

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПОТУЖНОСТІ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Губський П. В., Кузнецов В. Г., Друбецький А. Ю., Афанасов А. М., Пулін М. М.

1. Вступ

Сьогодення тягового електропостачання постійного струму обумовлюється стрімким старінням основних фондів інфраструктури. В той же час євроінтеграційні зусилля України вимагають проведення заходів по впровадженню швидкісного руху, що вимагає модернізації існуючих електрифікованих ліній. Швидкісний рух можуть забезпечувати застосовувані в Україні системи тягового електропостачання як постійного, так і змінного струмів, але для забезпечення сталої швидкості руху необхідно збільшити енергоємність тягової мережі, в першу чергу, для електрифікованих ділянок постійного струму.

Застосовувана нині система тягового електропостачання постійного струму централізованого типу не завжди в змозі забезпечити передачу необхідної потужності для швидкісних потягів. До числа основних обмежень відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для швидкісного руху 2900 В і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності [1].

Аналіз наукових публікацій показує, що основні зусилля вчених направлені на забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі. Але застосовувані сьогодні на теренах України технічні засоби і організаційні заходи не дозволяють вирішити поставлене завдання. Як показують результати експериментальних досліджень та розрахунків, неможливість забезпечення необхідного для швидкісного руху режиму напруги, при застосуванні малозатратних засобів підсилення, обумовлюється недостатньою енергоємністю тягової мережі в системі тягового електропостачання централізованого типу. При організації швидкісного руху на лініях постійного струму однією з найважливіших вимог до тягового електропостачання є також забезпечення необхідного рівня питомої потужності тягової мережі в межах 1,5–2 МВт/км. Однак, виконання поставлених вимог неможливе без вдосконалення системи електричної тяги, її модернізації та реконструкції.

Звідси, нагальною потребою, в умовах зростання цін на енергоносії, є забезпечення ефективного використання наявної агрегатної потужності у системі тягового електропостачання постійного струму. Саме тому наукова думка еволюціонує до розвитку розподілених систем живлення тягової мережі (СРЖ), які мають кращі техніко-економічні характеристики [2].

Тому актуальним є дослідження та аналіз режимів потужності в тягових мережах для забезпечення швидкісного руху.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – режими потужності у системах тягового електропостачання як централізованого, так і розподіленого живлення при запровадженні швидкісного руху.

В роботах [1, 2] було відзначено, що існуючі схемотехнічні рішення побудови та підсилення системи живлення тягового навантаження мають низку обмежень. До них можна віднести: неможливість забезпечення необхідного режиму напруги, великі втрати потужності та напруги, низька ефективність використання наявної агрегатної потужності. Однією з вимог сьогодення є необхідність забезпечення необхідного рівня питомої потужності тягової мережі. Нині цей показник повинен знаходитись в межах 1,5–2 МВт та має тенденцію до збільшення.

Існуючі системи тягового електропостачання (СТЕ) централізованого типу не в змозі забезпечити виконання поставлених умов. Звідси, найбільш досконалим засобом підвищення енергетичної ефективності тягової мережі є застосування розподіленої системи тягового електропостачання.

Особливого значення тема дослідження набуває у зв'язку з тим, що за системою постійного струму електрифікована значна частка залізниць не тільки на Україні, але й у Польщі, Чехії, Словаччини, Бельгії, Італії, тощо. Тому запропоновані у даній роботі технічні рішення для забезпечення необхідного режиму потужності в тяговій мережі можуть бути розповсюджені і на зазначені країни, зокрема, Центральної та Східної Європи.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – моделювання та аналіз на базі розроблених інноваційних схемотехнічних рішень системи тягового електропостачання режимів потужності у тяговій мережі для забезпечення швидкісного руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Виконати експериментальні дослідження для оцінки режимів потужності в тяговій мережі.
2. Здійснити оцінку енергетичних процесів у системах тягового електропостачання.
3. Розглянути режими потужності запропонованої системи розподіленого типу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Як відомо, підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто при проведенні певних технічних та організаційних заходів [3, 4]:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій [5, 6];
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів [7, 8];
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв (ВДП) з регулюванням напруги;

– використання перетворювальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням.

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60–80 роках минулого сторіччя [9, 10]. Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін, а змінювалась лише елементна база обумовлена розвитком науки, техніки та технологій. В [11, 12] проведені порівняльні розрахунки різних систем тягового електропостачання, запропоновані способи підсилення СТЕ постійного струму, побудовані на основі сучасних досягнень, повною мірою висвітлені їх переваги та недоліки, наведені результати досвіду експлуатації.

Ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім [13]. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників питомої потужності та забезпечення руху швидкісних поїздів потрібно здійснювати цілий комплекс заходів. Тому, все частіше, розробники звертаються до розподілених систем живлення тягового навантаження. Під розподіленою схемою живлення контактної мережі розуміють таку, при якій споживачі на найбільш завантажених зонах отримують живлення не лише від найближчих, але і від ряду віддалених пунктів живлення [4]. Участь таких пунктів в живленні суміжних міжпідстанційних зон виходить тим більшою, чим менша потужність встановлених на одній підстанції тягових агрегатів.

Концепція розподіленого живлення забезпечує високі показники економічності та надійності, дозволяє зняти обмеження пристроїв електропостачання. При такій системі зберігається можливість використання існуючого рухомого складу, а також не потрібні великі витрати на переобладнання контактної мережі.

Одна з основних відмінностей схем централізованого і розподіленого живлення полягає в кількості агрегатів на підстанціях і методів резервування їх потужності. При централізованому живленні кількість агрегатів підстанцій не менше двох. В схемі розподіленого живлення всі підстанції одноагрегатні [14, 15]. У зв'язку з цим в першій схемі резерв передбачається на випадок відключення агрегату, а в другому – на випадок відключення підстанції. Для того, щоб при схемі розподіленого живлення з однією відключеною підстанцією можна було забезпечити нормальні розміри руху, необхідно, щоб підстанції розташовувались значно ближче одна до одної, ніж у схемі централізованого живлення. Відповідно, потужність кожної підстанції буде нижчою, а їх кількість більшою. Тому така схема становиться доцільною при умові максимальної уніфікації тягових підстанцій, що при одноагрегатних підстанціях легко досягається.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що розглянута система потребує значно меншого перерізу проводів контактної мережі і при цьому зменшуються втрати енергії і напруги. Ці якості є найважливішими перевагами системи розподіленого живлення. Крім того, значно полегшується захист контактної мережі від струмів короткого замикання, знижуються потенціали рейок відносно землі, а відповідно, і небезпека руйнування підземних споруд блукаючими струмами. В розподіленій схемі живлення одноагрегатні тягові підстанції однотипні та максимально спрощені. Це дає можливість виконувати повну автоматизацію і включати їх в систему інформаційної технології обслуговування.

5. Методи дослідження

Експериментальні дослідження є основним джерелом інформації для вивчення енергообмінних процесів у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму та для побудови математичних моделей процесів перетворення і споживання електричної енергії [16, 17]. А також конкретних електричних пристроїв. Сукупність спостережуваних значень величин вказаних вище параметрів є первинним статистичним матеріалом і називається статистичним, або часовим рядом. Часовий ряд представляє собою впорядковану послідовність спостережень у визначені моменти часу. Природа ряду та структура викликаючого процесу визначають порядок вказаної послідовності. Зазвичай, часові ряди формуються на базі дискретної послідовності спостережень через визначені регулярні відрізки часу. Результати таких вимірювань представляються у вигляді безперервної змінної (випадкової функції), яка підпорядковується якомусь ймовірнісному закону. Реалізації випадкового процесу можуть включати в себе і помилки спостережень. Необхідно зазначити, що в багатьох випадках часові ряди одночасно з флуктуаціями та нерегулярностями (викидами) мають деякі тенденції зміни (тренд), які можуть описуватись різними моделями.

Експериментальні дослідження режимів електроспоживання виконувались згідно розробленої на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» (ІСЕ) Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Україна) методики з використанням розробленого програмно-апаратного комплексу [11].

Визначення режимів потужності і напруги і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної інтелектуальної системи тягового електропостачання. На сьогодні аналіз процесів функціонування варіацій СТЕ здійснюється з застосуванням імітаційного моделювання. Мета побудови математичної моделі СТЕ полягає у визначенні витрати електричної енергії при русі поїздів і втрат електроенергії в елементах системи тягового електропостачання, контролю напруги на струмоприймачах електровозів і струмів в елементах СТЕ [17]. Розробка математичної моделі керованої розподіленої СТЕ повинна передбачати розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу.

Розроблена на кафедрі ІСЕ математична модель [18] дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон. А також враховувати різні значення напруги холостого ходу тягових підстанцій та їх внутрішній опір, різні схеми підключення генеруючих потужностей до тягової мережі. Математична модель базується на визначенні закономірності зміни опору тягової мережі з N тяговими підстанціями/підсилюючими пунктами та $N-1$ міжпідстанційними зонами аналітичними функціями. Згадані функції в сукупності з функціями струморозподілу та розподілу потенціалів у вузлах системи дозволяють формалізувати розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення. Визначення основних показників системи тягового електропостачання U_{\min} , ΔP , ΔW запропоновано виконувати за допомогою функції струморозподілу, розрахунок

якої здійснюється у матричному вигляді, що дозволяє без проблем описати будь-яку конфігурацію системи з її відповідними параметрами. Результатом розрахунку даної функції є вектор, який складається з потенціалів у вузлах розрахункової схеми в місцях підключення фідерів тягових підстанцій, точок з'єднання контактних підвісок колій та електрорухомого складу (ЕРС), що знаходиться на міжпідстанційних зонах. Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

6. Результати дослідження

6.1. Аналіз експериментальних даних

Одними з основних параметрів системи тягового електропостачання є число та потужність тягових підстанцій і відстань між ними. Повна встановлена потужність тягових підстанцій, наприклад, для дослідних ділянок Придніпровської залізниці (Україна) знаходиться в межах 12÷50 МВт. Але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом необхідної потужності для забезпечення завданого режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху. При цьому, як показують проведені дослідження, коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 15 %. Це підтверджується експериментальними даними, які були отримані на тягових підстанціях Придніпровської залізниці (табл. 1) [19].

Таблиця 1

Результати дослідження завантаження тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність P_B , кВт	Середня споживана потужність P_C , кВт	Коефіцієнт завантаження K_3 , %
ТП 1 (Верх)	20800	2868	13,7
ТП 2 (Ер)	20800	1080	5,2
ТП 3 (Варв)	19800	956	4,8
ТП 4 (Сам)	19800	422	2,1

Дослідження режимів роботи тягової мережі та споживаної електровозами потужності проводились на Придніпровській залізниці:

- на ділянці Нижньодніпровськ (НД) Вузол – П'ятихатки. Довжина ділянки 128 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався у парному та непарному напрямках;

- на ділянці НД Вузол – Демуріно. Довжина ділянки 135 км, контактна мережа на ділянці М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався у парному та непарному напрямках;

- на ділянці Синельникове – Демуріно. Довжина ділянки 96 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 6 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався у парному та непарному напрямках.

Узагальнені результати досліджень режимів потужності в тяговій мережі представлені в табл. 2 та на рис. 1, 2.

Таблиця 2

Споживання потужності та струму при русі дослідними ділянками

№	Локомотив	Напрямок руху	Маса поїду, т	Споживана потужність ЕРС, МВт/км			Струм в режимі тяги, А		Припустимий тривалий струм контактної підвіски М120+2МФ100+А185, А, при зносі контактного проводу, %		
				Мінімальна	Середня	Максимальна	Середній	Максимальний	0	15	30
1	ВЛ8	П-НД	4117	-2,52	1,46	5,06	900	1610	2280	2120	1960
2	ВЛ8	НД-П	2887	-2,04	1,5	6,2	934	2000			
3	ВЛ8	П-НД	4441	-3,05	1,08	5,2	913	1750			
4	ВЛ8	НД-П	3372	0,032	1,67	5,98	977	1900			
5	ВЛ8	П-НД	4022	-3,42	1,29	8,7	952	1800			
6	ВЛ8	НД-П	1462	-0,85	1,07	4,55	707	1400			
7	ВЛ8	П-НД	4446	-4,44	0,67	5,28	801	1750			
8	ВЛ8	НД-П	2451	-2,25	1,23	4,4	736	1385			
9	ВЛ8	НД-П	4532	-2,96	1,4	5,34	445	1750			
10	ВЛ8	П-НД	4251	-3,61	0,95	6,12	310	1800			
11	ЧС7	НД-П	550	0,11	2,25	7,18	690	2100			
12	ЧС7	П-НД	495	0,1	1,7	5,87	528	1925			
13	ЧС7	П-НД	550	0,1	1,64	6,07	499	1750			
14	2ВЛ11	С-Д	5957	0,08	2,74	10,37	914	3541			
15	2ВЛ11	Д-С	5957	0,04	2,54	8,29	806	2797			
16	2ВЛ11	НД-Д	5935	0,75	3,17	11,6	1077	3860			
17	2ВЛ11	Д-НД	6004	0,01	2,05	9,64	687	3158			

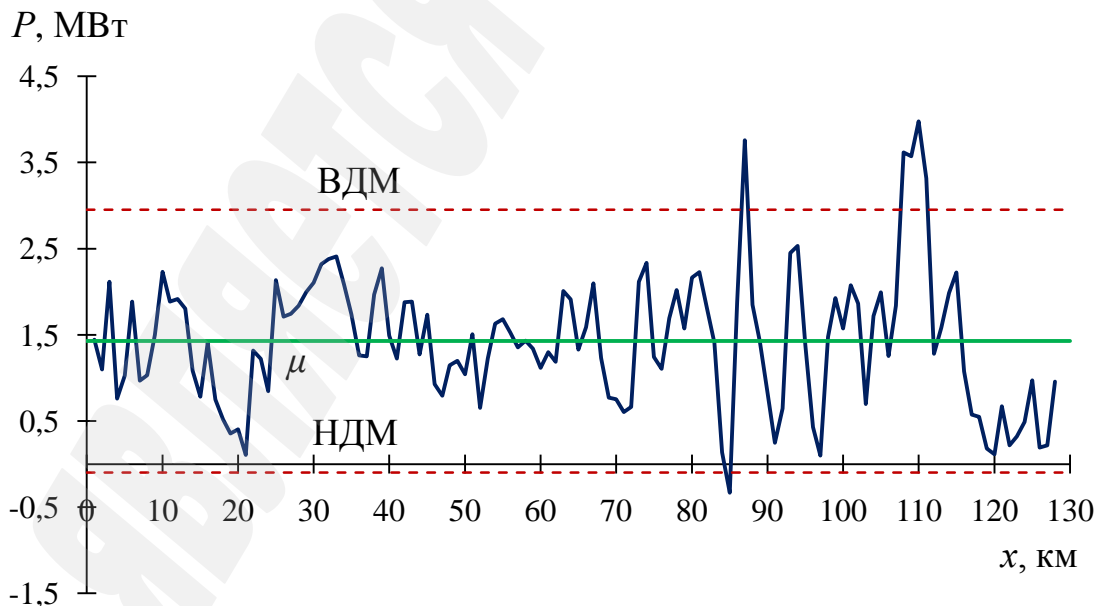


Рис. 1. Середня зміна споживання потужності на кілометр при русі ділянкою Нижньодніпровськ – Вузол – П’ятихатки у парному та непарному напрямку: ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа

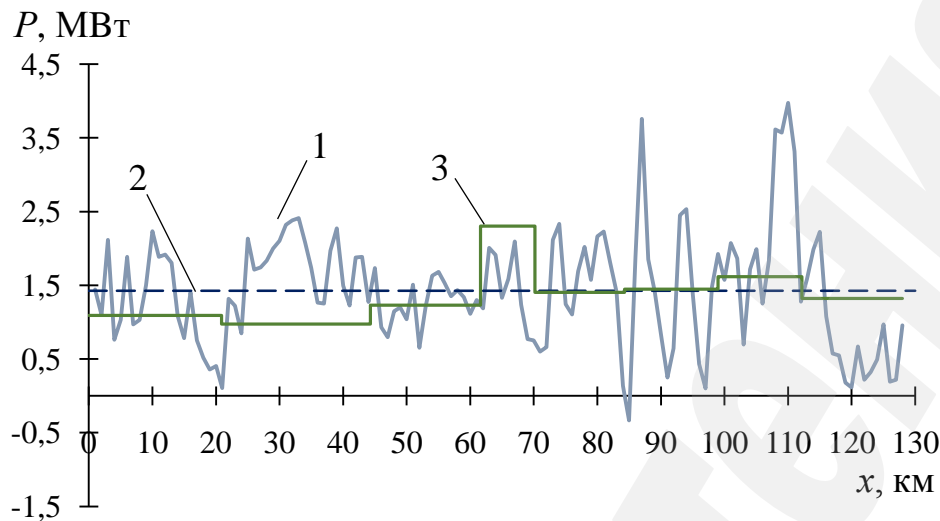


Рис. 2. Середня зміна споживання потужності на кілометр при русі ділянкою Нижньодніпровськ – Вузол – П'ятихатки у парному та непарному напрямку: 1 – споживана на кожному кілометрі потужність електрорухомого складу; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на міжпідстанційній зоні, яку можуть забезпечити суміжні тягові підстанції

Аналіз отриманих результатів показує, що в тяговій мережі існують зони обмеженого електроспоживання, тобто зони, де споживана потужність ЕРС перевищує можливості СТЕ по передачі необхідного рівня потужності. В свою чергу, це призводить до різкого зниження напруги на струмоприймачах електровозів та зменшення швидкості руху, що неприйнятне при впровадженні швидкісного руху. Необхідно вказати, що отримані результати добре кореспондують з даними, наведеними в роботі [20]. При цьому парадоксальним є факт, що встановлена агрегатна потужність тягових підстанцій використовується не в повній мірі. Необхідно також звернути увагу, що на деяких міжпідстанційних зонах (МПЗ) споживаний ЕРС струм наближається до критичних значень, що в умовах наявного зносу інфраструктури СТЕ може привести до аварійних ситуацій.

6.2. Вимоги до режимів потужності

Високошвидкісні залізниці і залізниці з інтенсивним рухом, підвищеною пропускнуою здатністю, з невеликими інтервалами (3–5 хв) між поїздами і споживаною потужністю 10–12 МВт і більше мають імпульсний характер електротягового навантаження [21]. При цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги і енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і збільшується нагрівання проводів контактної мережі.

Питома потужність електроспоживання високошвидкісних ліній становить 1–1,3 МВт/км, а для залізничних двоколієних ліній з підвищеною пропускнуою спроможністю може досягати 1,7–2,5 МВт/км. За нормами Міжнародного союзу залізниць (МСЗ), розробленим в 1996 р., для двоколієної високошвидкісної лінії з максимальною швидкістю 300–350 км/год передбачається максимальна

питома потужність споживання електроенергії на тягу 3 МВА/км [21]. Потужність пристроїв тягового електропостачання рекомендується приймати, виходячи із зазначеної питомої потужності електроспоживання. Тобто, відбувається поступова еволюція вимог до СТЕ – не тільки забезпечення нормованої напруги, а й забезпечення необхідної енергоємності тягової мережі.

Необхідно приймати до уваги, що вибір технічних рішень при створенні або реконструкції системи тягового електропостачання (СТЕ) для забезпечення швидкісного та високошвидкісного пасажирського руху базується на основних параметрах проектованої лінії, до яких відносяться:

- максимальна допустима і експлуатаційна швидкості руху;
- тип електрорухомого складу (ЕРС) і його характеристики;
- принципи організації перевезень і графіки руху поїздів [22].

Від перерахованих параметрів істотно залежить необхідна здатність навантаження окремих пристроїв електропостачання та системи в цілому. Параметри СТЕ і схеми живлення контактної мережі вибираються відповідно до прийнятих нормативів по допустимим навантаженням силового обладнання тягових підстанцій, напрузі на струмоприймачах ЕРС і температур нагрівання проводів тягової мережі.

Характеристики і параметри рухомого складу для високошвидкісних магістралей (ВСМ) обумовлені тим, що при збільшенні швидкості квадратично зростає аеродинамічна складова основного опору руху [21]. Так, якщо при швидкості 120–140 км/год основний питомий опір при русі звичайних пасажирських поїздів не перевищує 4 кгс/т, то для високошвидкісного ЕРС (250–300 км/год) воно дорівнює 10–17 кгс/т. Відповідно до цього, для реалізації високих швидкостей руху потрібна істотно більша питома (на тонну маси бруто) потужність тягового обладнання поїзда.

Співвідношення встановленої максимальної швидкості на ділянці і потужності поїзда, а також спосіб управління силою тяги на ЕРС (ступінчастий, плавний) дуже впливають на режим споживання струму з контактної мережі. При русі звичайного пасажирського поїзда, наприклад, з електровозом ЕП1, зміна струму в контактній мережі має імпульсний характер, обумовлений чергуванням режимів тяги і вибігу. Електропоїзд ЕПС250 (проектний аналог поїзда «Сапсан») з плавним регулюванням сили тяги споживає максимальний струм тільки при розгонах, а на інших ділянках реалізує потужність, необхідну для підтримки заданої швидкості в залежності від поточного ухилу шляху. При швидкості 300–350 км/год внаслідок великого опору руху поїзд ІСЕЗ [23] більшу частину часу споживає максимальний струм практично незалежно від профілю ділянки.

Результати численних тягових і електричних розрахунків показують, що струмові навантаження в системах електропостачання при однакових міжпоїздних інтервалах на ВСМ і на лініях звернення вантажних поїздів підвищеної маси практично співмірні. Необхідна електротягова потужність залежить від багатьох факторів, основними з яких є:

- маса поїзда;
- швидкість руху;
- основний опір руху;
- інтервали між поїздами;

- частота рушань і розгонів;
- можливістю рекуперативного гальмування;
- план і профіль колії;
- характеристики мережі тягового електропостачання.

Але при швидкісному (200–250 км/год) і високошвидкісному (300 км/год і вище) русі потужність, реалізовувана тяговими двигунами поїзда, практично дорівнює потужності, що реалізовується електровозами великовагового поїзда [24]. Однак внаслідок більш швидкого темпу зміни навантажень при проходженні поїздів по ВСМ інтенсивність нагрівання силового устаткування підстанцій і проводів контактної мережі дещо менше, ніж на ділянках великовагового руху.

Як зазначалося вище, привід сучасного швидкісного ЕРС реалізує плавне управління силою тяги. Для такого ЕРС задається максимальна тягова характеристика (залежність сили тяги від швидкості), яка в спрощеному вигляді має дві ділянки [23]:

- розгінну – від нульової швидкості до деякого значення V , при незмінній або лінійно падаючій силі тяги;
- постійної потужності – автоматична характеристика при зміні сили тяги оберненопропорційно швидкості.

Залежно від поточних умов (ухил профілю, напруга в контактній мережі) і режиму ведення поїзда система управління вибирає потрібну точку в області, обмеженій максимальною тяговою характеристикою. Підвищення швидкості поїзда призводить до значного збільшення сили опору руху. У зв'язку з цим для збільшення швидкості слід збільшувати силу тяги, а збільшення сили тяги призводить до зростання струму, споживаного ЕРС. При розгоні до швидкостей руху понад 200 км/год опір руху, а отже, і струм практично постійні. Величина струму досягає значення 3 кА і більше. Для поїздів, обладнаних перетворювачами, при зменшенні напруги на струмоприймачах ЕРС для реалізації встановленої потужності при заданій швидкості потрібно споживати більший струм і, навпаки, при збільшенні напруги струм зменшується. З цієї причини від системи електропостачання потрібно забезпечити підтримку напруги на струмоприймачі ЕРС, близької до номінальної. Виконати це завдання можливо тільки при достатній енергоємності тягової мережі.

У зв'язку зі вступом України в світову організацію торгівлі (СОТ), зусиль по інтеграції в європейську спільноту та розвитком транснаціональних залізничних коридорів у найближчі роки необхідно виконати зміни в інфраструктурі залізничного транспорту. Але якісні зміни на українських залізницях і введення високошвидкісного руху можливі тільки з ростом продуктивності в економіці і добробуту суспільства [25]. Згідно зі світовим досвідом, вартість будівництва ВСМ становить близько 30 млн доларів на один кілометр. У всіх країнах будівництво подібних інфраструктурних об'єктів під силу тільки державі і фінансується з державного бюджету. Так в країнах Європи та Азії має місце значний пасажиропотік, а розвиток високошвидкісного транспорту має поступальний характер [26]. В той же час в Україні немає пасажиропотоку в 24 тисячі чоловік в добу, щоб потяги ходили хоча б раз в годину. Таким чином, для України оптимальним варіантом необхідно сформулювати мережу залізничних перевезень з максимальною швидкістю до 160 км/год, в перспективі до 180–200 км/год [25].

Звідси, необхідно розробляти заходи по модернізації існуючих залізничних ліній для застосування на теренах України швидкісних поїздів *Hundai* та *Škoda*.

На приведених нижче рис. 3–6 показані вибіркові дані експериментальних поїздок, які підтверджують наведені вище міркування.

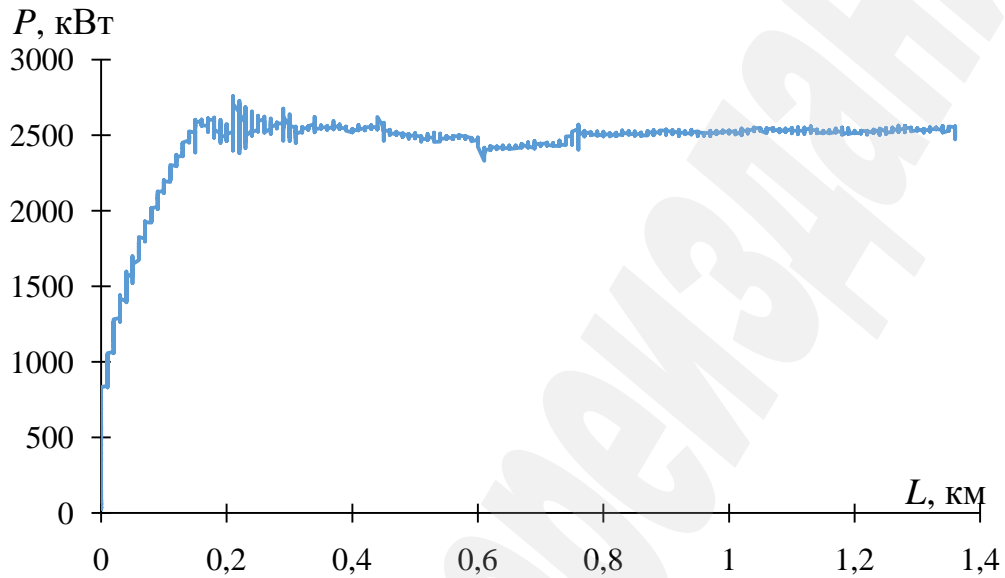


Рис. 3. Споживана потужність з контактної мережі електровозом *Škoda*

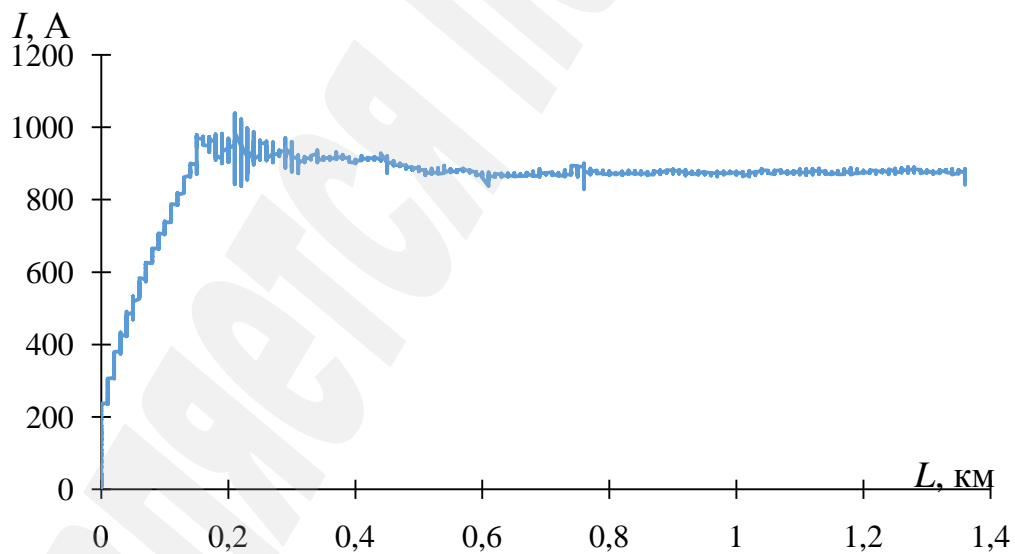


Рис. 4. Споживаний струм електровозом *Škoda*

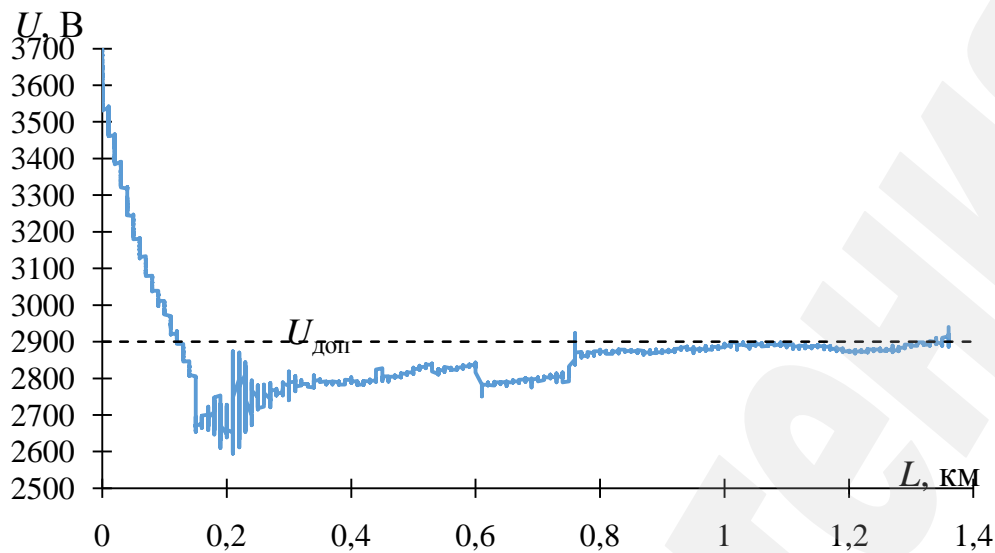


Рис. 5. Напряга на струмоприймачі електровозу Škoda

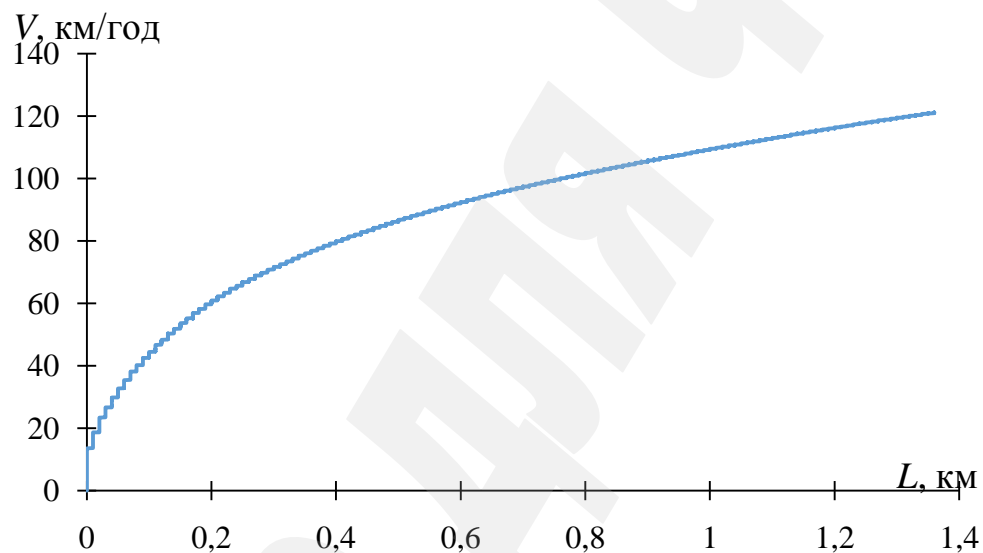


Рис. 6. Швидкість електровозу Škoda

Як слідує з їх аналізу, при виході швидкісного електровоза на сталий режим, напруга в тяговій мережі зменшується нижче встановленого нормативного значення. Можна зробити припущення, що в даному випадку має місце недостатня енергоємність тягової мережі. В табл. 3 виконано аналіз агрегатних потужностей тягових підстанцій на ділянках швидкісного руху та приведені дані розрахунку питомої потужності міжпідстанційних зон. Можна констатувати, що майже половина МПЗ не відповідає встановленим нормативам питомої потужності. На практиці це призводить до необхідності збільшення міжпоїздних інтервалів [20] та ставить задачу модернізації таких зон у СТЕ.

Таблиця 3

Відомості про агрегатні потужності тягових підстанцій

Назва	Встановлена потужність, МВт	Довжина міжпідстанційної зони, км	Відстані до постів секціонування, км	Розрахункова питома потужність МПЗ, МВт/км
Донецький хід				
П'ятихатки	37,3	20,9	10,2/10,7	1,95
Ерастівка	44,4	23,4	9,8/13,6	1,89
Верховцево	44,4	17,3	7,6/9,7	2,0
Верхньодніпровськ	24,9	22,7	8,6/14,1	1,48
Баглей	18,6	14,7	–	1,27
Сухачівка	18,7	13,1	–	2,14
Горяїново	37,4	16,1	–	2,7
НДВузол	50	6,9	–	4,34
Ігрень	16	11,2	–	2,25
Іларіоново	44,4	21,6	11,1/10,5	2,18
Синельниково	50,0	17,3	8,5/8,8	2,21
Роздори	26,52	17,8	9/8,8	1,59
Письменна	30,28	20,8	10,4/10,4	0,72
Улянівка	30,28	18,6	9/9,6	–
Покровський хід				
Балівка	12,6	30,9	14,4/16,5	0,61
Новомосковськ	25,2	27	14,9/12,1	0,7
Мінеральна	12,6	24,4	13,0/11,4	1,03
Павлоград-1	37,8	24,2	11,5/12,7	1,04
Богуславський	12,6	21,6	10,6/11,0	0,87
Миколаївка	25,2	29,2	12,3/16,9	0,75
Слов'янка	18,9	17,2	8,3/8,9	1,28
Роз'їзд № 5	25,2	23,8	10,1/13,7	–

6.3. Розподілена система тягового електропостачання

Як вже зазначалось вище, при побудові СРЖ для забезпечення необхідного рівня питомої потужності тягової мережі на сучасному етапі розвитку інвестиційного клімату при впровадженні швидкісного руху необхідно максимально використовувати існуючу інфраструктуру тягового електропостачання. В першу чергу, мова повинна йти про розташування тягових підстанцій та пунктів підсилення. На першому етапі впровадження СРЖ доцільно зберегти існуючі координати їх розташування. При цьому необхідно вирішити питання доцільної потужності тягових підстанцій та пунктів підсилення.

На сьогоднішній день сформовано два основні підходи до побудови СРЖ:

- використання опорних підстанцій з розташованими між ними пунктами живлення на визначених відстанях [2, 3];
- використання однотипних одноагрегатних підстанцій з рівними відстанями між ними [27].

Кожна з цих концепцій має право на застосування. В той же час, проведеними дослідженнями, у зв'язку з реальною відсутністю випрямлячів на 24 кВ, показано що застосування одноагрегатних тягових підстанцій (ОАП) є найбільш доцільним [28]. Для мінімізації капітальних вкладень в СРЖ, живлення

ОАП має здійснюватись лініями продольного електропостачання (ЛЕП ПЕ) 35 кВ. Таким чином, рекомендована на даному етапі структура СРЖ матиме вигляд, представлений на рис. 7.

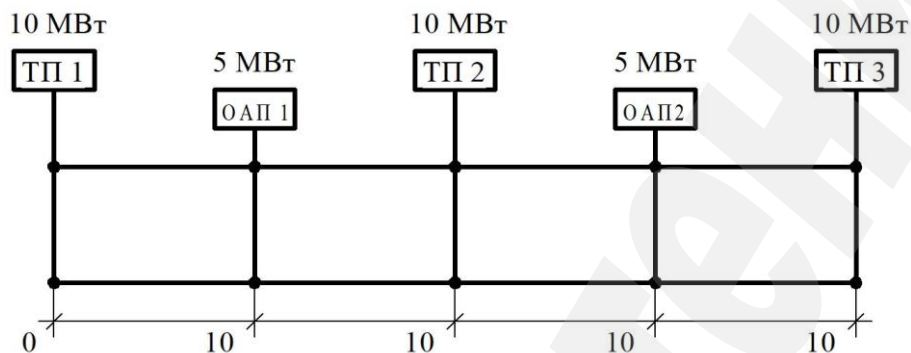


Рис. 7. Пропонована структура системи розподіленого живлення

При існуючій системі централізованого живлення потужність тягових підстанцій розраховується по методиці, наведеній в [29]. Ця методика затверджена і в існуючих нормативних документах Укрзалізниці. В той же час, потужність, розрахована таким чином, значно перевищує рівень необхідної доцільності та резервування. Так, в 1985–1989 рр., коли на залізницях СРСР спостерігався значний обсяг перевезень, коефіцієнт використання встановленої потужності двох перетворювальних агрегатів тягових підстанцій [30]:

- Жовтневої дороги становив 11,6 %;
- Московської – 19,25 %;
- Куйбишевської – 17 %;
- Свердловської – 11,8 %;
- Південно-Уральської – 16,3 %;
- Західно-Сибірської – 21,9 %.

Можна констатувати, що і на сучасному етапі коефіцієнт використання встановленої потужності є доволі низьким (табл. 1), та не перевищує 20 %. Досвід впровадження швидкісного руху на постійному струмі доводить цю тенденцію. Так, середній струм тягової підстанції Соняшнікова, що знаходиться між підстанціями Клин і Крюково на ділянці Москва-Санкт-Петербург, складає 2021 А, максимальний – 3086 А, однохвилинний – 2936 А, трихвилинний – 2515 А, двадцятихвилинний – 2093 А. Максимальний коефіцієнт навантаження двох перетворювальних агрегатів становить 0,32, а одного – 0,64 [30]. Таким чином, підстанції недовантажені і навіть при одному працюючому перетворювальному агрегаті його потужність використовується на 64 %, тобто використовується потужність складає 7,68 МВт. При цьому мінімальна напруга в контактній мережі на ділянці Клин – Крюково становить 2907 В, середнє (однохвилинне) – 2962 В. При таких навантаженнях виправдана робота зазначених вище тягових підстанцій з одним перетворювальним агрегатом.

Як вже зазначалось, на початковому етапі введення швидкісного руху зі швидкостями 200–250 км/год напрошується необхідність найкращого використання вже існуючих пристроїв системи постійного струму 3,0 кВ з найменшими капітальними

і експлуатаційними витратами. Виходячи з наведених вище міркувань розрахункова використовується потужність тягових підстанцій за даними табл. 3 при наявному K_3 буде знаходитись в межах 2,5...10 МВт, а середня потужність складе – 6,26 МВт.

В рамках виконуваних нині робіт з модернізації тягових підстанцій на електрифікованих ділянках постійного струму відбувається заміна застарілих випрямлячів на більш сучасні 12-пульсні випрямлячі виробництва науково-виробничого об'єднання «Перетворювач» типу В-ТПЕД-М-12П-3,15к-3,3к У4, потужність яких складає 10,395 МВт. При їх застосуванні за вимогами [29], агрегатна потужність тягової підстанції складатиме 20,79 МВт, що значно перевищує необхідні значення для забезпечення швидкісного руху.

На сьогоднішній день відомі розробки [31] більш досконалих випрямлячів потужністю 5,2 (4,2) МВт. Їх застосування дозволить забезпечити необхідну потужність для живлення СРЖ, і виконати умови резервування, оскільки в СРЖ резервування здійснюється за рахунок перерозподілу потужності між підстанціями. Для забезпечення необхідного резерву на тяговій підстанції доцільно застосовувати два ПА, працюючих паралельно у вимушеному режимі. В якості ж ОАП може бути застосований один ПА5200 (4200).

На наступному етапі синтезу необхідно вирішити завдання визначення кількості ОАП між опорними підстанціями (ОП). При цьому критерієм оптимізації є необхідність дотримання завданого рівня напруги та питомої потужності тягової мережі (ТМ). В роботах [27, 28] доведено, що розподілена система тяги поїздів з живлячою лінією змінного струму промислової частоти має одну незаперечну перевагу: вона може бути реалізована «прямо зараз», все необхідне обладнання випускається промисловістю. Потужність тягової підстанції (ТП) і ОАП та відстань між ними – фактори взаємопов'язані та повинні забезпечувати норми питомої потужності і нормовані рівні напруги. У відповідності до прийнятої концепції мінімізації затрат на пропоновану систему відстані між ТП та ОАП визначаються існуючою схемотехнікою живлення тягової мережі. Для оціночних розрахунків використовувалась симетрична система живлення, наведена на рис. 7.

6.4. Оцінка режимів потужності

Необхідно вказати, що регулювання режимів електроспоживання на існуючих ділянках електрифікованих залізниць для пропуску швидкісних поїздів здійснюється за рахунок збільшення міжпоїздного інтервалу. При цьому питома потужність змінюється наступним чином [32] (табл. 4).

Таблиця 4

Вплив міжпоїздного інтервалу на питому потужність

Інтервал, хв	8	12	18
Питома потужність кВт/км	480	330	220

При аналізі даних табл. 4 треба приймати до уваги, що коли ділянкою рухаються поїзди вказаної категорії, на МПЗ знаходиться тільки один поїзд. Звідси, для заданих умов руху достатнім буде розташування однієї ОАП на постах секціонування (ПСК). Для підтвердження даної гіпотези виконаємо наступний розрахунок.

Використовуючи залежності, отримані в [33], можна визначити втрати напруги до струмоприймача ЕРС, що знаходиться на розрахунковій МПЗ за умови споживання ним сталої потужності:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2d(x)} \cdot f(x), \quad (1)$$

де $U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції, В; $f(x)$ – функція опору розрахункової МПЗ; P – потужність, яку споживає ЕРС, Вт.

У наведеному виразі, функція опору визначає схему живлення МПЗ. Визначення $f(x)$ для різних схем живлення МПЗ та для електрифікованої ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон наведено в [17, 33]. Зважаючи на те, що при розподіленій системі електропостачання, схема живлення МПЗ буде двосторонньою, подальші розрахунки наведені саме для цієї схеми живлення. Таким чином, функція опору для двосторонньої схеми:

$$f(x) = r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2)$$

де r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом; x – відстань від ТП до ЕРС, км; L – довжина МПЗ, км.

Підставивши вираз (1) в (2) можна визначити відстань від тягових підстанцій, на яку можна передати потужність для живлення ЕРС при заданому рівні втрат напруги в тяговій мережі:

– для першої ТП:

$$x_1 = \frac{L \left(\frac{\frac{\sqrt{Pr_0(4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{\frac{L}{2}} - \frac{Pr_0}{2}}{Pr_0} \right)}{Pr_0};$$

– для другої ТП:

$$x_2 = \frac{L \left(\frac{\frac{\sqrt{Pr_0(4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{\frac{L}{2}} + \frac{Pr_0}{2}}{Pr_0} \right)}{Pr_0}.$$

Відстань, на яку можна передавати споживану потужність ЕРС при заданому рівні втрат напруги наведено на рис. 8.

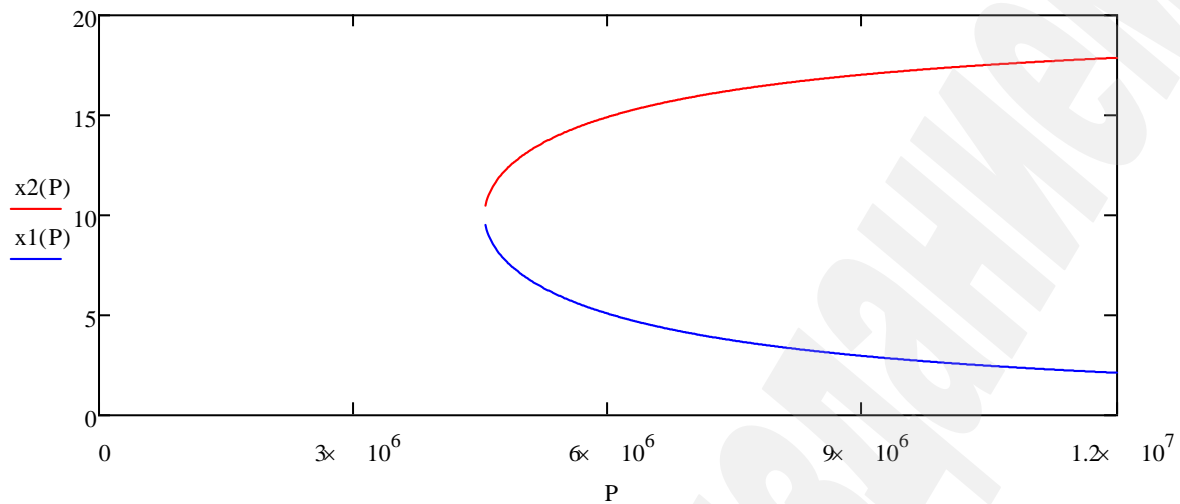


Рис. 8. Допустима відстань передачі потужності

Необхідна потужність тягових підстанцій (з урахуванням втрат потужності), необхідна для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі ЕРС з заданим рівнем втрат напруги:

$$P(x) = \left(\frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right)} \right) - \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right)} \cdot r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right). \quad (3)$$

При даних розрахунках використовувались наступні вихідні дані: напруга на шинах ТП 3300 В, довжина МПЗ 20 км, допустимі втрати напруги 400 В, тягова мережа М120+2МФ100+А185+Р65, споживана потужність ЕРС 10 МВт.

На рис. 9 точками відзначено межі передачі потужності з допустимими втратами напруги.

Як видно з рис. 9, при проході ЕРС на більшій частині МПЗ не забезпечується дотримання норм напруги на струмоприймачі ЕРС через недостатній рівень питомої потужності, що можуть забезпечити тягові підстанції. Тому впровадження розподіленої системи, з меншими довжинами МПЗ та регульованими ПА може вирішити дану проблему.

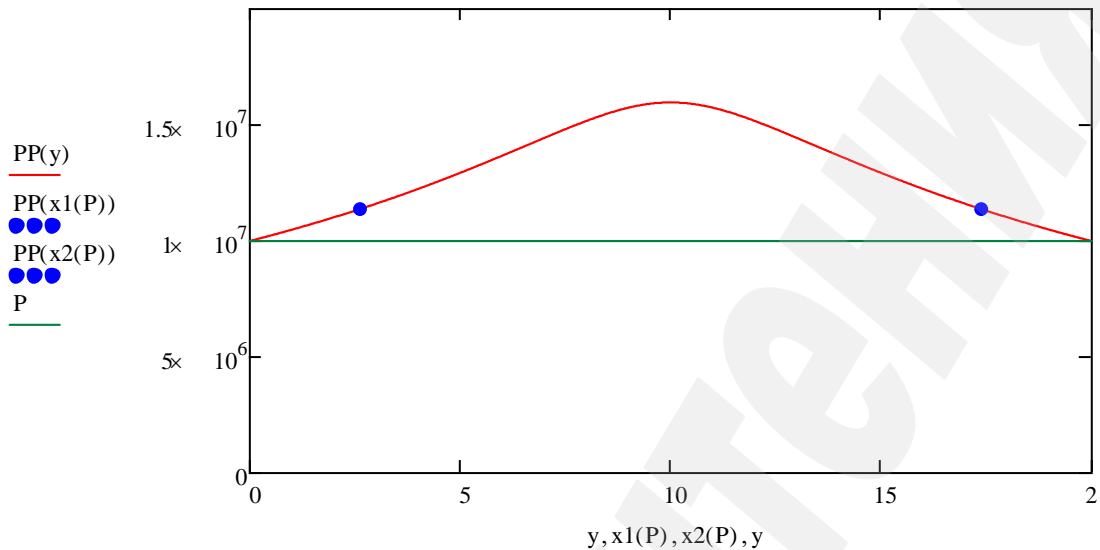


Рис. 9. Потужність тягових підстанцій для забезпечення режиму споживання сталої потужності

Розташування додаткового ПА в середині МПЗ дозволяє при підвищенні напруги на шинах ТП на 40 В забезпечити пропуск ЕРС потужністю 10 МВт при заданому рівні втрат напруги (рис. 10).

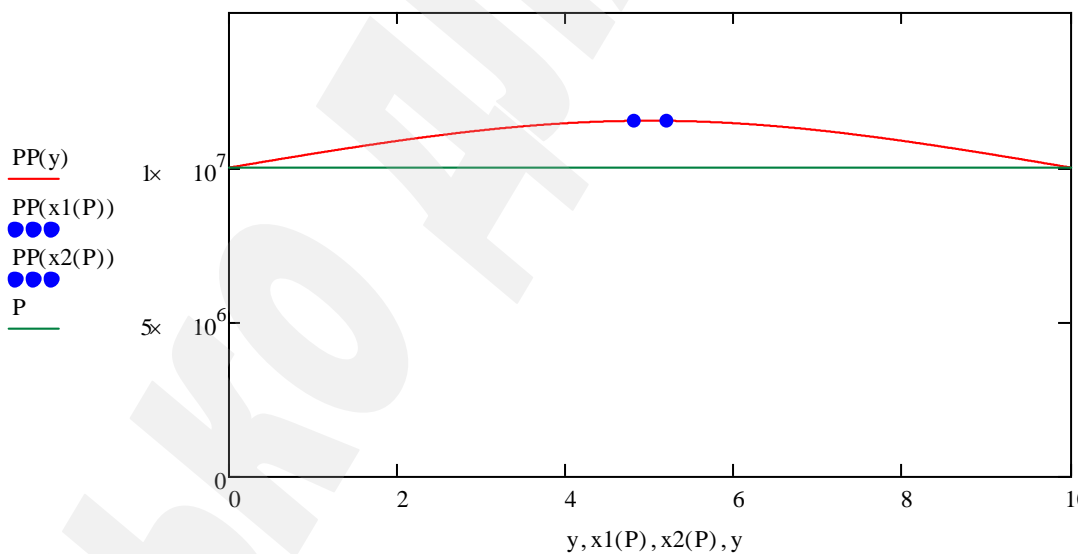


Рис. 10. Сумарна потужність тягової підстанції та додаткового перетворювального агрегату для забезпечення режиму споживання сталої потужності при розподіленому живленні

При цьому, необхідний рівень питомої потужності МПЗ для пропуску ЕРС, в залежності від напруги на шинах ТП змінюється наступним чином (рис. 11).

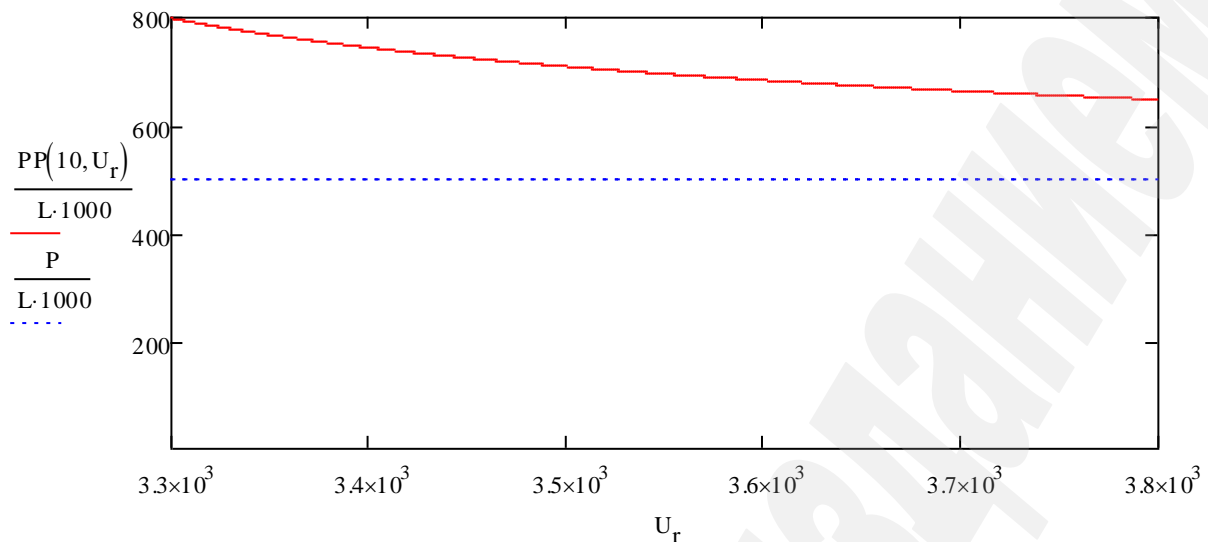


Рис. 11. Зміна рівня питомої потужності міжпідстанційної зони від рівня напруги на шинах

В результаті виконаних розрахунків запропонованої схемотехніки системи розподіленого живлення показано, що ця система дозволяє виконати пропуск по ділянці електрорухомого складу з нормованими рівнями питомої потужності та втрат напруги.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. У порівнянні з системою тягового електропостачання з централізованим живленням застосування запропонованої системи розподіленого живлення дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності тягової мережі з дотриманням нормованого рівня напруги для умов швидкісного руху. При цьому зменшується загальна агрегатна потужність тягових підстанцій та поліпшується коефіцієнт її використання.

Weaknesses. До слабких сторін запропонованого технічного рішення можна віднести необхідність початкових капітальних вкладень в систему тягового електропостачання для заміни існуючих перетворювальних агрегатів. Також необхідно передбачити витрати на демонтаж старих перетворювальних агрегатів та необхідність монтажу одноагрегатної тягової підстанції за місцем розміщення поста секціонування. Також до слабких сторін запропонованих рішень можна віднести переобладнання лінії повздожнього електропостачання.

Opportunities. Пропоновані технічні рішення з підвищення ефективності використання агрегатної потужності, підведеної до тягових підстанцій сприятимуть зниженню втрат енергії в тяговій мережі. Це, у свою чергу, дозволить суттєво зменшити суми платежів за спожиту електроенергію на тягу поїздів. При цьому будуть забезпечені всі нормативні вимоги до організації швидкісного руху.

Threats. Від залізниці будуть потрібні початкові капітальні вкладення в систему розподіленого живлення для заміни існуючих тягових агрегатів меншої потужності на тягових підстанціях. Також необхідні витрати на їх монтаж за місцем розміщення відповідно до схемотехнічних інновацій у системі електропостачання. Негативна дія на об'єкт дослідження зовнішніх чинників полягає у

відсутності серійного виробництва запропонованих перетворювальних агрегатів. Хоча вони й охороняються патентами України на винаходи на пристрій, що підтверджує їх інноваційність серед подібних світових прототипів, але може виникнути необхідність закупівлі перетворювальних агрегатів пропонованої потужності за кордоном.

8. Висновки

1. Проведено експериментальні дослідження режимів потужності в тягових мережах. Встановлено, що режими напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму з застосуванням централізованого живлення не дозволяють в повній мірі забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги, як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань, який визначається різними факторами: як впливом змін режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, так і режимами роботи тягової мережі. При цьому, при наявності значного резерву встановленої агрегатної потужності, на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги в тяговій мережі.

2. Здійснено оцінку енергетичних процесів у системах тягового електропостачання. Виконаним аналізом встановлено, що для побудови системи розподіленого живлення на сучасному етапі найбільш доцільним є використання на перегонах одноагрегатних тягових підстанцій з живленням їх ліній повздожнього електропостачання напругою 35 кВ, виконаних проводами АС-35.

3. Проаналізовано режими потужності пропонованої системи розподіленого типу. На основі аналізу режимів потужності запропоновано здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі: а саме, розташування тягових підстанцій на місці існуючих, а одноагрегатних підстанцій на постах секціонування. При цьому в розподіленій системі живлення на тяговій підстанції необхідне застосування двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – 5 МВт. В результаті виконаних розрахунків пропонованої схемотехніки системи розподіленого живлення показано, що ця система дозволяє виконати пропуск по ділянці електрорухомого складу з нормованими рівнями питомої потужності та втрат напруги.

Література

1. Sychenko V. H., Bosyi D. O., Kosariev Ye. M. Optyimizatsiia keruvannia rezhymom napruhy v tiahovii merezhi postiinoho strumu z punktamy pidsylennia // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2015. Issue 6. P. 95–103.

2. Sychenko V. G., Bosiy D. O., Kosarev E. M. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current // Archives of Transport. 2015. Vol. 35, Issue 3. P. 63–70. doi: <http://doi.org/10.5604/08669546.1185193>

3. Arzhannikov B. A. Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka: monograph. Ekaterinburg: UrGUPS, 2010. 176 p.

4. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog. Moscow: Transzheldorizdat, 1958. 288 p.
5. Miroshnichenko R. I. Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov. Moscow: Transport, 1982. 207 p.
6. Miroshnichenko R. I. Sravnitel'naya otsenka sposobov usileniya sistemy postoyannogo toka 3 kV // Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zh. d. transporta. 1973. Issue 1. P. 1–12.
7. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. Warshawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. 250 p.
8. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles. Radom: Spatium, 2013. 158 p.
9. Kislyakov V. A. Sravnitel'naya otsenka tekhnicheskikh pokazateley razlichnykh sposobov usileniya elektrifitsirovannykh liniy postoyannogo toka // Sbornik trudov MIITa. 1978. Issue 604. P. 3–21.
10. Usilenie ustroystv tyagovogo elektrosnabzheniya / Veksler M. I. et. al. Moscow: Transport, 1984.
11. Sychenko V. H., Saienko Yu. L., Bosyi D. O. Yakist elektrychnoi enerhii u tiahovykh merezhakh elektryfikovanykh zaliznyts. Dnipro: PF Standart-Servis, 2015. 344 p.
12. Kosariev Ye. M. Rehuliuвання napruhy v kontaktanii merezhi elektryfikovanykh zaliznyts postiinoho strumu // Elektryfikatsiia transportu. 2015. Issue 9. P. 37–43.
13. Kotel'nikov A. V. Elektrifikatsiya zheleznykh dorog. Mirovye tendentsii i prespektivy. Moscow: Intekst, 2002. 104 p.
14. Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems / Calderaro V. et. al. // 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2015. doi: <http://doi.org/10.1109/icrera.2015.7418603>
15. Possibility of energy saving by introducing energy conversion and energy storage technologies in traction power supply system / Hayashiya H. et. al. // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, 2013. doi: <http://doi.org/10.1109/epe.2013.6631780>
16. Elektricheskie sistemy. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki / ed. by Venikova V. A. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 288 p.
17. Kosariev Ye. M. Matematychna model kerovanoi rozpodilenoї systemy tiahovoho elektropostachannia postiinoho strumu // Elektryfikatsiia transportu. 2017. Issue 14. P. 15–27.
18. Kosariev Ye. M., Bosyi D. O. Kompiuterna prohrama «Intelektualna systema elektropostachannia transportu». 2015. Issue 60711.
19. Doslidzhennia rezhymiv napruhy v systemi tiahovoho elektropostachannia postiinoho strumu / Sychenko V. H. et. al. // Elektryfikatsiia transportu. 2016. Issue 11. P. 61–70.
20. Doslidzhennia roboty systemy elektropostachannia postiinoho strumu pry propusku zdvoienykh poizdiv / Dziuman V. H. et. al. // Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2011. Issue 3. P. 74–76.
21. Burkov A. T., Burkov S. A., Sharpilova M. A. Rezhimy dvizheniya i osobennosti tyagovykh raschetov pri opredelenii nagruzok na ustroystva elektrosnabzheniya vysokoskorostnykh liniy // Eltrans-2011. Saint Petersburg: Peterburg. gos. un-t putey soobshheniya, 2013. 584 p.

22. Marskiy V. E. Podgotovka tyagovogo elektrosnabzheniya dlya organizatsii skorostnogo dvizheniya na linii Sankt-Peterburg-Moskva // Tokos'em i tyagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke. Moscow: Intekst, 2010. P. 15–19.

23. Snizhenie raskhoda energii v poezde putem optimizatsii metodov regulirovaniya // Zheleznye dorogi mira. 2003. Issue 1. P. 31–35.

24. Perspektiva razrabotki sistemy elektricheskoy tyagi postoyannogo toka povyshennogo napryazheniya 24 kV dlya skorostnoy magistrali Moskva-Ekaterinburg / Arzhannikov B. A. et. al. // Trendy. Sobytiya. Rynki. 2012. Issue 7. P. 48–50.

25. Ustenko A. V. Razvitie vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta // Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT. 2013. Issue 136. P. 49–55.

26. Razvitie vysokoskorostnogo transporta // Zheleznye dorogi mira. 2007. Issue 10. P. 9–17.

27. Marikin A. N., Mizintsev A. V. Novye tekhnologii v sooruzhenii i rekonstruktsii tyagovykh podstantsiy. Moscow: Marshrut, 2008. 220 p.

28. Arzhannikov B. A. Dva varianta usileniya sistemy elektrosnabzheniya tyagi postoyannogo toka. 2008. URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2008-04a18>

29. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog. Ekaterinburg: Izd-o UrGUPS, 2014. 431 p.

30. Arzhannikov B. A. Vozmozhnosti sistemy elektrosnabzheniya postoyannogo toka dlya propuska skorostnykh passazhirskikh i gruzovykh poezdov povyshennogo vesa. 2009. URL: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2009-10a21>

31. Peretvoriualnyi ahreat dlia tiahovoi pidstantsii postiinoho strumu: Pat. No. 51917. MPK: N02M 7/00 / Panasenko M. V. et. al. No. u201000364; declared: 15.01.2010; published: 10.08.2010. Bul. No. 15.

32. Marikin A. N., Samonin A. P., Zhemchugov V. G. Sposoby usileniya tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka pri intensivnom dvizhenii poezdov // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshheniya. 2012. Issue 3. P. 123–127. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-usileniya-tyagovogo-elektrosnabzheniya-postoyannogo-toka-pri-intensivnom-dvizhenii-poezdov>

33. Bosyi D. O. Metodyka rozrakhunku myttievyykh skhem systemy tiahovoho elektropostachannia dlia spozhyvannia postiinoi potuzhnosti // Elektryfikatsiia transportu. 2014. Issue 8. P. 15–25.