

# Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.331;621.311.4

В.В. Божко

Державне підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», Харків

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ПІДСИЛЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Наведено схему заміщення тягового електропостачання двоколіїної ділянки між двома підстанціями при русі двох потягів. За наявними розрахунками побудована Matlab модель і отримано залежності по допустимому навантаженні на зустрічній колії від потужності швидкісного потягу для базисної міжпідстанційної зони завдовжки 20 км, при якому виконується умова щодо забезпечення розрахункової величини споживаємої потужності і мінімальні втрати енергії в тяговому електропостачанні та електрорухомому складі.

**Ключові слова:** швидкісний рух, стабілізація напруги, втрати потужності.

### Вступ

Проблема організації швидкісного руху пасажирських поїздів із швидкостями до 200 км/год на електрифікованих лініях залізниць пов'язана з використанням більш потужного електрорухомого складу (ЕРС), що передбачає необхідність суттєвого підсилення тягового електропостачання [1]. Останнє є особливо важливим для ліній, електрифікованих в системі постійного струму 3,3 кВ, пропускна здатність яких з боку тягового електропостачання значно поступається пропускній здатності ліній, що електрифіковано в системі однофазного змінного струму промислової частоти напруги 27,5 кВ [2].

Для комп'ютерного моделювання існуючого тягового електропостачання постійного струму розглянемо двоколіїну ділянку між двома тяговими підстанціями на якій підсилення забезпечується за рахунок стабілізації напруги на струмоприймачах ЕРС шляхом регулювання її на фідерах тягової підстанції. Цей засіб підсилення реалізується на електрифікованих лініях за допомогою установки на тягових підстанціях послідовно з діодними дванадцятипульсними випрямлячами додаткових вольтододаєвих трифазних тиристорних випрямлячів мостового типу [3].

Стабілізація напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС на рівні 2,9–3,1 кВ, що близько до розрахункового рівня 3 кВ при якому і визначаються всі тягові параметри руху поїздів, є найбільш ефективним результатом підсилення тягового електропостачання постійного струму 3,3 кВ, так як при цьому забезпечується не тільки заданий графік руху поїздів, але й їх розрахункові величини споживаємої потужності і мінімальні втрати енергії в тяговому електропостачанні та ЕРС [4].

Розрахункова схема заміщення тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ з підсиленням за рахунок стабілізації напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС для двоколіїної ділянки між двома суміжними тяговими підстанціями з одночасним рухом до двох зустрічних швидкісних поїздів наведена на рис. 1.

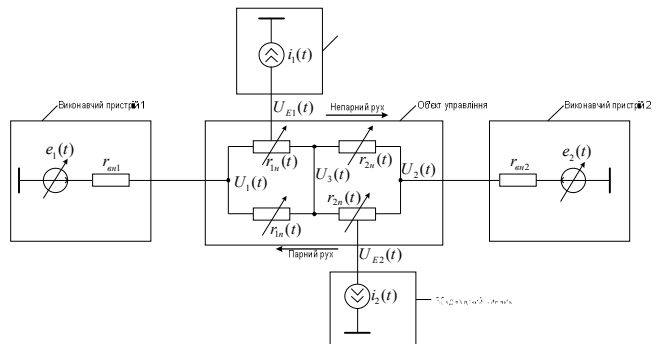


Рис. 1. Схема заміщення тягового електропостачання двоколіїної ділянки між тяговими підстанціями із рухом двох швидкісних поїздів

Використовуючи закони Кіргофа складемо систему рівнянь для визначення вектора потенціалів у вузлах електричного кола об'єкта управління (рис. 1), які у матричній формі можна записати у вигляді:

$$AGA^T \cdot U_{0,n+1} = -A(J_n + GE), \quad (1)$$

де  $AGA^T$  – квадратна матриця вузлових провідностей;  $-A(J + GE)$  – матриця-стовбець, елементами якої є струми у вузлових точках схем заміщення (струми поїздів і фідерів тягових підстанцій);  $U_{0,n+1}$  – вузлові напруги в розрахункові моменти часу;  $E$  – е.р.с. джерел живлення виконавчих пристроїв. Рішення системи рівнянь (1) у матричній формі має вигляд:

$$U_{0,n+1} = -(AGA^T)^{-1} \cdot A(J_n + GE). \quad (2)$$

Вихідними даними для чисельного розрахунку напруги на струмоприймачах є:  $r_{yd}$  – активний питомий опір тягової мережі;  $\alpha$  – довжина міжпідстанційної зони;  $r_{вн}$  – внутрішній опір тягової підстанції;  $U_{Пmin}$ ,  $U_{ЛCmax}$  – допустимі межі зміни напруги на шинах тягових підстанцій;  $U_{Emin}$ ,  $U_{Emax}$  – допустимі межі зміни напруги на струмоприймачах тягового швидкісного електрорухомого складу;  $\Delta U$  – крок зміни напруги на шинах тягових підстанцій;  $t_0$  – початковий час;  $\Delta t$  – крок зміни.

Задачі по моделюванню швидкісного руху, доцільно проводити за наближеними аналітичними співвідношеннями, які дозволяють виявити основні зв'язки і використовувати їх для отримання базових рішень. Еквівалентна схема міжпідстанційної ділянки приведена на рис. 2.

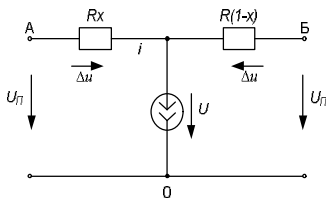


Рис. 2. Еквівалентна схема міжпідстанційної ділянки:  $u_П$  – напруга на підстанціях;  $R$  – активний опір;  $P$  – потужність ЕРС, що рухається;  $x$  – відносна відстань

Прийmemo наступні допущення: на ділянці між сусідніми підстанціями рухається тільки один транспортний засіб з постійною швидкістю  $V$ ; лінія має пункти паралельного з'єднання контактних і рейкових ланцюгів прямого і зворотного напрямів. Введення цих допущень дозволяє отримати наближені зв'язки між характеристиками. Для активного опору маємо

$$R = R_k + R_p = R_y l, \quad (3)$$

де  $R_k$  і  $R_p$  – опори контактних дротів і рейкових ланцюгів;  $l$  – довжина зони;  $R_y$  – сумарний питомий опір на одиницю довжини зони.

На рис. 3 приведено загальний вигляд для залежності відносної напруги на струмоприймачі у функції відносного розташування ЕРС. При  $x=0$  і  $x=1$  напруга на струмоприймачі співпадає з напругою підстанції, а при всіх інших  $x$  менша через падіння напруги  $\Delta U$  в активному опорі контактної мережі. Максимальна величина падіння  $\Delta U_m^*$ , що з'являється в середині ділянки, є просідання напруги на струмоприймачі.

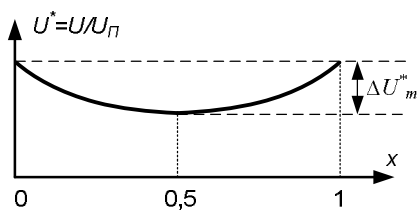


Рис. 3. Загальний вигляд залежності  $U^* = f(x)$

Лінійне наближення для характеристик схеми отримуємо нехтуючи при визначенні струму навантаження, падінням напруги

$$i = \frac{P}{U} = \frac{P}{U_П}. \quad (4)$$

Величину падіння напруги отримуємо з рівняння першого закону Кірхгофа

$$\frac{\Delta U}{R_x} + \frac{\Delta U}{R(1-x)} = i = \frac{P}{U_П}. \quad (5)$$

З (5) отримуємо відносне падіння напруги

$$\Delta U^* = \frac{\Delta U}{U_П} = \frac{R}{U_П^2} P x(1-x). \quad (6)$$

Щоб отримати найбільше падіння напруги  $\Delta U_m^*$  необхідно підставити  $x=1/2$ . Підставивши також  $R$  з (3), знайдемо

$$\Delta U_m^* = \frac{RP}{4U_П^2} = \frac{R_y l}{4U_П^2} P. \quad (7)$$

Розглядаючи схему рис. 2, бачимо, що точки А і Б мають однаковий потенціал щодо загальної точки 0 і тому їх можна з'єднати. Резистори  $R_x$  і  $R(1-x)$  з'єднуються при цьому паралельно, тому для поточних втрат потужності маємо

$$\Delta P_T = \Delta u \cdot i \cong \Delta u \cdot P/U_П, \quad (8)$$

де підставлено  $i$  з (4).

Переходячи до відносних втрат, знайдемо

$$\Delta P_T^* = \Delta P_T / D = \Delta u^* \quad (9)$$

зіставляючи з (6), бачимо, що вони, як і падіння напруги, змінюються в залежності від місцезнаходження ЕРС по параболічному закону. Найбільший практичний інтерес представляють середні втрати потужності, які отримуємо усереднюванням поточних

$$\Delta P^* = \int_0^1 \Delta P_T^* dx = \frac{R}{6U_П^2} D = \frac{R_y l}{6U_П^2} \cdot P = \frac{2}{3} \Delta U_m^{*2}. \quad (10)$$

Таким чином, втрати потужності зв'язані пропорційною залежністю з величиною просідання напруги. Наприклад, при  $U_П=3300$  В і допустимій мінімальній напрузі 2700 В маємо  $\Delta U_m=600$  В,  $\Delta U_m^*=\Delta U_m/U_П=0,18$  і  $\Delta P^*=0,12$ , що дещо вище середнього значення  $\Delta P^*=0,1$ , яке має місце на залізницях постійного струму.

Всі характеристики моделі визначаємо аналітично для точки зустрічі ЕРС в середині зони. За наявності проміжного поста секціонування в середині кожної напівзони, в міжпідстанційній зоні укладаються чотири однорідні відрізки контактної мережі (ОВКМ). Припустимо, що як базова використовується контактна мережа з сумарним перетином 320 мм<sup>2</sup> (2МФ100+М120) і одна тягова рейка Р65 на кожному напрямі. Тоді, згідно [5] маємо для опорів контактної і рейкового ланцюгів одного напрямку в межах ОВКМ

$$P_k = \frac{5 \cdot 0,177}{3,2} k_1, \quad R_p = 0,031 \cdot 5 \cdot k_2 = 0,155 k_2, \quad (11)$$

Таблиця 1

Допустимі навантаження

P <sub>1</sub> МВт	4,6	5	5,5	6	6,8		U <sub>n</sub> =3300 В
P <sub>2</sub> МВт	4,3	3,8	2,7	1,8	0		
P <sub>1</sub> МВт	6,65	7	8	9	10		U <sub>n</sub> =3600 В
P <sub>2</sub> МВт	6,45	6	4,2	2,2	0		
P <sub>1</sub> МВт	8,7	9	10	11	12	13	U <sub>n</sub> =3900 В
P <sub>2</sub> МВт	8,3	8,2	6,3	4,3	2,6	0,4	

де цифра “5” дорівнює базисній довжині ОВКМ (при l<sub>c</sub> = 20 км); k<sub>1</sub> і k<sub>2</sub> – коефіцієнти, що враховують відхилення фактичних параметрів ОВКМ від базисних значень, наприклад, при зміні довжини ОВКМ або поперечного перетину контактної мережі (для базисних умов k<sub>1</sub>=k<sub>2</sub>=1).

Величина питомого опору R<sub>y</sub> базисної двоколіїної контактної мережі на одиницю довжини

$$R_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,276 + 0,155}{5 \cdot 10^3} = 4,31 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/м} \quad (12)$$

Величина питомого опору підсилюючого проводу А185 на одному напрямі R<sub>yn</sub> = 17 · 10<sup>-5</sup> Ом/м.

За наявними розрахунками розроблено Matlab модель і отримано залежності по допустимому навантаженні P<sub>2</sub> (на зустрічній смузі руху) в функції від потужності P<sub>1</sub> швидкісного потягу для базисної міжпідстанційної зони l<sub>c</sub>=20 км, що показано на рис. 4

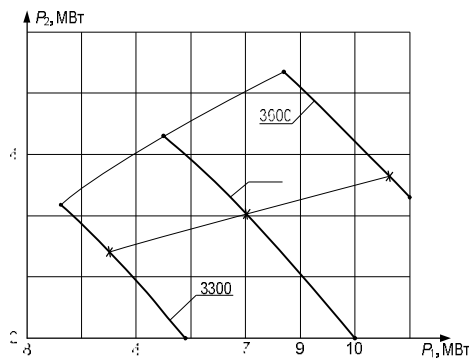


Рис. 4 Залежності по допустимому навантаженні P<sub>2</sub> (на зустрічній смузі руху) в функції від потужності P<sub>1</sub> швидкісного потягу

На рис. 4 хрестиками позначено місця в яких виконується умова половинного навантаження на стрічній смузі P<sub>2</sub>=0,5P<sub>1</sub>, якщо U<sub>c</sub>=2900 В при вимозі, використання вольтододаткових перетворювачів.

В табл. 1 показано отримані допустимі навантаження P<sub>2</sub> (на зустрічній смузі руху) в функції від потужності P<sub>1</sub> швидкісного потягу для базисної міжпідстанційної зони l<sub>c</sub>=20 км.

## Висновки

Запропоновано схему заміщення тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ з підсиленням за рахунок стабілізації напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС для двоколіїної ділянки між двома суміжними тяговими підстанціями з одночасним рухом до двох зустрічних швидкісних поїздів. Проведено моделювання навантаження швидкісного ЕРС на міжпідстанційній ділянці за якими отримано залежності по допустимій потужності на зустрічній колії.

## Список літератури

1. *Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах)* / Под. ред. Н.В. Колодяжного. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
2. *Килин А.Н. Опыт реконструкции тягового электропостачения на линии Санкт-Петербург – Москва* / А.Н. Килин, С.И. Плоскарев // *Материалы между. симпозиума Eltrans'2003*. – СПб, ПГУПС, 2003. – С. 189-193.
3. *Саенко Н.Н. Реконструкция обустройства электрификации на направлении Москва – Санкт-Петербург для скоростей до 250 км/ч.* / Н.Н. Саенко // *Тез. докл. между. симп. Eltrans'2007*. – СПб, ПГУПС, 2007. – С. 82-84.
4. *Марикин А.Н. Принципы построения системы автоматического управления напряжения в тяговой сети постоянного тока на скоростных участках* / А.Н. Марикин // *Мат. между. симп. Eltrans'2005*, – СПб, ПГУПС, 2007. – С. 367-377.
5. *Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог* / К.Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1965. – 465 с.

Надійшла до редколегії 1.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. Б.Г. Любарський, Національний технічний університет «ХПІ».

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УСИЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.В. Божко

Приведена схема замещения тягового электропостачения двухпутного участка между двумя подстанциями при движении двух поездов. По имеющимся расчетам построена Matlab модель и получены зависимости по допустимой нагрузке на встречном пути от мощности скоростного поезда для базисной межподстанционной зоны длиной 20 км, при которой выполняется условие по обеспечению расчетной величины потребляемой мощности и минимальные потери энергии в тяговом электропостачении и электроподвижном составе.

**Ключевые слова:** скоростное движение, стабилизация напряжения, потери мощности.

## ANALYSIS OF OPERATIONS MODES OF STRENGTHENING DIRECT-CURRENT POWER SUPPLY TRACTION SYSTEM

V.V. Bozhko

The chart of substituting for the traction power supply of double-track area between two substations at motion of two trains is resulted. Using available calculation the Matlab model is developed and dependences for possible loading on meeting track from power of speed train for between substation base area 20 km long, at which a condition is executed in relation to providing of calculation sizes of energy consumption and minimum losses of energy in traction power supply and electromotive stock are got.

**Keywords:** high-speed traffic, voltage stabilization, power loss.