

ВИБІР КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТЯГОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Стаття присвячена обґрунтуванню та вибору, серед існуючих, критеріїв для визначення електромагнітної сумісності статичного перетворювача підвищеної частоти, що входить до складу сучасного електрорухомого складу, з системами електрифікованих залізниць.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, тяговий перетворювач, багатосистемний електровоз

Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті, а в особливості на ділянках електрифікованих залізниць, є досить важливою складовою їх функціонування. Взаємопов'язана робота електричних систем залізничного транспорту безумовно призводить до появи їх взаємного електромагнітного впливу.

Мета даної роботи полягає у виборі показників якості електричної енергії, що споживають перспективні електровози, подальше використання яких дозволить провести оцінку електромагнітної сумісності тягового перетворювача з живлячими лініями електрифікованих залізниць.

Аналіз літератури та попередніх досліджень дозволив визначити деякі основні положення питання електромагнітної сумісності, які викладені нижче.

Як відомо, перетворення на тягових підстанціях, або на електрорухомому складі електричної енергії змінного струму в енергію випрямленого струму та навпаки – за допомогою статичних напівпровідникових перетворювачів, пов'язано зі значним споживанням реактивної енергії перетворювальними агрегатами. Крім того, напівпровідникові перетворювачі відносяться до класу навантажень, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, та споживають з мережі несинусоїдальний струм, що спотворює криву напруги живлячих енергосистем. Несинусоїдальність та несиметрія живлячої напруги, в свою чергу, негативно впливають на якість випрямленої напруги – призводять до появи в останній додаткових гармонійних складових та до підвищеного електромагнітного впливу тягової мережі на суміжні слабкострумкові системи. Це пов'язано з тим, що лінії зв'язку, як правило, прокладають паралельно трасі електрифікованої залізниці, а пристрої

залізничної автоматики використовують у якості сигнальних кіл рейкові кола, що одночасно являються зворотнім проводом для протікання несинусоїдального тягового струму [1, 2].

Повністю виключити електромагнітний та гальванічний вплив одного електрообладнання на інше, одних електричних кіл на інші практично неможливо.

На підставі проведеного аналізу різноманітних джерел інформації, в тому числі [8, 9, 11], визначимо, що на сьогоднішній день серед діючих стандартів України не існує такого, який би визначав нормовані показники електромагнітної сумісності (ЕМС) систем електрифікованих залізниць. А тому в практиці дослідження ЕМС, зазвичай намагаються знизити вплив перешкод до такої міри, при якій не порушувалася б нормальна робота електричних кіл користуючись при цьому ГОСТ 13109-97 [8, 10, 11] «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», що визначає норми якості електричної енергії, а саме рівні електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних перешкод у системах електропостачання загального призначення [3].

Згідно [3] основними показниками якості електричної енергії являються:

- стале відхилення напруги dU_y ;
- розмах зміни напруги dU_t ;
- доза флікера P_f ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} ;

- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U} ;
- відхилення частоти Df ;
- тривалість провалу напруги Dt_n ;
- імпульсна напруга $dU_{\text{имп}}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$.

При дотриманні зазначених норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення й електричних мереж споживачів електричної енергії (приймачів електричної енергії).

Особливістю багатосистемного електровозу є тяговий перетворювач підвищеної частоти [4], який, згідно згаданих вище положень перетворення енергії, є нелінійним навантаженням. А тому, серед представлених вище критеріїв, особливої уваги заслуговують наступні [3]:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U} ;

Автор проводить дослідження у галузі застосування багатосистемних електровозів на залізницях України.

Поняття багатосистемного електрорухомого складу (ЕРС) визначає можливість роботи останнього як у мережі постійного так і змінного струму [4]. Цей факт вимагає визначення єдиних спільних критеріїв оцінки ЕМС, які дозволили б врахувати всі особливості функціонування вказаних мереж та зробити порівняльну оцінку електромагнітного впливу.

Так для будь-яких існуючих схем електропостачання залізниць змінного струму, які живляться від районної трифазної мережі, характерними є проблема несиметричного навантаження фаз, що призводить до появи несиметрії напруги на шинах тягових підстанцій [6]. До того ж, відкритим залишається неодноразово згадане питання спотворення синусоїдальності струмів та напруг за рахунок наявності у мережі нелінійного навантаження.

Перевагою системи живлення постійного струму є відносно невеликий вплив навантаження тягової мережі на суміжні лінії [6]. Для такої системи не є характерним явище несиметрії напруг, а відсутність на існуючому електрорухомому складі постійного струму статичних перетворювачів знижує показники несинусоїдальності струмів та напруг мережі.

Даний факт не можна використовувати при оцінці ЕМС багатосистемного ЕРС через наявність у його складі вище згаданого статичного перетворювача підвищеної частоти [4].

Таким чином, зауважимо, що серед представлених показників якості електричної енергії розглянутих систем єдиним, який задовольняє вказану вище умову порівняльного аналізу, є несинусоїдальність струмів та напруг. Тому, в якості узагальненого критерія для оцінки ЕМС багатосистемного ЕРС з тяговими мережами постійного і змінного струму будемо використовувати вище згадані коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U , та коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

У роботі [5], додатково до визначених, пропонується ряд показників електричної енергії, що характеризують ЕМС системи тягового електропостачання з ЕРС та системою зовнішнього електропостачання. Серед них варто відмітити той, що характеризує вплив електрорухомого складу безпосередньо на систему тягового електропостачання, а саме $K_{\text{п.і}}$ – приведений коефіцієнт спотворення синусоїдальності струму ЕРС.

Підбиваючи підсумок проведеного аналізу літературних джерел, остаточно визначимось з показниками ЕМС, які будемо використовувати при проведенні подальших досліджень. Такими показниками є:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- приведений коефіцієнт спотворення синусоїдальності струму ЕРС $K_{\text{п.і}}$.

Визначення кожного з вказаних коефіцієнтів потребує фізичного виміру контрольованих величин, які залежать від того чи іншого показника та мають відповідний порядок виміру.

Згідно [3], виміри коефіцієнтів K_U та $K_{U(n)}$ виконують для міжфазних або фазних напруг трифазної системи живлення. При визначенні коефіцієнту $K_{U(n)}$ спершу для кожного i -го спостереження за визначений період часу, що дорівнює 24 години, визначають діюче значення напруги n -ої гармоніки $U_{n(i)}$, та вказаний коефіцієнт у відсотках:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} \cdot 100, \quad (1)$$

де $U_{1(i)}$ - діюче значення напруги основної частоти.

З метою остаточного визначення даного контрольованого параметру, проводять усереднення отриманих результатів i -их спостережень на інтервалі часу, що дорівнює 3 с.:

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}, \quad (2)$$

де N - кількість спостережень, що відповідно до додатку Е [3] має бути не менше 9.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом n -ої гармонійної складової напруги вважають відповідною вимогам дійсного стандарту, якщо найбільше з усіх, обчислених протягом 24 годин, значень вказаних коефіцієнтів не перевищує гранично припустимого значення, а значення коефіцієнта $K_{U(n)}$, що відповідає імовірності 95% за встановлений період часу, не перевищує нормально допустимого значення.

Крім того, допускається перевірка якості електричної енергії на відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю часу виходу розглянутого показника за нормально й гранично припустимі значення. В цьому випадку, якість електричної енергії за коефіцієнтом $K_{U(n)}$ вважають відповідною вимогам [3], якщо сумарна тривалість вказаного вище часу становить не більше 5% від встановленого для спостережень періоду часу, тобто 1 год 12 хв, а за гранично припустимі значення - 0 % від цього періоду часу.

Аналогічно проводять визначення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U . Спершу, як і в попередньому випадку, проводять визначення

вказаного параметру для кожного i -го спостереження протягом часу, що дорівнює 24 години, для чого попередньо визначають діюче значення гармонійних складових напруги діапазону гармонік з 2-ї до 40-ї:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100. \quad (3)$$

При цьому, при визначенні даного показника якості електричної енергії допускається не враховувати ті гармонійні складові, відсоткова доля яких становить менше 0,1%.

Подальше визначення параметру, що розглядається, знову ж таки проводиться методом усереднення отриманих значень коефіцієнтів K_{Ui} та виконується з урахуванням вказаних вище умов, тобто:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}. \quad (4)$$

При цьому, умови, за яких якість електричної енергії за вказаним критерієм відповідає стандарту [3], залишаються аналогічними до визначених вище для коефіцієнту $K_{U(n)}$.

Останнім з визначених показників ЕМС є приведений коефіцієнт спотворення синусоїдальності струму ЕРС K_{n-i} , який згідно [5] визначається наступним чином:

$$K_{ni} = \frac{\left(\sum_{n=3}^N \left(I_n \cdot \frac{K_{i3H}}{K_{inH}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{I_1} \cdot 100, \quad (5)$$

де K_{i3H} та K_{inH} - нормовані значення коефіцієнтів спотворення синусоїдальності струму ЕРС відповідно третьої та n -ої гармонійних складових, які в загальному випадку визначаються, як:

$$K_i = \frac{\left(\sum_{n=3}^{41} (I_n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{I_1} \cdot 100. \quad (6)$$

У виразах (5) та (6): n - порядок гармоніки; I_n - діюче значення n -ої гармонійної складової струму ЕРС; I_1 - діюче значення першої

гармоніки струму ЕРС; N – порядок останньої гармоніки в розрахунковому діапазоні спектру частот.

При визначенні вказаних коефіцієнтів пропонується розрахунки починати з найбільш небезпечної, з точки зору дії статичних перетворювачів, третьої гармоніки. Але аналіз ЕМС статичного перетворювача підвищеної частоти з системами електрифікованих залізниць вимагає розгляду повного спектру частот. Тому, при виконанні досліджень, пропонується проводити аналіз гармонік починаючи з другої.

При розгляді загальних питань електромагнітної сумісності, що проводився вище, було окремо відмічено лінії сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) та лінії зв'язку, як системи, що найчастіше зазнають електромагнітного впливу. А тому, при проведенні досліджень ЕМС статичного перетворювача варто окрему увагу приділити саме вказаним системам.

Загалом весь спектр перешкод, що безперервно супроводжує роботу вказаних об'єктів залізниць, поділяють на перешкоди індуктивного та кондуктивного характеру. Наявність перешкод індуктивного характеру пов'язана з існуванням змінних електромагнітних полів, що наводяться суміжними електричними лініями з високим рівнем передачі енергії. Кондуктивні ж перешкоди обумовлені наявністю неодноразово згаданого спектру вищих гармонік тягового струму, що впливають на системи СЦБ через рейкові кола.

З точки зору оцінки електромагнітного впливу статичного перетворювача багатосистемного електровозу, на вказані системи, найбільшої уваги заслуговують саме перешкоди кондуктивного характеру. А тому подальші дослідження доцільно проводити з урахуванням останнього твердження.

Як і раніше, розглянутий аналіз ЕМС потребує наявності відповідної нормативної бази, яка, як і у попередньому випадку, не є достатньою [9]. В практиці оцінки ЕМС ЕРС з системами СЦБ на залізницях України користуються відповідними нормативними документами країн Європи [13] та СНД, а найчастіше Російської Федерації (РФ). А тому, в якості опорного нормативу, при виконанні вказаного дослідження, будемо використовувати діючі на сьогодні на території РФ «Нормы безопасности НБ ЖТ ЦТ 04-98» [12].

Вище проведені аналітичні обґрунтування вибору критеріїв дослідження ЕМС дозволили визначити ряд величин, напруг та струмів, що необхідні для їх розрахунків. При цьому, варто зауважити, що в реальних умовах робота електрорухомого складу постійно супроводжується різноманітними динамічними навантаженнями та перехідними процесами. А тому вимірювані величини не залишаються постійними.

При цьому наявність вказаних процесів обумовлена не лише умовами експлуатації ЕРС, а й режимами ведення поїзду, тобто режимами його роботи, його зчіпною масою та умовами електропостачання [7].

Режими ведення поїздів розрізняються величиною пускових та тормозних зусиль, що обумовлюються вище згаданою зчіпною масою потягу та профілем колії [7]. Наявність затяжних під'йомів та спусків, а також важковагових поїздів, як відомо, призводить до різкої зміни величини споживаного електровозом струму. При цьому змінюються величини амплітуд його вищих гармонійних складових та в цілому можуть погіршуватись умови забезпечення електромагнітної сумісності.

Тому, при оцінці ЕМС тягового перетворювача підвищеної частоти, визначення вказаних вище коефіцієнтів варто проводити в узгодженні з режимами роботи ЕРС, використовуючи особливості профілів його руху та величини зчіпної маси.

Таким чином, проведені аналітичні дослідження дозволили обрати критерії оцінки ЕМС тягового перетворювача багатосистемного електрорухомого складу з системами електрифікованих залізниць. Останні дозволяють достатньо повно охарактеризувати ступінь електромагнітного впливу перетворювача на суміжні системи.

Крім того, було визначено особливості роботи електрорухомого складу, які впливають на визначення вказаних критеріїв та порядок їх визначення. Отримані результати буде використано в подальших дослідженнях.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учеб. пособие для вузов ж/д тр-та / М. П. Бадер – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Лешёв, А. И. Обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в системе электрической тяги постоянного тока [Текст]: Автореферат диссертации на соискание

- степени кандидата технических наук / А. И. Лещёв. – М.: РГОТУПС, 2003. – 28 с.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М., 1998. – 31 с.
 4. Муха, А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів [Текст]: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук / А. М. Муха. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 35 с.
 5. Ермоленко, Д. В. Показатели электромагнитной совместимости и методы её обеспечения в системе элеткрической тяги временного тока [Текст]: Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук / Д. В. Ермоленко. – М.:ВНИИЖТ, 1999. – 41 с.
 6. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]: учеб. пособие для вузов ж/д тр-та / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
 7. Режимы работы магистральных электровозов [Текст] / под. ред. О. А. Некрасова – М.:Транспорт, 1983. – 231 с.
 8. Сиченко, В. Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту [Текст]: Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 396 с.
 9. База нормативних документів України [Ешлектрон. ресурс] // ДП «Укрметртестстандарт» Науково-технічний центр стандартизації, інформаційного забезпечення та підтвердження відповідності. – Режим доступу: <http://www.csm.kiev.ua/nd/nd.php>
 10. Разгонов, С. А. Підвищення надійності роботи рейкових ланцюгів в умовах впливу перешкод тягового струму та нестабільності напруги в мережі живлення: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 178 с.
 11. Сиченко, В. Г. Електроживлення систем залізничної автоматики [Текст]: монографія / В. Г. Сиченко, В. І. Гаврилюк. – Д.: вид-во Маковецький, 2009. – 372 с.
 12. НБ ЖТ ЦТ 04-98. Електровозы. Нормы безопасности. – М., 1998. – 88 с.
 13. EN 50121-3-1 Electromagnetic compatibility – Part 3-1:Rolling stock – Train and Complete vehicle
- Надійшла до редколегії
Прийнята до друку

ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ БОНДАРЕНКО

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Статья посвящена обоснованию и выбору, среди существующих, критериев для определения электромагнитной совместимости статического преобразователя повышенной частоты, входящего в состав современного электроподвижного состава с системами электрифицированных железных дорог.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, тяговый преобразователь, многосистемный электровоз

Y. S. BONDARENKO

CHOICE A CRITERIA FOR ESTIMATING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TRACTIVE CONVERTERS OF PERSPECTIVE ELECTRIC LOCOMOTIVE

The article is devoted to the justification and the choice among existing criteria for determining the electromagnetic compatibility of high-frequency static converter, which is part of the modern electric rolling stock systems, with the systems of electric railways.

Keywords: electromagnetic compability, tractive converter, multisystem locomotive.

