

УДК 629.423.1:621.314

МУХА А. М., д.т.н., доц. (ДНУЗТ)

**Дослідження ЕМС тягового перетворювача багатосистемного електровозу у режимі живлення «змінний струм»**

---

**Вступ**

---

Основою тягової електропередачі сучасних електровозів та електропоїздів є статичні перетворювачі. Ключові режими роботи силових елементів тягових перетворювачів може призвести до збою роботи суміжних систем, зокрема кіл СЦБ. В одній з попередніх робіт [1] автор розглянув взаємодію перетворювача підвищеної частоти з колами СЦБ на ділянках залізниць електрифікованих постійним струмом.

Представлена робота розкриває особливості впливу тягового перетворювача підвищеної частоти багатосистемного електровозу, який працює у режимі живлення від контактної мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

Мета роботи – провести дослідження електромагнітної сумісності перетворювача підвищеної частоти багатосистемного електровозу при живленні від контактної мережі змінного струму з суміжними системами.

---

**Матеріал і результати дослідження**

---

Склад тягового змінного струму частотою 50 Гц представлений всім спектром непарних гармонік, де чільну роль відіграє третя гармоніка. Із зростанням порядку гармонік процентний вміст їх зменшується. При цьому гармонійний склад тягового струму в рейках відрізняється від свого складу в контактній мережі. Зміст третьої гармоніки в РК досягає 30% у зоні 5-6 км від тягової підстанції і знижується до 15-18% у зоні розтікання тягового струму [2,3].

Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електрорухомого складу представлені в [1], де визначені допустимі смуги частот, амплітудні значення та характер впливу останніх на сигнальні кола пристроїв СЦБ та зв'язку [1, табл. 1].

Як і раніш [1] для визначення рівня електромагнітної сумісності запропонованого статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза з колами СЦБ проведемо моделювання основних режимів його роботи. Вихідними даними для проведення моделювання є наступне.

У першому наближенні система тягового електропостачання як при постійному, так змінному струмі може бути замінена моделлю – еквівалентним джерелом напруги  $u_{\text{км}}$  (напруга контактної мережі) та послідовно ввімкненими  $R_{\text{км}}$  та  $L_{\text{км}}$  елементами [4].

Значення параметрів  $R_{\text{км}}$  та  $L_{\text{км}}$  є різними для систем тягового електропостачання постійного та змінного струмів.

Для системи тягового електропостачання магістральних залізниць активний опір контактної мережі може бути визначено [4]:

$$R_{\text{км}} = R_{\text{тп}} + (R_{\text{кд}} + R_{\text{р}}) l,$$

де:  $R_{\text{тп}}$  - еквівалентний опір тягової підстанції;  $R_{\text{кд}}$  та  $R_{\text{р}}$  - питомі опори контактного дроту та рейці відповідно, Ом/км;  $l$  - відстань від електровоза до живлючої тягової підстанції, км.

Питомі опір та індуктивність тягової мережі змінного струму залежать від частоти струму [4]. У першому наближенні, в

діапазоні частот від 50 Гц до 3000 Гц, питома індуктивність мережі змінного струму приймаємо  $L_{0\text{ змін}} \approx 1,0 \text{ мГн/км}$  [4, рис. 5.4].

Тоді розрахункова індуктивність тягової мережі змінного струму буде дорівнювати (відстань між живлючою підстанцією та електровозом приймаємо, як і на постійному струмі, 10 км):

$$L_{\text{км змін}} = L_{0\text{ змін}} \cdot l = 1,0 \cdot 10 = 10 \text{ мГн}.$$

Активний опір тягової мережі змінного струму промислової частоти приймаємо 0,17 Ом/км [5]. Тоді розрахунковий активний опір тягової мережі змінного струму дорівнює:

$$R_{\text{км змін}} = 0,17 \cdot 10 = 1,7 \text{ Ом}.$$

Для системи тягового електропостачання змінного струму тягова підстанція характеризується активним внутрішнім опором  $R_{\text{тп}}$  та індуктивністю  $L_{\text{тп}}$ , які можна визначити у першому наближенні, використовуючи активний та реактивний опір трансформатора тягової підстанції [6,7].

Активний внутрішній опір тягової підстанції змінного струму дорівнює [6]:

$$R_{\text{тп змін}} = 3 \cdot \frac{\Delta P_{\text{м}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^3,$$

де:  $S_{\text{ном}}$  – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;  $\Delta P_{\text{м}}$  – потужність втрат у міді трансформатора, кВт;  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга на шинах тягової підстанції, кВ.

Реактивний опір тягової підстанції змінного струму дорівнює [6]:

$$X_{\text{тп змін}} = 3 \cdot \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot 10^3,$$

де:  $u_{\text{к}}$  – напруга к.з. трансформатора, %.

Приймаємо, що на тяговій підстанції змінного струму розрахункової ділянки встановлено тяговий трансформатор типу ТДТНЭ-40000/150-71 із номінальними параметрами  $S_{\text{ном}} = 40000$  кВ·А,

$$U_{\text{ном}} = 27,5 \text{ кВ}, \quad \Delta P_{\text{м}} = 200 \text{ кВт},$$

$$u_{\text{к}} = 10,5 \text{ \%} \quad [8].$$

Тоді з отримаємо:

$$R_{\text{тп змін}} = 3 \cdot \frac{200 \cdot 27,5^2}{40000^2} \cdot 10^3 = 0,283 \text{ Ом},$$

$$X_{\text{тп змін}} = 3 \cdot \frac{10,5}{100} \cdot \frac{27,5^2}{40000^2} \cdot 10^3 = 0,148 \text{ мОм}.$$

Індуктивність тягової підстанції, при частоті 50 Гц, становитиме [9]:

$$L_{\text{тп змін}} = \frac{X_{\text{тп змін}}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,148}{2\pi \cdot 50} = 0,47 \text{ мкГн}.$$

Порівнявши порядок значень отриманих результатів приймаємо, що індуктивність тягової підстанції змінного струму в подальших дослідженнях не враховуємо.

Результуючий розрахунковий активний опір контактної мережі та тягової підстанції змінного струму дорівнює:

$$R_{\text{км пост}} = 0,283 + 0,17 \cdot 10 = 1,983 \text{ Ом}.$$

На рис. 1 представлена модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц.

У представленій моделі силовий модуль позначено як тягове плече, до складу якого входить мережевий випрямляч, три однофазних інвертори, тяговий трансформатор підвищеної частоти, тяговий інвертор та навантаження. Кожен з цих елементів є типовим для системи імітаційного моделювання.

Навантаження представлено RL ланцюжком із параметрами, які забезпечують протікання струму, відповідного до номінальних тягових двигунів, асинхронного або постійного струму. Запропонований підхід у моделюванні режимів роботи статичного перетворювача тягової електропередачі дозволяє оцінити саме взаємодію перетворювача з ланкою підвищеної частоти та рейкового кола [10,11].

В перетворювальній структурі 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а реалізовано силовий модуль типу М1, тобто кожен трифазний

трансформатор підвищеної частоти 3Ф живить тяговий контур до якого підключено один тяговий двигун (асинхронний – А або постійного струму - Т). До складу кожного силового модуля входить три по-

слідовно ввімкнених мережевих випрямлячі МВ за схемою 3а.

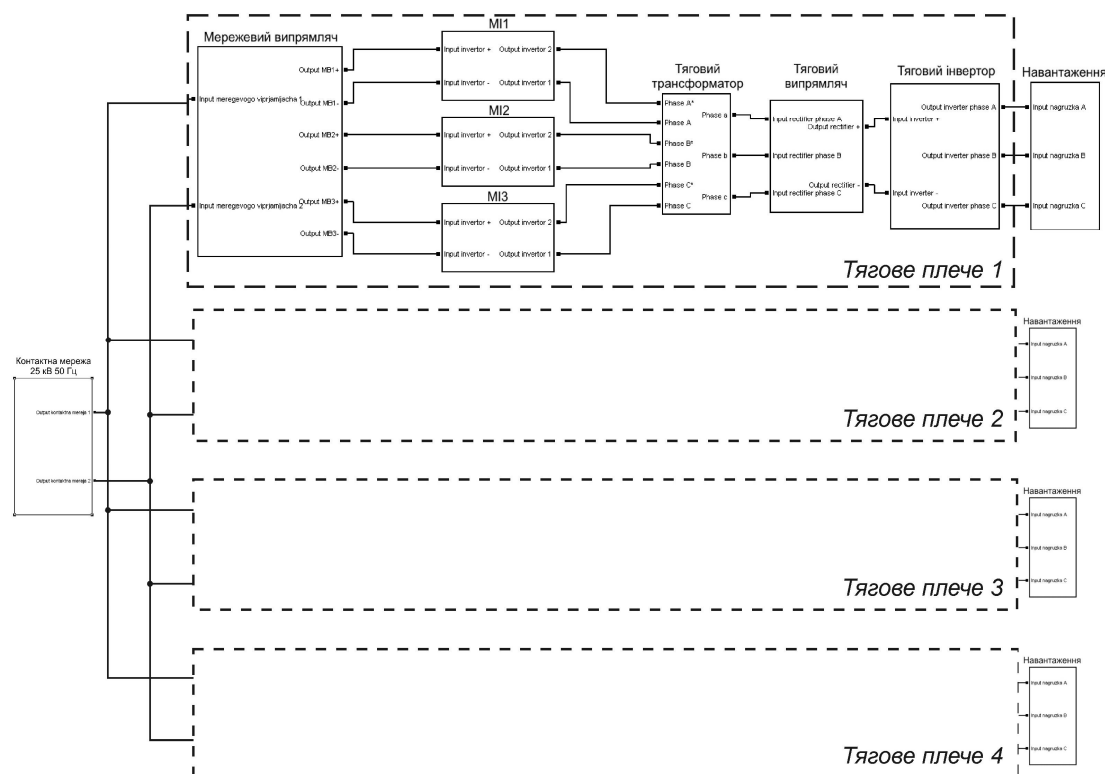


Рис. 1. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц

За рахунок зсуву фаз за напругою у роботі між кожним з силових модулів (на рис. 1 тягове плече) на кут  $\frac{2\pi}{n}$ , де  $n$  – кількість трифазних силових модулів у перетворювачі, реалізується метод еквівалентних фаз, який зменшує негативний вплив перетворювача на живлючу мережу [12].

Для перетворювальної структури типу 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а зсув напруг еквівалентних фаз складатиме  $\frac{360}{4} = 90$  ел. градусів, при цьому зсув фаз між кожним з трьох однофазних інверторів, які входять до складу мережевого контуру кожного з модулів, складатиме 120 ел. градусів, тобто реалізовано класичну трифазну систему. Зсув забезпечується режимом

роботи системи керування однофазних інверторів мережевого контуру перетворювача.

Як критерій взаємодії перетворювача з рейковими колами використовуються значення амплітуд гармонійних складових вхідного струму перетворювача, які надалі порівнюються з даними [1, табл. 1.].

На рис. 2 представлені часові діаграми вхідного струму та напруги на вході перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц.

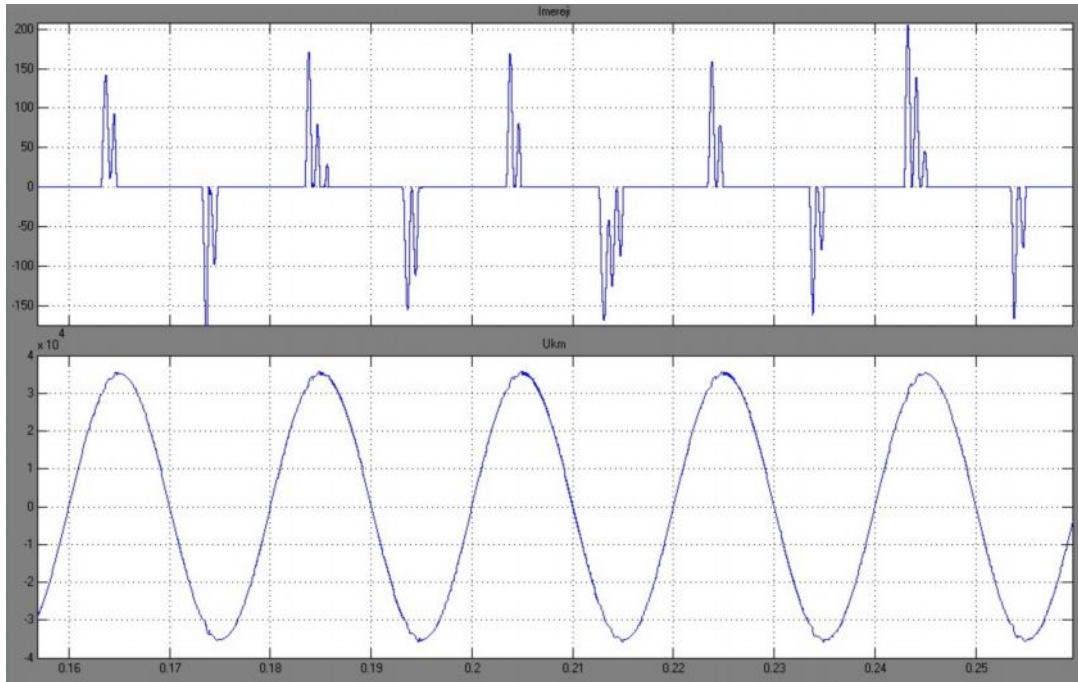


Рис. 2. Часові діаграми вхідного струму (верхня осцилограма) та напруги (нижня осцилограма) на вході перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі 25 кВ 50 Гц

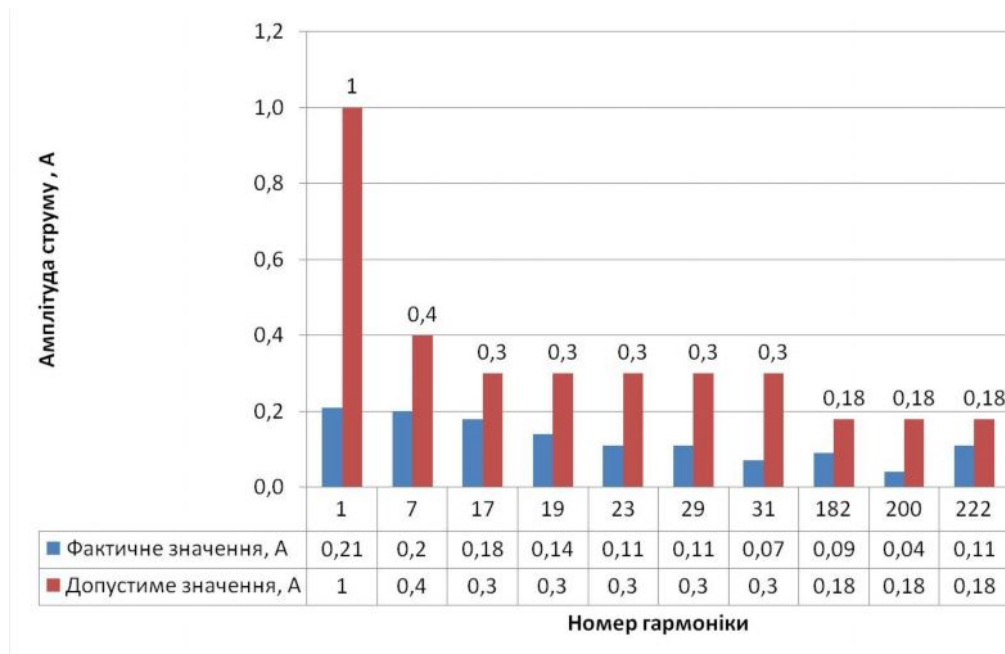


Рис. 3. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями

Система Simulink дозволяє проаналізувати гармонійний склад зафіксованих на осцилографах при моделюванні сигналів.

Зокрема у роботі проаналізовано гармонійний склад вхідного струму запропонованого тягового статичного перетворювача.

ча з ланкою підвищеної частоти, при струмову навантаженні перетворювача, еквівалентному тяговим двигунам АД914 (СТА1200) та ЕД141 при різних структурах та режимах живлення перетворювача.

На рис. 3 представлена гістограма, яка побудована за даними нормованих гармонік із [1, табл.1] та значень відповідних гармонік вхідного струму перетворювача.

При проведенні аналізу впливу частоти базової гармоніки приймали 25 Гц. Як бачимо з рис. 3 та даних [1, табл. 1] (частково представлених на рис. 3), при розрахунковому навантаженні перетворювач не генерує у рейкові кола гармонійних складових, які є небезпечними для кіл СЦБ електрифікованих залізниць.

### Висновки

Розроблені імітаційні моделі запропонованих структур тягового статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти дозволяють провести дослідження щодо визначення впливу цього перетворювача на кола СЦБ електрифікованих залізниць на змінному струмі у контактній мережі.

Як критерій взаємодії перетворювача з рейковими колами використовуються нормовані значення амплітуд гармонійних складових вхідного струму перетворювача.

У цілому проведені дослідження підтвердили забезпечення електромагнітної сумісності запропонованих перетворювальних структур із колами СЦБ електрифікованих ділянок залізниць.

### Список літератури

1. Муха, А. М. Дослідження впливу процесів у перетворювачі підвищеної частоти на системи автоматики електрифікованих постійним струмом ділянок залізниць [Текст] / А. М. Муха // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2012. – №31. – С. 109 – 113.

2. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.

3. Разгонов А. П. Оценка электромагнитной совместимости централизованного энергоснабжения пассажирских поездов и устройств СЦБ / А. П. Разгонов, В. Т. Вислогузов. // Транспорт. Збірник наукових праць. – 2002. - №12. – С. 137 – 145.

4. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / [Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Коваливкер Г. Н., Литовченко В.В.]; под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.

5. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. / [гл. ред. Конарев Н.С.]. – М.: Научное из-во «Большая Российская энциклопедия», 2003 - Т. 4. - 2003. – 1039 с.

6. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. – [под ред. Марквардта К. Г.]. – М.: Транспорт, 1980. – Т.1. – 1980. - 256 с.

7. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. – [под ред. Марквардта К. Г.]. – М.: Транспорт, 1980. – Т.2. – 1981. - 392 с.

8. Хоменко Б. И. Унифицированный преобразователь для электропоездов постоянного и переменного тока / Б. И. Хоменко, К. Н. Сулова // Электротехника. – 2009. - № 6. – С.27-32.

9. Основы теории цепей / [Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

10. Муха А. М. Математичне моделювання статичних перетворювачів електрорухомого складу / А. М. Муха, О. Ю. Балійчук // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2010»: междунар. науч.-практ. конф., 27-30 сент. 2010 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С. 21 - 22.

11. Муха А. М. Параметри тягових трансформаторів підвищеної частоти та їх вплив на рейкові кола / А. М. Муха, О. Я.

Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. - С.58-59.

12. Флора В.Д. Полупроводниковые устройства / В.Д. Флора, Ю.С. Коробков. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 64 с.

### Анотації:

У статті представлені результати дослідження, за допомогою імітаційної моделі, впливу процесів у тяговому перетворювачі підвищеної частоти на системи автоматики електрифікованих змінним струмом ділянок залізниць.

**Ключові слова:** перетворювач, електровоз,

електромагнітна сумісність, частота.

---

В статье представлены результаты исследования, при помощи имитационной модели, влияния процессов в тяговом преобразователе повышенной частоты на системы автоматики электрифицированных переменным током участков железных дорог.

**Ключевые слова:** преобразователь, электровоз, электромагнитная совместимость, частота.

---

In article are presented results of the studies, with the help of simulation model, influences of the processes in traction converter of the raised frequency on systems of the automation electrified by alternating current area railways.

**Keywords:** converter, electric locomotive, electromagnetic compatibility, frequency.

