

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ НАПРУГ ТА СТРУМІВ НА ВХОДІ ЗМІННОГО СТРУМУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ МІСТА

*Мокін Б.І., д.т.н., проф., Паянок О.А., аспірант  
Вінницький національний технічний університет  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
E-mail: payanokoa@rambler.ru*

В работе предложены методика проведения инструментальных исследований на тяговых подстанциях городского электрического транспорта, а также результаты исследований, проводимых на тяговых подстанциях города Винницы с использованием предложенной методики

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, методика, тяговая подстанция, гармоника, измерение.

Electric measuring devices research technique for hauling substations and research results for hauling substations in Vinnytsia are offered in this work.

**Keywords:** electric power quality, method, hauling substation, harmonics, measurement.

**Вступ.** За період трохи більше десяти останніх років питання якості електропостачання переросли із вузької сфери інтересів спеціалістів в предмет всезагальної занепокоєності.

Досвід впровадження на промислових підприємствах різноманітного роду нелінійних навантажень свідчить про суттєве погіршення якості електроенергії в електричних мережах. Саме тому проблема якості електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств набула ще більшої гостроти і продовжує залишатися визначальним фактором в забезпеченні надійності та ефективності електропостачання споживачів.

Різноманітні галузі все більше і більше розраховують на електроенергію для своїх основних потреб, в той час як збільшення кількості навантажень нелінійного характеру збільшує гармонічні викривлення у всій системі електропостачання [1].

Основними споживачами електроенергії в нашій країні є промисловість, комунальне господарство та транспорт. Досить вагомим споживачем електричної енергії є міський електричний транспорт (МЕТ), підвищення якості електроенергії для якого можна віднести до однієї із 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 [2].

Аналізуючи вище зазначену особливість більш детально, слід відзначити, що приймачами електричної енергії з нелінійними характеристиками є в першу чергу перетворювальні

установки змінного струму в постійний [3]. Саме силове напівпровідникове обладнання такого типу знайшло широке застосування в електрогосподарстві багатьох міст в тому числі і у ВП "ТТУ" м. Вінниця і експлуатується в ньому досить тривалий час. Застосування цих пристроїв в системах електропостачання електротранспорту багатьох міст загострює проблему якості електроенергії, складовою частиною якої є рівень вищих гармонік. Несинусоїдальні режими, які виникають при роботі силових перетворювальних агрегатів тягових підстанцій, несприятливо відбиваються на роботі силового електрообладнання, систем релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

В цілому, варто відзначити, що потужні випрямляючі установки завжди є генераторами вищих гармонік, які, трансформуючись на первинну сторону трансформатора живлення, проникають в розподільчу мережу 6 – 10 кВ, спотворюючи синусоїдальну напругу мережі [4].

**Аналіз попередніх досліджень.** Тривалий час проблема якості електропостачання міського електричного транспорту залишалась предметом досліджень великого кола вчених та інженерів. Серед існуючих праць, присвячених вирішенню проблеми якості електропостачання МЕТ, на які опиралися дані дослідження, є роботи [3, 5].

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 існує потреба в більш широких дослідженнях цієї проблеми, що, разом із вище перерахованими обставинами, визначає

беззаперечно актуальність та необхідність подальших досліджень.

Необхідність проведення вимірювань по стороні змінного струму ґрунтується на попередній впевненості в тому, що напівпровідникові випрямляючі агрегати тягових підстанцій генерують в трифазну мережу несинусоїдальні струми [4, 6]. На етапі експериментальних досліджень дана обставина, яка ґрунтується на існуючих дослідженнях в галузі електропостачання міського електричного транспорту, буде підтверджена багаторазовими інструментальними вимірюваннями на прикладі системи електропостачання МЕТ міста Вінниці.

**Мета роботи.** Створення універсальної методики інструментальних досліджень на тягових підстанціях електротранспорту міста, а також апробація запропонованої методики під час проведення експерименту на тягових підстанціях МЕТ міста. Узагальнення отриманих результатів дослідження на всю систему тягової електромережі.

**Матеріал і результати дослідження.** Створення універсальної методики досліджень полягає у висвітленні та раціональному плануванні основних чинників, які визначають достовірність та об'єктивність отриманих даних. Серед них необхідно виділити наступні: специфіка формування вибірки об'єктів дослідження та їх кількості; час та кількість вимірювань; методи та характер вимірювань; інструментальне забезпечення вимірювань.

Ретельне планування та поєднання цих чинників в цілісну систему дає можливість сформувати чітку систему правил, дотримання яких дасть можливість суттєво скоротити час і об'єм вимірювань та створити загальну картину дослідження.

Серед вагомих чинників постановки та проведення експерименту на тягових підстанціях МЕТ міста слід виділити специфіку формування вибірки об'єктів та їх кількості з метою проведення на них необхідної кількості інструментальних вимірювань.

Електрогосподарство будь-якого міста нараховує визначену кількість рівномірно розташованих по маршрутних лініях тягових підстанцій, потужність яких визначає протяжність ділянки контактної мережі, яку обслуговує дана підстанція. Саме тому в експлуатації знаходяться різнотипні тягові підстанції. Зокрема в підпорядкуванні перебувають одноагрегатні, двоагрегатні та трьоагрегатні тягові підстанції (ТП).

Під час формування вибірки тягових підстанцій необхідно враховувати два основних показники – величину навантаження та сумарну протяжність ділянки контактної мережі, яку обслуговує дана ТП. Сформована вибірка повинна містити різнотипні тягові підстанції, які обслуговують визначену ділянку протяжності контактної мережі. При цьому,

з метою виявлення та диференціювання між собою можливих впливів на систему електропостачання транспортних одиниць трамвая і тролейбуса, слід 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.

До вагомих чинників підготовки та проведення експерименту слід віднести час та кількість вимірювань, необхідних для отримання достовірних даних для подальшого аналізу та обробки результатів.

Отож, з метою отримання об'єктивних даних вимірювань спектрів по стороні змінного струму, дослідження необхідно проводити в години найбільшої завантаженості тягових підстанцій міського електротранспорту.

Приймаючи однаковою тривалість, час початку та закінчення робочого дня у різних містах, можна стверджувати, що години найбільшої завантаженості тягових підстанцій МЕТ відповідають ранковим та вечірнім пікам, що відповідно тривають приблизно з 7.30 до 10.00 та з 16.00 до 20.00. Ці години відповідають часовим проміжкам, коли навантаження тягових підстанцій міського електричного транспорту зростає пропорційно об'ємам пасажирських перевезень, що, в свою чергу, потребує функціонування значно більшої кількості одиниць електричного транспорту.

Слід наголосити на багаторазовості вимірювань з метою отримання достовірних даних та врахування можливих суб'єктивної та випадкової складових похибки вимірювань.

В результаті постановки експерименту, опираючись на запропоновану методику досліджень, на ВП "ТТУ" міста Вінниці був проведений необхідний об'єм досліджень та вимірювань. З метою проведення вимірювань серед дев'ятнадцяти існуючих ТП було обрано чотири різнотипних тягових підстанції. Для оцінки рівнів гармонік струму та напруги в процесі вимірювань та аналізу отриманих даних використовувались два методи: практичний гармонічний аналіз осцилограм та аналіз, заснований на застосуванні спеціальних приладів-аналізаторів [7].

В якості приладу, який дає можливість реалізувати вищевказані методи, в процесі вимірювань використовувався трифазний реєстратор електроенергії Fluke 1735. Частота вибірки реєстратора складає 10,24 кГц.

Вимірювання спектрів струмів та напруг здійснювались в фазах вторинних обмоток понижуючих трансформаторів підстанцій із тяговими навантаженнями постійного струму.

Приклад спектрів кривих струму та напруги в колі вторинної обмотки перетворювального

трансформатора однієї із досліджуваних тягової підстанції приведений на рисунку 1.

Проведене дослідження показників якості електричної енергії дозволило отримати докази того, що протягом роботи тягових підстанцій та контактної мережі електричного транспорту в них виникають недопустимі рівні перешкод та викривлень, які вносяться перетворювачами в електричну мережу.

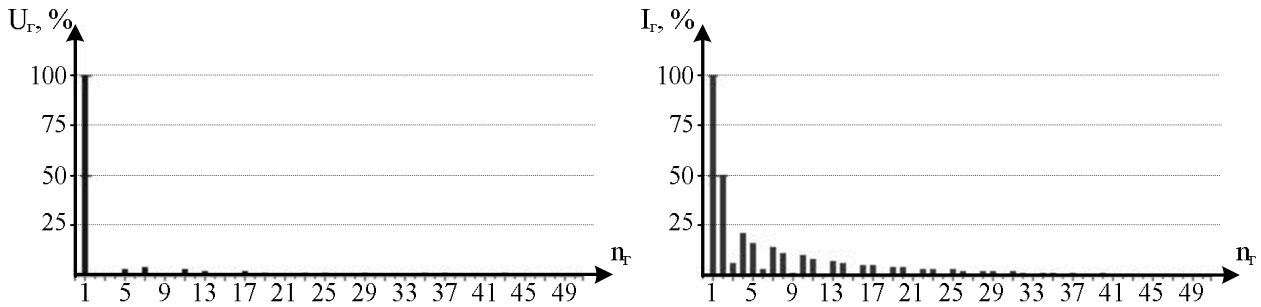


Рисунок 2 – Спектри напруги та струму вторинної обмотки перетворювального трансформатора

Дослідженнями визначено, що на досліджуваних тягових підстанціях ВП “ТТУ” значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги досягало  $7\% U_n$  при допустимому стандартному значенні  $5\% U_n$ , а окремі гармонічні складові напруги іноді перевищували в декілька разів регламентації ГОСТ 13109-97. При цьому слід відзначити, що основними превалюючими гармоніками в спектрі напруги змінного струму були гармоніки з номерами 5, 7, 11, 13, 17. В режимах, які характеризувались високою густиною руху засобів рухомого складу (ЗРС), в спектрі напруги проявлялись гармонічні складові вищих порядків, а саме: 19, 23, 25, 29, 35, 37 та 43 вищі гармонічні складові. Допустимий рівень гармонічних складових в фазах вторинної обмотки понижуючого трансформатора тягової підстанції № 9 пояснюється недовантаженістю випрямляючих агрегатів, що, в свою чергу, обумовлено незначною кількістю транспортних одиниць в даній зоні контактної мережі при заданій густині руху.

Результати вимірювань також підтвердили наявність вищих гармонік струму в фазах вторинних обмоток силових трансформаторів.

Спостереження різкозмінних навантажень тягових підстанцій електричного транспорту показали, що загальне викривлення гармонічного струму (THDI) при зростанні навантажень контактної мережі досягало  $THDI = 64\%$ . Отримані дані свідчать, що при цьому крива струму містила і парні, і непарні гармонічні складові, величина струмів яких пропорційно зменшувалась із збільшенням порядку вищої гармоніки. Характер загарашеності спектрів струму вищими гармоніками був ідентичним для всіх досліджуваних тягових підстанцій електричного транспорту і відрізнявся лише деякими

Допустимий вміст гармонік оцінювався коефіцієнтом гармонік  $k_f$ . Згідно ГОСТ 13109-97 для промислових мереж коефіцієнт гармонік не повинен перевищувати  $k_f \leq 5\%$ . Отримані в ході експерименту дані свідчать про недотримання вимог ГОСТ 13109-97 [8].

відмінностями у процентному співвідношенні вищих гармонічних складових у спектрах струмів. Криві струму в колах вторинних обмоток перетворювальних трансформаторів досліджуваних

ТП мали не синусоїдальну, а прямокутно-ступінчасту форму.

Ключовими об’єктами проблеми генерування вищих гармонічних складових в мережу змінного струму є елементи системи електропостачання міського електричного транспорту, зокрема трансформаторні та тягові підстанції.

На тягових підстанціях багатьох міст, в тому числі міста Вінниці, встановлені напівпровідникові кремнієві випрямлячі, які разом із силовими трансформаторами утворюють перетворювальний агрегат. Силові пристрої ВП “ТТУ” за своїми характеристиками є повністю ідентичними на всіх дев’ятнадцяти тягових підстанціях міського електричного транспорту. Саме тому, аналізуючи отримані на досліджуваних підстанціях дані можна з високою ймовірністю стверджувати про цілком адекватне поширення отриманих експериментальних результатів на системи електропостачання всіх інших тягових підстанцій ВП “ТТУ” міста Вінниці та часткове поширення їх на тягові підстанції системи електропостачання інших міст України.

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 при заданій густині руху, напруги на шинах підстанцій, реактивного опору в колах випрямлячів та режиму роботи всієї групи ЗРС [9].

Повертаючись до результатів вимірювань показників якості струмів та напруг вторинних обмоток перетворювальних трансформаторів тягових підстанцій ВП "ТТУ", варто відзначити, що причина надмірної захаращеності спектру змінного струму вищими гармонічними складовими прихована в магнітному небалансі намагнічуючих характеристик перетворювальних трансформаторів. Типовим нелінійним симетричним навантаженням в колах електропередачі є трансформатор.

Трансформатор, який знаходиться під синусоїдальною напругою, генерує симетричний намагнічуючий струм, який містить лише непарні гармоніки. Спектр намагнічуючого струму не зміниться, якщо до трансформатора буде підключене лінійне або нелінійне навантаження. Ця обставина доводить, що навантаження не генерує постійну складову струму [10].

В разі магнітного небалансу намагнічуюча характеристика та крива намагнічуючого струму відрізняється від характеристик, які спостерігаються в режимі холостого ходу. Якщо потік є несиметричним, то в осердя проникає середнє значення потоку  $\Phi_{пост.}$ , а складова потоку змінного струму компенсується значенням, яке дорівнює  $\Phi_{пост.}$ . Присутність середнього значення потоку означає, що крива насичення трансформатора містить постійну складову намагнічуючого струму.

У випадку такої несиметрії намагнічуючий струм містить і парні і непарні гармонічні складові. Асиметрія може бути викликана підключенням будь-якого навантаження до вторинної обмотки трансформатора, що призводить до появи постійної складової разом із синусоїдальними. Поява постійного струму може пояснюватись конструкцією трансформатора, як наприклад, у випадку трансформатора, який живить випрямляючий агрегат тягової підстанції, або може бути результатом несиметричної роботи деякої частини обладнання ійного струму та для малих порядків [10].

**Висновки.** Запропоновано універсальну методику інструментальних досліджень на тягових підстанціях електротранспорту міста та здійснена апробація даної методики під час проведення інструментальних досліджень на тягових підстанціях МЕТ ВП "ТТУ" міста Вінниці.

Дослідженнями підтверджена наявність недопустимих рівнів перешкод протягом роботи тягових підстанцій та контактної мережі МЕТ, які суттєво спотворюють форму кривих напруг та струмів об'єкта досліджень.

Здійснено узагальнення отриманих результатів експерименту на всю систему тягової електромережі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. – К: Наук. думка, 1992. – 240 с.
2. Шевченко В.В., Арзамасцев Н.В., Бодрухина С.С. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
3. 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.
4. Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.
5. Шевченко В.В., Арзамасцев Н.В., Бодрухина С.С. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 359 с.
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
8. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-67. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 80 с.
9. Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговими нагрузками. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
10. Арриган Дж., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.