів, диспетчерів і систем автоматичного керування при зростанні швидкості руху поїздів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [1–4] міститься стислий огляд розвитку високошвидкісного магістрального (ВСМ) залізничного руху у світі (США, Франції, Німеччині, Великобританії, Італії, Іспанії, Швеції, Японії) за останні роки. В основу огляду покладено стале уявлення про те, що високошвидкісним вважається рух поїздів по модернізованих шляхах існуючих ліній зі швидкостями від 200 км/год до 350 км/год, а також рух поїздів по спеціалізованих високошвидкісних магістралях зі швидкостями від 250 км/год до 350 км/год.

У [5, 6] розглянуто методи теорії тягових розрахунків для реалізації графіків руху поїздів (ГРП). У [7, 8] запропоновано методи реалізації кривих ГРП гарантованої точності з використанням спрощених нечітких і нейронних мереж. У [9] вивчено питання розробки та дослідження інформаційно-керуючої та контрольною системи, оптимізації процесу керування електроприводами поїздів приміського сполучення. Запропоновано структуру системи та її окремих блоків. Розроблено математичні моделі електромеханічних систем дизель- і електропоїздів, з використанням яких знайдено оптимальне керування рухом поїздів та керування роботою енергетичного обладнання. Розроблено системи контролю на підставі таксономічного показника для виявлення розладів і контролю динамічних характеристик. Запропоновано нейронну мережу прогнозування процесів боксування. Розроблено систему підтримки прийняття рішень машиністом для економії енергоресурсів. У [10, 11] розглянуто перспективи розвитку регульованого електропривода і автоматизованих систем ведення та аналізу графіка виконаного руху. У [12–14, 16] запропоновано нові методи і моделі дискретних адаптивних регуляторів і адаптивних фільтрів для керування об'єктами високого порядку із запізненням, що використовують критерій гарантованого ступеня стійкості, що не вимагає знаходження всіх коренів характеристичного рівняння замкнутої системи керування поїздом, що враховує зміну параметрів моделі об'єкта і перешкод. У [15] розглянуто національну транспортну стратегію України на період до 2030 року. У [17] запропоновано процедуру автоматизованої побудови графіка руху поїздів на залізничному напрямку, у [18] запропоновано формування процедури автоматизації розробки графіка руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. У [19] методом дослідження є системний підхід до поставленої проблеми пропуску вантажних поїздів різної маси на залізничному напрямку. Науковою новизною є визначення раціональних швидкостей руху вантажних поїздів різної маси за прискорення руху пасажирських поїздів. У [20] проведено аналіз системи графіка виконаного руху пасажирських та приміських поїздів у ПАТ «Укрзалізниця» (УЗ), її поточних можливостей та запропоновано напрями розвитку: фіксація інформації про стан стаціонарних та рухомих об'єктів; визначення рівня виконання графіка руху пасажирських і приміських поїздів по станціях посадки/висадки пасажирів. У [21] запропоновано метод моделювання поширення затримки у нециклічному графіку руху поїздів з урахуванням технічних і технологічних особливостей залізничної мережі змішаного руху пасажирських і вантажних поїздів. Розроблено процедуру дослідження впливу затримки поїздів у нормативному графіку руху поїздів на базі

оптимізаційної математичної моделі побудови графіка руху поїздів з урахуванням заданої первинної затримки. Проведено експериментальні дослідження моделювання поширення затримки поїздів у нормативному графіку руху поїздів з урахуванням взаємоув'язки залізничних дільниць. У [22] формалізовано технологічний процес перевезення вантажу на напрямку у вигляді оптимізаційної математичної моделі процесу просування вантажних вагонів. Цільова функція моделі представляє сукупні експлуатаційні витрати і побудована на використанні інтеграла Лебега–Стілтєса. Оптимізаційна модель є основою формування автоматизованої технології керування вантажними перевезеннями, яку пропонується реалізувати у вигляді системи підтримки прийняття рішень диспетчерського апарату.

У [23] УЗ склала новий графік руху пасажирських поїздів у рух на 2022 рік: змінять 58 % маршрутів, додадуть 18 нових поїздів. Також в УЗ обіцяють поладити один із двох двоповерхових електропоїздів Skoda, який курсуватиме між Києвом і Тернополем. Міжнародне сполучення на 2022 рік заплановане у вигляді 14 маршрутів. Додаватимуться дві пари поїздів у напрямку польського Пшемисля. Також УЗ заплановано поєднати прямим залізничним сполученням Київ зі столицею Молдови.

Як приклад розглянемо представлений найбільшим світовим виробником залізничного складу – компанією Bombardier Transportation на конгресі Eurail Speed 2005 [3] і виставці в Мілані у вигляді макетів, моделей і віртуальних презентацій проект перспективного високошвидкісного поїзда Zefiro з розподіленою тягою, розрахованого на максимальну швидкість 350 км/год.

Середній термін створення високошвидкісних поїздів від початку роботи над проектом до освоєння серійного виробництва і введення в комерційну експлуатацію коливається від 8 до 15 років. Поїзд Zefiro [3] призначений для експлуатації на внутрішніх і міжнародних маршрутах на лініях, електрифікованих за різними системами тягового постачання (до чотирьох) і оснащених різними системами сигналізації та керування рухом поїздів.

Розробка поїзда велася з урахуванням максимальної економічної ефективності для компаній-операторів, яка досягається за рахунок відносно низьких експлуатаційних витрат. Один з варіантів дизайнерського опрацювання зовнішнього вигляду поїзда Zefiro наведено на рис. 1. Відомості про основні його розміри і технічні характеристики, а також розрахункові умови експлуатації наведено в [3].



Рис. 1. Один з варіантів зовнішнього вигляду поїзда Zefiro

Основні розмірні характеристики поїзда Zefiro 300: довжина 4-вагонного поїзда – 100 м, 16-вагонного – 400 м.

Основні технічні характеристики поїзда Zefiro 300: конструкційна швидкість – 350 км/год; прискорення – $0,57 \text{ м/с}^2$ (з розрахунковим числом пасажирів), $0,7 \text{ м/с}^2$ (при максимальній експлуатаційній швидкості); максимальна тягова міцність – 8200 кВт; нахил рейок – 1:40; радіус прохідних кривих – 600 м (вертикальної опуклої) і 900 м (вертикальної увігнутої), 150 м (горизонтальної для поїзда), 120 м (горизонтальної для одиночного вагона).

Формування поїзда. Поїзди Zefiro незалежно від складових формуються з вагонів трьох типів: кінцевих моторних (Mc), проміжних моторних (M) і проміжних причіпних зі струмоприймачем (Tp) і без струмоприймача (T).

З цих вагонів комплектуються так звані базові 4-вагонні секції двох видів: секція 1 (для варіантів поїзда з максимальною швидкістю 250 і 300 км/год) – Mc1 + TP1 + T1 + M1; секція 2 для 250 і 300 км/год – Mc2 + TP2 + T2 + T3, для 300 км/год – Mc2 + TP2 + T2 + M2. З двох секцій формується 8-вагонний поїзд, з чотирьох – 16-вагонний.

Проведений аналіз показав:

1. В існуючих системах керування локомотивом взаємодіють дві системи керування (автоматичної локомотивної сигналізації і безпеки АЛС та автоматичного блокування АБ і електричної централізації ЕЦ) з інтегрованим у них оператором (машиністом), який є їх складовою частиною [16].

2. На сьогодні автоматично здійснюється тільки екстрене гальмування. Система автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) видає дискретну інформацію про швидкість у вигляді показань локомотивного світлофора (зелений, жовтий, жовто-червоний, червоний, місячно-білий). Відповідно до цього машиніст керує рукояткою контролера, яка має: 16 позицій – тепловоз пасажирський, 8 позицій – маневровий, 4 – електровоз великої потужності.

3. Основними недоліками існуючих систем реалізації автоматичного керування високошвидкісними рухомими об'єктами (РО) в Україні є:

- відсутність комп'ютерних нечітких моделей та систем автоматичного задання графіка швидкості руху, прогнозування та адаптивної корекції швидкості руху поїздів за фактичними параметрами проїзду;

- відсутність автоматичної корекції параметрів настроювання регуляторів у контурах керування рухом поїздів при зміні параметрів об'єктів і перешкод (маса m , величини радіусів прохідних кривих r ; підйомів/ухилів j (профіль колії), поточні зміни співвідношень корисних сигналів до перешкод у вхідних ланцюгах регуляторів);

- значна залежність і зниження ефективності керування від суб'єктивних і обмежених фізіологічними характеристиками якостей машиністів і диспетчерів при зростанні швидкості руху і зміні поточних ситуацій.

Існуюча автоматизована система керування локомотивом нижнього рівня показана на рис. 2.

4. Високошвидкісні залізничні сполучення з експлуатаційною швидкістю руху поїздів 350 км/год і більше стають звичайним явищем у цивілізованих країнах і набувають усе більшої популярності не в останню чергу завдяки високому рівню безпеки. Високошвидкісні магістралі, за якими за 40 з невеликим років перевезено понад 6 млрд пасажирів [1–4], до нинішнього часу залишаються абсолютно безпечними. При поїзді по ВСМ не загинув жоден пасажир.

Визначення мети і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності високошвидкісних пасажирських перевезень шляхом удосконалення процесу організації адаптивних систем автоматичного керування рухом поїздів.

Постановка завдання синтезу адаптивної системи автоматичного керування рухом високошвидкісних поїздів. Для досягнення мети необхідним є вирішення таких завдань: створення моделі підсистеми автоматичного задання графіків зміни необхідної заданої швидкості руху в уставку регулятора швидкості у функції залежної поточної змінної шляху $S(t)$ проходження ділянки, а також адаптивна корекція відхилень поточної швидкості від заданої. Однією з основних вимог до систем автоматичного керування рухом є забезпечення виведення поїзда на задану швидкість при мінімальних витратах енергоресурсів за мінімальний час при дотриманні обмежень, передбачених графіком руху, конструктивними та експлуатаційними вимогами, що висувуються до систем автоматичного керування за критерієм гарантованого ступеня стійкості в умовах завод та перешкод змінної інтенсивності.

АСК електропередачею поїзда нижнього рівня

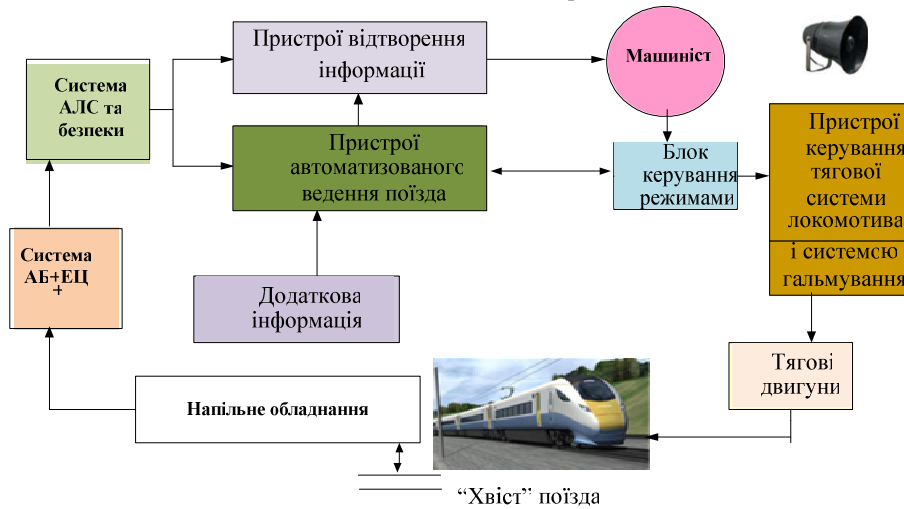


Рис. 2. Існуюча автоматизована система керування локомотивом

Вимоги до моделі системи автоматичного керування поїздом з нечітким заданням швидкості руху і її корекцією на ділянках проїзду. Для реалізації заданого графіка руху гарантованої точності [12–15, 16] на ділянці проїзду необхідна автоматична корекція відхилень поточної швидкості від заданої графіком руху за допомогою цифрових адаптивних ПІ- або нечітких регуляторів.

Таким чином, актуальним є: створення моделі адаптивної системи автоматичного задання графіків зміни необхідної заданої швидкості руху в уставку регулятора швидкості у функції залежної поточної змінної шляху $S(t)$ проходження ділянки, а також адаптивна корекція відхилень поточної швидкості від заданої. Однією з головних функцій таких підсистем має бути процедура формування керуючих впливів. Автоматизація такої процедури підвищить ефективність автоматичного керування рухомим

об'єктом (РО) і значною мірою усуне суб'єктивний людський фактор.

Основна частина дослідження

На основну систему керування покладаються функції керування графіком руху поїзда. Значення швидкості на i -й ділянці шляху може бути задано автоматично по карті графіка руху поїзда по ділянці проїзду за сигналами системи АЛС, а значення гранично допустимого прискорення – в межах від $\pm 0,4/c^2$ до $\pm 0,7 m/c^2$. Маючи карту (графік) руху, можна синтезувати керування для окремих ділянок руху.

Аналіз режимів руху. Режими руху проїзду поїзда по координатах швидкість – час можна розділити на кілька фаз (рис. 3): розгін, усталений рух, вибіг, гальмування і зупинка.

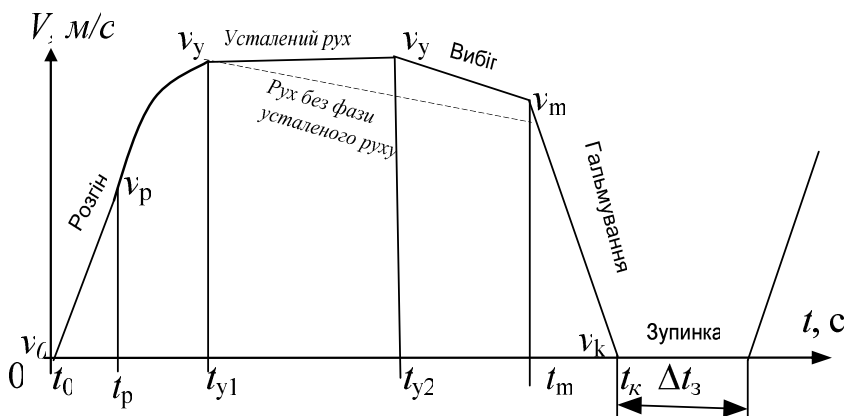


Рис. 3. Крива зміни швидкості руху по ділянці проїзду

Як видно з рис. 4, переведення об'єкта з початкового стану $S(0)$ у кінцевий $S(t_k)$ за час t_k може здійснюватися за однією з можливих кривих ($S^1, \dots, S^l, \dots, S^q$) (траєкторій). Графік проходження ділянки руху поїздом подано на рис. 4.

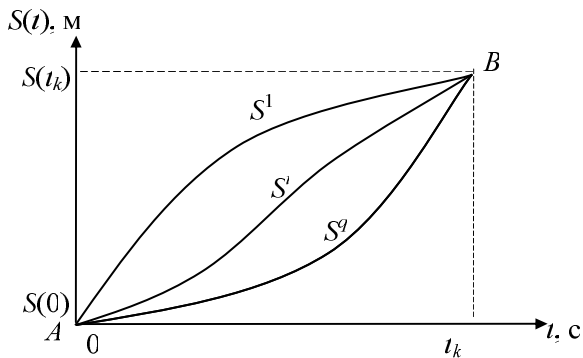


Рис. 4. Графік проходження ділянки руху поїздом

При цьому деякі показники якості можуть відрізнятися від оптимальних значень. Наприклад, відхилення від необхідного значення гранично допустимого прискорення.

Для конкретної ділянки колії відомими є: величини радіусів прохідних кривих r ; підйомів/ухилів j (профіль колії); початкові і кінцеві умови по колії і швидкості руху (S_0, S_k, V_0, V_k); гранично допустимі значення прискорення і сили тяги; час руху. Тут обмеження початкових і кінцевих значень ділянки колії і швидкості мають виконуватися строго, тобто має вирішуватися завдання знаходження оптимальної траєкторії. Дані про гранично допустимі значення прискорення на ділянці колії мають використовуватися для знаходження оптимальної траєкторії.

Оскільки значення гранично допустимого прискорення перебуває в межах $\pm 0.7 \text{ м/с}^2$, то, маючи карту (графік) руху, необхідно синтезувати керування для окремих ділянок руху S_0, S_k . Тоді для ділянок розгону гранично допустиме значення прискорення перебуває в межах від 0.4 до 0.7 м/с^2 , для ділянок уповільнення – від -0.4 до -0.7 м/с^2 і для ділянок з постійною швидкістю – дорівнює нулю.

Вирішення завдання розробки системи автоматичного керування (АСК) рухом поїзда з урахуванням забезпечення заданого критерію якості (гарантованого ступеня стійкості [12–14, 16]) доцільно здійснювати у вигляді як основної системи автоматичного керування графіком руху, що відноситься до верхнього ієрархічного рівня (АСК УЗ, ділянок, доріг, станцій), так і бортової (підпорядкованої) АСК швидкості, нижчого локального ієрархічного рівня – АСК електропередач локомотива)

Перспективні системи автоматичного керування поїздом здатні видавати нескінченне число градацій швидкості, проте, як і раніше, в цьому ланцюжку як передавальна і вкрай ненадійна ланка є людина. Перспективна схема системи автоматичної зміни графіка руху і автоматичного керування поїздом у СУРВТ надана на рис. 5, на якому укрупнено показані АРМи, обладнання, завдання та основні функції контролю і управління відповідних рівнів керування.

Вилучення машиніста з ланцюга бортової системи керування високошвидкісним локомотивом шляхом створення автомашиніста (надання його функцій диспетчеру руху) забезпечить безпосередню взаємодію трьох систем: СЦБ, автомашиніст, локомотив. Це особливо є актуальним [21] у зв'язку з необхідністю підтримки раціональної швидкості руху РО при її зростанні в СУРВТ і відсутності ряду найважливіших засобів автоматичного контролю (наприклад завд і перешкод змінної інтенсивності, величини радіусів прохідних кривих r ; підйомів/ухилів j , достовірної і оперативної інформації про дислокацію та ін.), Це потребує формування керуючих впливів в умовах невизначеності, нечіткості. *Перспективні СУРВТ мають виконувати автоматизоване ведення графіків руху і, на відміну від існуючих систем, які тільки задають обмеження швидкості на основі даних підсистем автоблокування, автоматично формувати раціональну швидкість поїзда.* Для ефективного автоматичного керування швидкістю перспективні адаптивні СУРВТ повинні мати розвинену базу даних, частина якої дубльована в бортових комп'ютерах локомотивів. Така база даних має містити:

- цифрову карту мережі залізниць;
- цифровий опис планів станцій;
- цифрові дані про стан (чітка і нечітка інформація) рейкової колії; супутникову дислокацію рухомих одиниць (приблизну);
- дислокацію, яка визначається за електронними пікетами (точна);
- швидкість, яка рекомендується диспетчерськими підсистемами на основі розподілу РО в результаті стеження за перевезеннями;
- рекомендовані графіки руху поїздів;
- величини радіусів прохідних кривих r ; підйомів/ухилів j (профіль колії);
- масу (вагу) m поїздів, яка визначається масовимірювачами рухомих об'єктів.

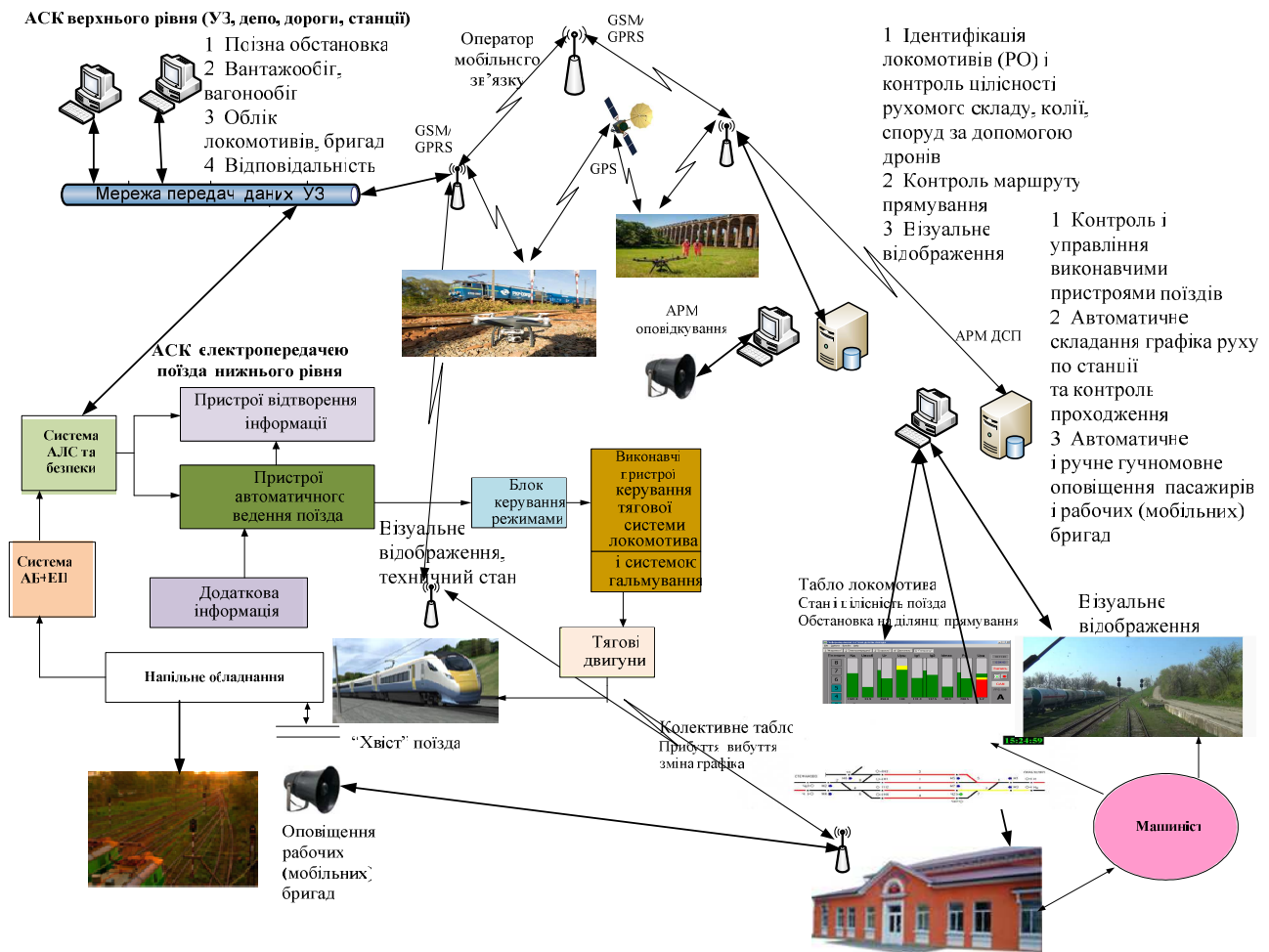


Рис. 5. Перспективна схема системи автоматичного керування високошвидкісним поїздом у СУРВТ

Наявність зазначеної бази даних дає змогу прогнозувати такі переваги перспективних систем СУРВТ:

- на основі моделювання, адаптації і оптимізації систем корекції швидкості руху поїздів за критерієм гарантованого ступеня стійкості збільшити дільничну швидкість поїздів, підвищити стабільність підтримки графіків руху, скоротити парк вагонів і локомотивів та зменшити енерговитрати в перехідних процесах [9, 12–14, 16];

- зменшити кількість непередбачених зупинок, нерациональних затримок поїздів усіх категорій на ділянках залізниць [16, 17–22];

- при збільшенні дільничної швидкості поїздів, відповідно до запланованого графіка, Укрзалізниця розраховує реалізувати 18 нових пар поїздів, 8 пар поїздів зі змінним маршрутом курсування, 7 пар зі змінним маршрутом, а рух 49 поїздів – прискорити. Згідно із планом зміни у русі на 2022 рік мають зекономити пасажиром понад 4,5 млн годин часу [23].

Таким чином, автоматичне задання та регулювання раціональної швидкості поїзда у функції поточного стану на ділянці проходження є основою автоматичного (без участі машиніста) ведення графіка руху і вдосконалення експлуатації засобів рейкового транспорту [14, 16, 23].

Однак до нинішнього часу таких автоматичних систем формування нелінійних кривих графіка руху поїзда гарантованої точності не створено. В останні десять років інтенсивно розвиваються методи синтезу автоматичних систем задання вхідних нелінійних сигналів у контури автоматичного керування швидкістю РО, що реалізують графік руху в реальному масштабі часу, на основі нечіткої логіки, нейронних мереж і нейронечітких мереж [7, 8].

Структура запропонованої адаптивної моделі системи нечіткого задання швидкості $V_0(s)$ з адаптивною корекцією помилки регулювання швидкості $e(t,s)=V_0(\Delta s)-V(t)$ за фактичними параметрами проходження подана на рис. 6.

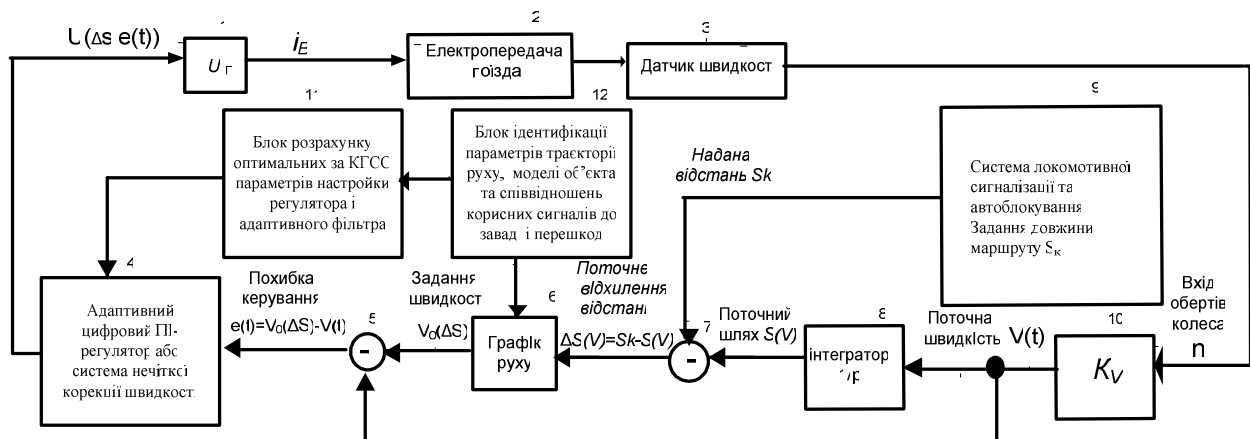


Рис. 6. Спрощена структурна схема запропонованої моделі адаптивної системи керування електропередачею поїзда по нечіткому заданню швидкості за поточним графіком руху з адаптивною корекцією помилки регулювання швидкості

До запропонованої моделі системи додатково до звичної моделі залучені блоки 4, 6, 11, 12 з відповідними зв'язками. Блок 6 задання графіка руху має додаткові входи для введення сигналу відхилення $\Delta S(V)$ поточної координати шляху проїзду $S(V)$ від заданої відстані S_k , маси та параметрів траєкторії руху (ухили, підйоми, радіуси траєкторій руху) від блока ідентифікації 12. Сигнал $V_0(\Delta S)$ нечіткого задання швидкості руху формується блоком 6 по сигналу $\Delta S(V)$ відхилення $\Delta S(V)$. Сигнал помилки регулювання швидкості формується блоком 5 за формулою $e(t, s) = V_0(\Delta S) - V(t)$. Блок адаптації 11 обчислює оптимальні за критерієм гарантованого ступеня стійкості (КГСС) параметри налаштування цифрового адаптивного ПІ-регулятора 4 корекції швидкості руху поїзда та адаптивного фільтра відповідно до результатів робіт [12–14,16].

На рис. 7 наведено вихідні варіанти кривих необхідного графіка зміни швидкості поїзда при русі на певній ділянці колії при максимальному прискоренні/уповільненні. У процесі руху поїзда (дизель-поїзда, електропоїзда) для кривої графіка руху можна виділити задані обмеження швидкості і довжини ділянок обмеження, наприклад $(0 - B, B - E, E - G)$. Рух з постійною швидкістю при проїзді буде на ділянках $(A - B, C - D, E - F)$, рух з прискоренням – на ділянках $(0 - A$ і $B - C)$, а з уповільненням – на ділянках $(D - E, F - G)$. При цьому в процесі руху має дотримуватися графік руху, який передбачає прибуття поїзда в кінцевий пункт у строго призначений час при максимально допустимих значеннях швидкості руху, прискорення і уповільнення, тобто має здійснюватися вимога переведення об'єкта керування з початкового стану S_0 в кінцевий S_{k+1} за необхідний час. Ці

обмеження швидкості на певній ділянці колії визначаються, наприклад, з умови комфортності пасажирів, мінімальності енерговитрат, швидкодії та інших умов.

Оскільки відомі початкові кінцеві значення для швидкості руху на кожній ділянці графіка руху і гранично допустимі значення для прискорення/уповільнення, то для рівняння (1) рівноприскореного руху РО перша (швидкість) і друга (прискорення) похідні від функції $S(t)$ шляху, описуються залежностями (2) і (3).

$$\frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = 0 \quad (1)$$

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt} \approx \frac{\nabla S(t)}{\nabla t} \quad (2)$$

$$\alpha_t = \frac{d^2 S(t)}{dt^2} = \frac{dV(t)}{dt} \approx \frac{\nabla V(t)}{\nabla t} \quad (3)$$

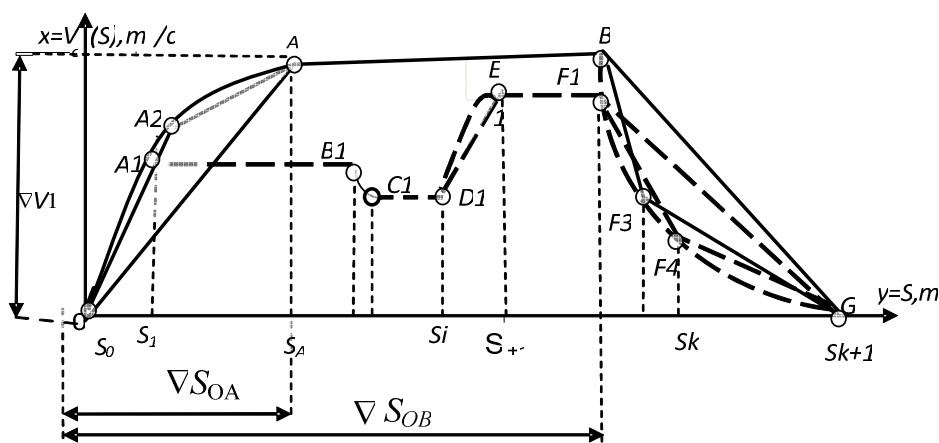


Рис. 7. Вихідні варіанти графіка зміни заданої швидкості $V_o(S) = f(S)$ руху для різних режимів проходження

Оскільки

$$V(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \alpha_{\tau} dt = \alpha_{\tau} (t_{i+1} - t_i),$$

$$S(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \alpha_{\tau} t dt = \frac{\alpha_{\tau} (t_{i+1} - t_i)^2}{2} = \frac{\alpha_{\tau} \nabla t^2}{2},$$

$$\nabla t = \frac{\nabla V(t)}{\alpha_{\tau}},$$

то координати кривих на відповідних ділянках розгону або гальмування на графіку визначаються параболою OA , BG , $B1C1$, $D1E1$, $F1G$ за формулами (4), (5).

$$\nabla s_i = \frac{\nabla V^2}{2\alpha_{\tau}} = \frac{(V_{i+1} - V_i)^2}{2\alpha_{\tau}}, \quad (4)$$

$$\nabla V = \pm \sqrt{2\alpha_{\tau} \nabla s_i}. \quad (5)$$

Завданням системи автоматичного керування є забезпечення проходження по заданій траєкторії руху об'єкта керування з початкового стану S_o в кінцевий $S_{k+1}(t_k)$ при дотриманні заданих обмежень щодо прискорення та критерію якості системи керування.

Після заміни у виразі (1) похідних різницями запишемо:

$$S_{i+1}(t) = S_i(t) + V_i(t) \nabla t + 0.5 * \alpha_{\tau} \nabla t^2 \quad (6)$$

або

$$S_{i+1}(t) = S_i(t) + V_i(t) \nabla t + \frac{\nabla V(t)^2}{2\alpha_{\tau}} \quad \text{при } \alpha_{\tau} \neq 0 \quad \text{і}$$

$$S_{i+1}(t) = S_i(t) + V_i(t) \nabla t \quad \text{при } \alpha_{\tau} = 0.$$

Припустимо, що для кривої $OABG$ середня швидкість на ділянці ∇S_{A-B} дорівнює $V_{A-B} = 72$ км/год (20 м/с), прискорення на цій ділянці $\alpha_{\tau} = 0$ м/с². Час проходження ділянки довжиною дорівнюватиме

$$t_{A-B} = \frac{\nabla S_{A-B}}{V_{A-B}} = \frac{(S_B - S_A)}{20}.$$

Довжина ділянки при рівноприскореному $\alpha = 0,7$ м/с² русі буде дорівнювати

$$\nabla s_{O-A} = \frac{\nabla V^2}{2\alpha_{\tau}} = \frac{(V_A - V_0)^2}{2\alpha_{\tau}} = \frac{(72 - 0)^2}{2 * 0,7} * \left(\frac{1000}{3600}\right)^2 = 285 \text{ м.}$$

Тоді довжина ділянки $O - B$

$$\nabla s_{O-B} = \nabla s_{O-A} + \nabla s_{A-B}.$$

Використовуючи наведені формули, можна визначити довжини всіх ділянок, час їх проходження, загальний час і середню швидкість руху на ділянці $O - G$.

На основі методу [7, 8] реалізації нелінійних кривих на окремих ділянках, задання швидкості (див. рис. 6) руху РО гарантованої точності, комп'ютерної моделі системи нечіткого задання швидкості $V_o(s)$ і адаптивної корекції помилки регулювання швидкості $e(t, s) = V_o(\Delta s) - V(t)$ за фактичними параметрами проходження (рис.5) і результати моделювання будуть розглянуті в наступних частинах статті.

Висновки з дослідження і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

1. У роботі сформульовано основні вимоги до моделі адаптивної системи автоматичного керування поїздом з нечітким заданням швидкості руху і її автоматичною корекцією на ділянках проїзду.

2. Запропоновано удосконалену структуру моделі системи нечіткого задання швидкості $V_0(s)$ з корекцією помилки регулювання швидкості РО за фактичними параметрами проїзду за допомогою адаптивного ПІ- або нечіткого регулятора (рис. 6).

3. Побудовано вихідний варіант нелінійного графіка зміни заданої швидкості $V_0(S) = f(S)$ руху РО гарантованої точності для різних можливих режимів проходження ділянок проїзду (рис.7).

4. У наступних частинах роботи буде надано аналіз існуючих способів формування сигналів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного або змінного струму. Запропоновано комп'ютерну модель системи автоматичного керування поїздом з нечітким заданням швидкості руху, нечіткою корекцією швидкості на ділянках проїзду, комп'ютерну модель системи керування з корекцією швидкості з нечітким або адаптивним цифровим ПІ-регулятором і результати моделювання.

Список використаних джерел

1. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. Ч. 2. *Железные дороги мира*. URL: <https://zdmira.com/archive/2005/08>.
2. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. Ч. 3. *Железные дороги мира*. URL: <https://zdmira.com/archive/2005/09>.
3. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Ч. 1. К итогам конгресса EurailSpeed 2005. *Железные дороги мира*. URL: <https://zdmira.com/archive/2005/12>.
4. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Ч. 2. *Железные дороги мира*. 2006. № 1. URL: <https://zdmira.com/archive/2006/01>.
5. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: монография: в 2 т. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. транспорта им. академика В. Лазаряна, 2010. Т. 2. 361 с. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/11981/1/Getman.pdf>.
6. Френкель С. Я. Техника тяговых расчетов: пособие. Гомель: БелГУТ, 2005. 80 с. URL: http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/494/frenkel_tehnika_tyag_rasch.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
7. Реализация нейронечетких моделей и регуляторов гарантированной точности /В. А. Брыксин, В. С. Михайленко, Б. Т. Сытник, С. И. Яцько. *Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 4. С. 24–28.
8. В. Sytnik CONSTRUCTION OF AN ANALYTICAL METHOD FOR LIMITING THE COMPLEXITY OF NEURAL-FUZZY MODELS WITH GUARANTEED ACCURACY/В. Sytnik, V. Bryksin, S. Yatsko, Y. Vashchenko. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. ISSN 1729-4061 (Online), ISSN 1729-3774. VOL 2, NO4(98) (2019). P. 8–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2%284%29_2.
9. Ліпчанський М. В. Моделювання, оптимізація та контроль систем керування рухомого складу приміського сполучення: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.07; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». Харків, 2008. 20 с. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.
10. Ильинский Н. Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода. *Электричество*. 2003. № 2. С. 2–7.
11. Коваленко Н. А., Батурич А. П., Морозов В. Н. Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения (ГИД Урал-ВНИИЖТ): учеб. пособ. Москва: МГУПС (МИИТ), 2015. 66 с. URL: <https://docplayer.com/29582816>.
12. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 1. Оптимизация на основе критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, В. Б. Сытник, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 2. С. 3–8.
13. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 2. Моделирование цифровой системы третьего порядка с запаздыванием с использованием критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, В. Б. Сытник, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 3. С. 14–19.
14. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 3. Синтез адаптивного частотно-импульсного ПИ-регулятора с оптимизацией параметров настройки на основе критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, С. И. Яцько, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2012. № 1. С. 71–79.
15. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: [схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018р.]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/proshvalennya-nacionalnoyi-transportnoyi-strategiyi-ukrayini-na-period-do-2030-roku>.

16. Бриксін В. О. Моделі та методи автоматизованого керування рухом поїзда на основі адаптивної корекції швидкості: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.03; Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2016. 20 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/20137>. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2016_165_6.
17. Прохорченко Г. О., Семененко Р. І. Розробка процедури автоматизованої побудови графіка руху поїздів на залізничному напрямку. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 165. С. 26–34. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2015_9_4.
18. Бутько Т. В., Прохорченко Г. О. Формування процедури автоматизації розробки графіка руху поїздів на основі алгоритму штучних бджолиних колоній. *Транспортні системи та технології перевезень*: зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. Вип.9. С. 10–15. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr_2015_9_15.
19. Логвінова Н. О. Оптимізація ходової швидкості руху вантажних поїздів на залізничному напрямку в умовах енергооптимального графіка руху поїздів. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 9. С. 102–107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZTU_2017_2_6.
20. Розвиток системи аналізу графіка виконаного руху пасажирських та приміських поїздів в ПАТ «Укрзалізниця» / С. М. Овчаренко, Т. О. Стегній, Л. В. Василькова, О. О. Овчаренко. *Залізничний транспорт України*. 2017. № 2. С. 21–24. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_1\(3\)_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_1(3)_5).
21. Development of the method for modeling the propagation of delays in non-cyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic / T. Butko, A. Prokhorchenko, T. Golovko, G. Prokhorchenko. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 1(3). С. 30–39. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_1\(3\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_1(3)_2).
22. Forming an automated technology to manage freight transportation along a direction / T. Butko, O. Kostienikov, L. Parkhomenko, V. Prokhorov, G. Vogomazova. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 1(3). С. 6–13. URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/novosti/uz-sostavila-grafik-dviyeniya-na-2022-god-izmenyat-58-marshrutov-dobavyat-18-novyh-poezdov>.
- B.T. Sytnik, V.O. Bryksin, D.V. Lomotko, V.V. Sytnyk, I.V. Davydov. Models and methods of creating systems for the implementation of the schedules of high-speed trains with adaptive speed correction according to the actual parameters of the route.**
- Abstract.** The basic requirements for the model of the automatic control system of the train with a fuzzy task of the speed of movement and its correction on the sections of the passage are formulated, the structure of the model of the system of fuzzy specification of the speed with the correction of the error in speed control according to the actual parameters of modes of passage of sections of passage.
- The object of research and design are automatic control systems for high-speed rail transport. Information on the technical characteristics of high-speed rail dispatch control systems of developed countries, which use high speeds (200 - 350 km/h) in the literature are advertising, possibly because such systems together with the newest information technologies and technologies of automated control of means of rail transport make a strategic resource of the states and have cost which is not lifting for Ukrain. These systems should solve the following tasks of automatic operational control:
- collection and processing of information on the state of railway landfills and location of mobile objects (MO);
 - keeping train schedules;
 - coordination of work of separate dispatching circles and landfills of railways;
 - documentation of data and actions of operational and dispatching personnel.
- The main disadvantages of existing dispatching subsystems for the implementation of automatic operational and dispatching management are:
- does not dare to predict the development of current situations;
 - significant dependence of management efficiency on subjective and physiologically limited qualities of drivers and controllers.
- To implement a given schedule of guaranteed accuracy on the roadway requires automatic correction of deviations of the current speed from the specified schedule of Fig. 2 at the lower level of control using digital adaptive PI or fuzzy controllers.
- Thus, it is important to create control subsystems to automatically set schedules to change the required current speed in the speed controller setting as a function of the dependent variable, the passage of the path $S(t)$, and correction of deviations of the current speed from the set. One of the main functions of such subsystems should be the procedure of formation of control effects. Automation of such a procedure will increase the efficiency of automatic control of a moving object (MO) and largely eliminate the subjective human factor.
- The presence of the specified database allows to predict the following advantages of perspective systems:

- on the basis of modeling, adaptation and optimization of train speed correction systems according to the criterion of guaranteed degree of stability to increase the section speed of trains, reduce the fleet of cars and locomotives, and reduce energy consumption in transients [9,12-14,16];

- by increasing the stability of support for traffic schedules to reduce the number of unforeseen stops, irrational delays of trains of all categories on railway sections [16,17-22];

- with the increase of the section speed of trains, according to the planned schedule, Ukrzaliznytsia expects to sell 18 new pairs of trains, eight pairs of trains with a changed route, seven pairs with a changed route, and the movement of 49 trains - to accelerate. According to the plan, changes in traffic for 2022 should save passengers more than 4.5 million hours [23].

Thus, the automatic task of rational train speed as a function of the current position on the section of the passage is the basis of automatic (without the participation of the driver) scheduling and improving the operation of rail vehicles.

However, to date, such automatic systems for generating nonlinear curves of the train schedule of guaranteed accuracy have not been created. In the last ten years, methods for the synthesis of automatic systems for setting input nonlinear signals into the circuits of automatic speed control MO, which implement a real-time motion schedule based on fuzzy logic, neural networks and fuzzy measures, have been intensively developed.

Conclusions

1. The paper formulates the main requirements for the model of adaptive automatic train control system with a fuzzy task of speed and its automatic correction on the sections.

2. An improved structure of the model of the system of fuzzy speed setting V_0 (s) with correction of the error of speed regulation RO according to the actual travel parameters by means of an adaptive PI or fuzzy controller is proposed (Fig. 5).

3. The initial variant of the nonlinear graph of change of the set speed V_0 (S) = f (S) of movement of RO of the guaranteed accuracy [7, 8] for various possible modes of passage of sections of journey (fig. 6) is constructed.

4. In the following parts of the work, an analysis of existing methods of generating train speed control signals with DC or AC traction motors will be provided. The computer model of the automatic train control system with fuzzy speed setting, fuzzy speed correction in the sections, the computer model of the control system with speed correction with fuzzy or adaptive digital PI controller and simulation results are offered [7, 8, 13–16].

Keywords: model, adaptive system, schedule, high-speed train, adaptive speed correction, actual tracking parameters

Б. Т. Сытник, В. А. Брыксин, Д. В. Ломотько, В. В. Сытник, И. В. Давыдов. Модели и методы создания систем реализации графиков движения высокоскоростных поездов с адаптивной коррекцией скорости по фактическим параметрам следования.

Аннотация. Сформулированы основные требования к модели системы автоматического управления поездом с нечетким заданием скорости движения и ее коррекцией на участках проезда, предложена структура модели системы нечеткого задания скорости с коррекцией ошибки регулирования скорости по фактическим параметрам проезда, построен вариант нелинейного графика изменения заданной скорости движения для различных режимов прохождения участков проезда.

Ключевые слова: модель, адаптивная система, график движения, скоростной поезд, адаптивная коррекция скорости, фактические параметры следования.

Надійшла 04.10.2021 р.

Ситник Борис Тимофійович, кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: bts12021947@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Брыксин Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8036-8811>

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики м. Харків, Україна. E-mail: den@kart.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Ситник Віолета Валерійівна, магістрант кафедри керування експлуатаційною роботою (УЕР), (Проект ТЕМПУС), Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: vetapanda1997@gmail.com

Давыдов Ілля Валерійович, аспірант кафедри інформаційних технологій, Головний інженер «Харківського відділення» філії «Головний інформаційно-обчислювальний центр» АТ «Укрзалізниця» (ГІОЦ УЗ). E-mail: ldc000@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3658-4098>

Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: bts12021947@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Bryksin Volodymyr, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8036-8811>

Lomotko Denis, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of "Transport Systems and Logistics", Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: den@kart.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Sytnyk Violeta, master student, Department of Department of Operational Management, (TEMPUS Project), Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: veta.panda1997@gmail.com

Davydov Ilya, graduate student of the Department of "Information Technology", Chief Engineer of the "Kharkiv Branch" of the branch "Chief Information - Computing Center" of JSC "Ukrzaliznytsia", Ukraine, Kharkiv. E-mail: idc000@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3658-4098>