

УДК 621.311.1.018

О. А. Паянок, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ НАПРУГ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ МІСТА

Запропоновано універсальну методику проведення інструментальних досліджень на тягових підстанціях міського електричного транспорту, подано результати досліджень, які проводились на тягових підстанціях міста Вінниці з використанням цієї методики.

Постановка задачі

Останні роки характеризуються щораз більшим впровадженням в автономні електричні системи різноманітних напівпровідникових перетворювачів, збільшення одиничної потужності яких призводить до різкого зростання їх процентної частки в загальному навантаженні системи.

Дозволяючи суттєво спростити керування низкою технологічних процесів, дані пристрої одночасно є причиною суттєвого погіршення якості електричної енергії — коливання напруги, викривлення його форми, несиметрії.

Основними споживачами електроенергії в нашій країні є промисловість, комунальне господарство та транспорт. Досить вагомим споживачем електричної енергії є міський електричний транспорт, підвищення якості електроенергії для якого можна віднести до однієї з першочергових задач.

Однією із основних задач системи електропостачання наземного міського електротранспорту є прийом та перетворення електричної енергії в постійний струм, оскільки міський електричний транспорт є переважно споживачем постійного струму [1].

Зупиняючись на вищезазначеній особливості, слід відзначити, що в якості приймачів електричної енергії з нелінійними характеристиками позиціонуються в першу чергу пристрої силової електронної перетворювальної техніки, що здійснюють випрямлення змінного струму в постійний [2]. Даний тип силового напівпровідникового обладнання знайшов широке застосування в електрогосподарстві багатьох міст в тому числі і у ВП «ТТУ» м. Вінниці і експлуатується в ньому досить тривалий час. Застосування цих пристроїв в системі електропостачання електротранспорту міста Вінниці загострює проблему якості електроенергії, складовою частиною якої є рівень вищих гармонік. Несинусоїдальні режими, які виникають під час роботи силових перетворювальних агрегатів тягових підстанцій, несприятливо відбиваються на роботі силового електрообладнання та обумовлюють появу цілої низки небажаних явищ.

Як і багато інших форм перешкод, гармоніки несприятливо впливають на роботу всіх можливих видів електричного обладнання, яке знаходиться на досить великій відстані від місця генерування гармонічних складових сигналу напруги.

В той же час в автономних системах зазвичай є навантаження, які висувають підвищені вимоги до якості напруги. Для їх нормального функціонування необхідно забезпечити якість напруги, яка відповідає існуючим вимогам. В цих умовах виникає задача оцінки якості напруги та розробки заходів по її забезпеченню в регламентованих нормативами межах.

Залишаючи в стороні питання компенсації коливань напруги та несиметрії, вирішення яких є самостійними задачами, детально зупинимось на проблемі вищих гармонічних складових випрямленої напруги тягових підстанцій міського електричного транспорту (МЕТ). Остання є однією із основних задач і включає в себе як методи кількісної оцінки якості електроенергії, так і способи компенсації вищих гармонік.

Значущість та необхідність вирішення зазначеної проблеми якості електропостачання міського електричного транспорту обумовлюється ще однією суттєвою обставиною або особливістю. Ця особливість полягає в тому, що тягові мережі та підстанції міського наземного електричного транспорту працюють в умовах, суттєво відмінних від умов роботи стаціонарних силових електричних установок. Системи електропостачання міського електричного транспорту в цілому та особливо окремі фідерні зони електрифікованих ділянок контактної мережі відрізняються нерівномірністю

навантажень, що пояснюється:

- нерівномірною споживаною електричним міським транспортом потужністю (пуск, по автоматичній характеристиці, вибіг, гальмування);
- різноманітними швидкостями руху трамваїв та тролейбусів, як результат, і різноманітною споживаною енергією;
- залежністю навантаження фідерів тягових підстанцій від місця знаходження засобу рухомого складу на ділянці живлення;
- інтенсивністю руху засобів рухомого складу (ЗРС) та характером графіку руху;
- технікою ведення ЗРС і його типом та іншими факторами [3].

Досить тривалий час проблема якості електропостачання міського електричного транспорту (МЕТ) залишалась предметом досліджень великого кола вчених та інженерів. Проте, в останнє десятиліття двадцятого та на початку двадцять першого століття зацікавленість науковців до цих питань впала. На теренах України лише незначна частка науковців займається дослідженнями в області якості енергопостачання МЕТ. Саме тому вирішенню даної проблеми присвячена помірна кількість робіт, що обумовлює потребу в ширших дослідженнях цієї проблеми.

Усі вищевказані обставини обумовлюють актуальність та необхідність розробки загальної методики інструментальних досліджень на тягових підстанціях електротранспорту міста, а також постановки та проведення експерименту на тягових підстанціях МЕТ ВП «ГТУ» по стороні постійного струму із використанням запропонованої методики.

Задачею проведення вимірювань є визначення особливостей та побудови чітких залежностей спектрів напруги та струму від сумарних навантажень контактної мережі. При цьому постановка експерименту передбачає проведення паралельних вимірювань на тягових підстанціях міського електричного транспорту як по стороні змінного, так і по стороні постійного струму.

Необхідність постановки та проведення вимірювань в контактній мережі постійного струму обумовлюється необхідністю співвіднесення режимів роботи тягових підстанцій МЕТ міст із режимами нерівномірних навантажень контактної мережі, які формуються шляхом накладання струмів, що споживаються тяговими двигунами та власними потребами електричного рухомого складу. Крім того, в результаті вимірювань будуть отримані дані про присутність в змінній складовій випрямленої напруги гармонік різних частот, виникнення яких обумовлюється роботою перетворювачів та падіннями напруги в контактній мережі через нерівномірність споживаних МЕТ потужностей.

Постановка експерименту

Струми засобів рухомого складу викликають падіння напруги в тяговій мережі, випрямних агрегатах і трансформаторах тягових підстанцій, а також в мережі зовнішнього електропостачання. Падіння напруги залежить від значень і характеру тягових навантажень, які, в свою чергу, обумовлюють появу гармонік напруги із різноманітними гармонічними частотами.

Саме тому, одним із визначальних чинників отримання достовірних експериментальних даних є специфіка формування вибірки об'єктів дослідження та їх кількості з метою проведення на ТП необхідної кількості інструментальних вимірювань.

Отож, в електрогосподарстві будь-якого міста знаходиться певна кількість рівномірно розташованих по маршрутних лініях тягових підстанцій. Причому, з високою ймовірністю можна стверджувати, що в підпорядкуванні знаходяться різнотипні тягові підстанції. Критеріями формування вибірки для проведення інструментальних вимірювань повинні слугувати два показники — це величина навантаження та сумарна протяжність ділянки контактної мережі, яку обслуговує дана тягова підстанція (ТП). Сформована вибірка повинна містити різнотипні тягові підстанції, які обслуговують визначену ділянку протяжності контактної мережі.

Під час формування вибірки досліджень необхідно враховувати той факт, згідно якого серед множини досліджуваних підстанцій можуть бути присутні такі, що забезпечують електропостачання виключно трамвайних або тролейбусних та одночасно тролейбусних і трамвайних маршрутів транспорту.

Серед множини визначальних чинників постановки та проведення досліджень необхідно приділити особливу увагу часу та кількості вимірювань.

З метою отримання об'єктивних даних вимірювань спектрів по стороні постійного струму, дослідження необхідно здійснювати в години найбільшої завантаженості тягових підстанцій міського електротранспорту. Враховуючи наближену єдність тривалості робочого дня у всіх містах України,

можна стверджувати, що цим годинам відповідають ранкові та вечірні піки, які відповідно тривають приблизно з 7.30 до 10.00 та з 16.00 до 20.00.

В зазначені часові піки навантаження тягових підстанцій міського електричного транспорту зростає пропорційно обсягам пасажирських перевезень, що, в свою чергу, потребує функціонування значно більшої кількості одиниць електричного транспорту.

Щодо кількості необхідних вимірювань, слід наголосити на неодноразовості їх проведення з метою отримання достовірних даних та їх подальшого аналізу і узагальнення на всю систему тягової електромережі.

Розв'язання задачі

Результати застосування запропонованої методики досліджень відображені в даних, отриманих за результатами проведеного багаторазового дослідження на тягових підстанціях системи електропостачання МЕТ ВП «ТТУ» міста Вінниці.

Вимірювання спектрів напруг здійснювались в фазах вторинних обмоток знижувальних трансформаторів підстанцій та на виводах контактної мережі тягових підстанцій електричного транспорту шляхом неперервного (або дискретного із малими інтервалами реєстрації) запису досліджуваних сигналів. Серед безлічі наявних тягових підстанцій як досліджувані було обрано чотири різнотипні тягові підстанції, які задовольняють вищезгаданим критеріям формування вибірки для проведення інструментальних вимірювань.

Детальніше зупинимось на результатах вимірювань по стороні постійного струму.

В процесі вимірювань на досліджуваних ТП та аналізу отриманих даних використовувались два методи: практичний гармонічний аналіз осцилограм та аналіз, заснований на застосуванні спеціальних приладів-аналізаторів [4].

В якості приладів, які реалізують вищевказані методи, в процесі вимірювань використовувались такі вимірювальні засоби:

— двоканальний цифровий запам'ятовувальний осцилограф серії TDS 1002 фірми Tektronix. Основні функціональні можливості даного пристрою: смуга пропускання — 60 МГц; частота вибірки — 1,0 Гвіб/с;

— програмно-апаратний комплекс USB Autoscope II фірми InjectorService. Основні функціональні можливості: кількість аналогових входів — 8; максимальна частота оцифровування — 250 кГц;

Багаторазові вимірювання показників якості електричної енергії дозволили отримати докази того, що протягом роботи тягових підстанцій та контактної мережі електричного транспорту в останній виникають різноманітні рівні завад та викривлень, які вносяться засобами рухомого складу в контактну мережу.

Можна стверджувати, що випрямлена напруга тягових підстанцій МЕТ має дві складові: постійну та змінну із періодом повторюваності $2\pi/m$ [5, 6]. Змінна складова випрямленої напруги може бути розкладена на парні та непарні гармонічні складові. Якщо буквою k позначити номер гармоніки (k — послідовний ряд чисел), m — кількість фаз, f — частоту мережі, тоді частота відповідної гармоніки матиме вигляд, запропонований в [1]:

$$f_k = kmf. \quad (1)$$

Сімейство частот для випадків превалювання різноманітних гармонік спектра змінної складової випрямленої напруги запропоновано в таблиці.

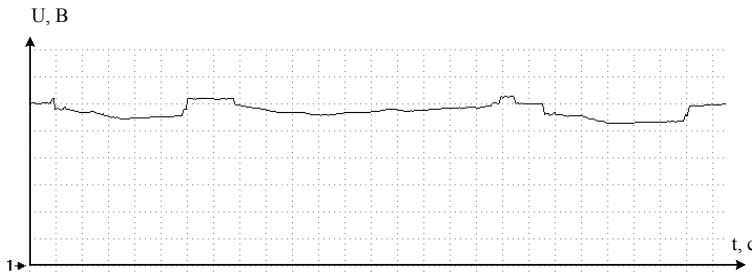
Частоти гармонік змінної складової випрямленої напруги	
Номер гармоніки	Частота гармоніки f_k , Гц
6-а	300
12-а	600
18-а	900
24-а	1200

В результаті проведених вимірювань напруг на досліджуваних тягових підстанціях встановлено, що випрямлена напруга у шестифазній схемі випрямлення містить змінну складову із гармоніками частотою 300, 900 та 1200 Гц. Крім того дослідженнями встановлена короткочасна присутність в змінній складовій випрямленої напруги гармонік вищих порядків із частотами 12, 14, 16 та 20 кГц.

Приклад осцилограми форми кривої випрямленої напруги ТП в режимі, коли на секціонованій

ділянці контактної мережі перебуває одночасно декілька одиниць електричного транспорту, показано на рисунку.

Випрямлена напруга на шинах тягової підстанції залежить від значень тягового навантаження енергосистеми. Особливістю тягового навантаження є змінювання його в ширших межах ніж не-тягове.



Осцилограма кривої випрямленої напруги ТП

В міських умовах, які характеризуються малими перегонами, значення струмів двигунів неперервно змінюються. Крім того, своєрідність умов роботи пристроїв електропостачання визначається неперервною зміною місць прикладення електричних навантажень у відповідності до руху транспортних одиниць вздовж лінії. Ця обставина призводить до суттєво тіснішої

та складнішої, ніж в стаціонарних установках, взаємодії системи електропостачання та засобу рухомого складу.

Узагальнення результатів на всю систему тягової електромережі

В якості об'єктів даного дослідження виступають елементи системи електропостачання міського електричного транспорту, зокрема трансформаторні та тягові підстанції.

Аналізуючи отримані дані, можна з високою ймовірністю стверджувати про цілком адекватне поширення отриманих експериментальних результатів на системи електропостачання тягових підстанцій інших міст, в тому числі на ТП ВП «ГТУ» міста Вінниці. Дане твердження обґрунтовується обставиною, згідно з якою силові пристрої ВП «ГТУ» за своїми характеристиками є повністю ідентичними на всіх дев'ятнадцяти тягових підстанціях міського електричного транспорту.

Аналіз роботи електрифікованого міського транспорту показав, що зміни струмів обумовлені в основному двома групами причин: перша група викликає дискретні зміни, а друга — неперервні і випадкові. До першої групи можуть бути віднесені такі фактори, як відстань між підстанціями, профіль та рельєф шляху, відхилення ваги ЗРС, зміна типу та потужності одиниць міського транспорту. До другої групи відносяться зміни: кількості та швидкості руху ЗРС на даній секціонованій ділянці для заданої густини руху, напруги на шинах підстанцій, реактивного опору в колах випрямлячів та режиму роботи всієї групи ЗРС [7].

До вищесказаного варто додати, що в трамвайно-тролейбусному хазайстві міста Вінниці експлуатується декілька типів рухомих одиниць, кожна з яких характеризується своїми електричними та динамічними показниками.

Однією із вагомих причин появи вищих гармонічних складових в мережі постійного струму є експлуатація на міському електричному транспорті ЗРС зі статичними тиристорними перетворювачами, які дозволяють плавно регулювати в широкому діапазоні напругу, підведена до тягових двигунів. Безумовно, тиристорне керування ЗРС постійного струму має суттєві переваги на відміну від реостатно-контакторного керування. Проте, тиристорне керування має й недоліки [1].

Одним з них є негативний вплив такого ЗРС на повітряні лінії зв'язку, а також на систему сигналізації, централізації та блокування. Цей вплив зумовлюється наявністю в тяговій мережі вищих гармонік, викликаних роботою пристроїв тиристорного керування, оскільки вхідний струм статичних тиристорних перетворювачів є пульсуючим. Вище зазначена обставина дає пояснення присутності у випрямленій напрузі тягових підстанцій змінної складової із гармоніками різних частот, в тому числі гармонічних складових вищих порядків із частотами 12, 14, 16 та 20 кГц.

Варто зазначити, що в результаті проведених інструментальних вимірювань було встановлено, що мережа міського електричного транспорту здійснює негативний вплив на радіозв'язок. Даний факт визначається якістю «знімання» струму та режимом ведення ЗРС. Спостереження показали, що між контактним проводом та струмоприймачем рухомого трамвая або тролейбуса виникали часті іскріння, зумовлені низкою причин, зокрема: перериванням струму в момент порушення контакту, іскрінням на колекторах двигунів, різкими змінами струму при розмиканні силових кіл в контакторах і контролерах. Іскріння, в свою чергу, супроводжується електромагні-

тним випромінюванням неперервного спектру частот, який охоплює майже весь діапазон частот, що використовується в радіозв'язку [1].

Висновки

Обґрунтовано необхідність та розроблено загальну методику інструментальних досліджень на тягових підстанціях електротранспорту міста.

Здійснено постановку експерименту та проведені багаторазові інструментальні дослідження на ТП МЕТ ВП «ТТУ» з метою виявлення вищих гармонічних складових різних порядків в кривій пульсуючої постійної напруги контактної мережі.

Здійснено порівняльний аналіз отриманих даних вимірювань, теоретично обґрунтовано та узагальнено причини суттєвої захарашеності спектрів напруг контактної мережі постійного струму вищими гармонічними складовими.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко В. В., Арзамасцев Н. В., Бодрухина С. С. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта. — М.: Транспорт, 1987. — 272 с.
2. Загайнов Н. А., Финкельштейн Б. С., Кривов Л. Л. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1988. — 328 с.
3. Прохорский А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции. — М.: Транспорт, 1978. — 530 с.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.
5. Засорин С. Н., Мицкевич В. А., Кучма К. Г. Электронная и преобразовательная техника. Учебник для вузов железнодорожного транспорта. — М.: Транспорт, 1981. — 319 с.
6. Загайнов Н. А., Финкельштейн Б. С., Кривов Л. Л. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1978. — 336 с.
7. Тимофеев Д. В. Режимы в электрических системах с тяговими нагрузками. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1972. — 296 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 20.02.08
Рекомендована до друку 25.02.08

Паянок Олександр Анатолійович — аспірант кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

Вінницький національний технічний університет