

В. Г. Сиченко, д-р техн. наук

(Україна, м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна)

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Вступ

Будь-яке електромагнітне середовище формується як результат певного технологічного процесу. В електроенергетичному процесі системи тягового електропостачання (СТЕ) – це розподіл, передача і споживання електроенергії. Кожному етапу цього процесу властиві певні зміни, викликані відхиленнями від заданого режиму, принципом дії електроустаткування і його станом, діями обслуговуючого персоналу, кліматичними чинниками, роботою засобів захисту й автоматики.

Електромагнітна обстановка, як сукупність електромагнітних явищ, що існують у даному середовищі, описується характеристиками джерел перешкод, параметрами їх дії, особливостями електротехнічних засобів, заходами, спрямованими на забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), а також зовнішніми чинниками, впливаючими на зазначені характеристики (кліматичні, механічні, виробничі і т.п.).

Коло питань, які визначають зміст ЕМС у СТЕ, досить велике і, взагалі, зводиться до вирішення таких основних завдань: оцінки ЕМС джерел електромагнітних перешкод і інших навантажень, тобто визначення впливу електромагнітних перешкод на електроустаткування і оцінки економічного збитку, що виникає при цьому; оцінки значень електромагнітних перешкод, генерованих різними нелінійними і різкозмінними навантаженнями, прогнозування їх значень у різних вузлах СТЕ, і, нарешті, мінімізації їх рівнів до значень, допустимих відповідними нормативними документами.

Показники якості електричної енергії (ПЯЕ) є тими рівнями ЕМС електричної мережі, при яких гарантується нормальне функціонування будь-яких електротехнічних засобів, підключених до цієї мережі, якщо ці ПЯЕ не перевищують допустимих значень. З іншого боку, електротехнічні засоби характеризуються своїми допустимими рівнями ЕМС, які визначають їх перешкодостійкість, при якій і гарантується нормальне функціонування цих засобів. Очевидно, рівні перешкодостійкості повинні бути вищими за значення ПЯЕ в електричній мережі.

Якість електроенергії (ЯЕ) у загальному понятті електромагнітної сумісності споживачів у системах електропостачання належить до найважливіших проблем сучасної електроенергетики. Від її вирішення багато в чому залежить підвищення ефективності використання електроенергії, а також режимна безпека електроенергетичної системи і надійність енергозабезпечення споживачів [1].

Розробка основних напрямів підвищення енергоефективності СТЕ пов'язана з визначенням причин нераціонального використання електроенергії і резервів енергозбереження, зокрема, його потенціалу. Впровадження заходів щодо енергозбереження в СТЕ, які мають значну кількість нелінійних і нестаціонарних споживачів, передбачає забезпечення заданих рівнів ЯЕ в системах і ЕМС її елементів. Це пов'язане з тим, що зниження якості напруги і струму в СТЕ призводить до порушення технологічних режимів, зростання рівнів споживання активної і реактивної потужностей, додатковим втратам активної енергії, скороченню терміну служби і зниженню коефіцієнта потужності системи і, відповідно, продуктивності електричного устаткування. Основним фактором цих негативних явищ є розповсюдження кондуктивних перешкод через різноманітні гальванічні зв'язки [2].

Якість електроенергії є істотним чинником, що впливає на ефективність режимів енергосистеми і споживачів. Проблема забезпечення ЯЕ в електричних мережах загального і спеціального призначення набула в останнє десятиліття особливої актуальності. Це викликано широким упровадженням нових прогресивних технологічних процесів і систем і, як наслідок, безперервним зростанням числа і потужності нелінійних, несиметричних і швидкозмінних споживачів електроенергії, засобів цифрової техніки, а також відповідними режимними змінами потякорозподілу в електричних мережах. В Україні положення з ЯЕ погіршується через: недостатню пропускну здатність електричних мереж (особливо низької напруги, довжина ліній яких досягає 50% загальної довжини усіх ліній електропередачі); застарілі методи їх проектування і експлуатації, що не враховують повною мірою показники ЯЕ; відсутність сучасних засобів виміру ЯЕ і ефективних засобів його поліпшення. Численні дослідження режимних параметрів в електричних мережах України свідчать про те, що основні показники ЯЕ не завжди відповідають існуючим вимогам [3].

Метою роботи є встановлення впливу енергообмінних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії.

Викладення основного матеріалу

Нестаціонарні енергообмінні процеси, які відбуваються в нелінійних колах СТЕ, викликають цілу низку негативних явищ (рис. 1) та призводять до погіршення якості електричної енергії. Якість електричної енергії залежить від характеру навантаження споживачів. Безперервна зміна навантаження, характерна для тягових мереж, викликає зміну рівня напруги, несиметрію і несинусоїдальність напруги. Отже, такий же змінний характер матимуть і показники якості електричної енергії. Це посилює складність оцінки їх впливу на роботу споживачів.

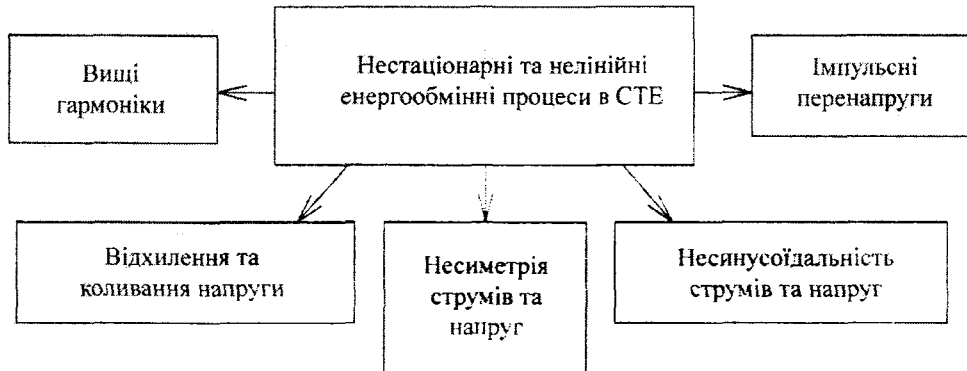


Рис. 1. Вплив електромагнітних процесів на якість електроенергії.

Оскільки всі відхилення якості електроенергії викликаються падіннями напруги в елементах електропостачання, то вони залежать не тільки від значення навантаження, але і від параметрів системи. Тому параметри системи доводиться вибирати так, щоб не були порушені вимоги, що ставляться до якості електричної енергії.

Для аналізу енергообмінних процесів нелінійних електричних кіл на сьогодні широко використовуються матрично-топологічні методи, теорія обмінних характеристик, статистичні методи, метод фазних координат, вейвлет-аналіз, спектральний аналіз, інформаційний аналіз, метод структурних орієнтованих чисел, методи нечіткої логіки та теорія множин. При цьому розробка моделі ЕМС СТЕ повинна враховувати різні структури взаємодії чинників та будуватися не тільки на ієрархічному принципі, а й з урахуванням специфіки утворення електромагнітних перешкод (ЕМП).

Забезпечення необхідного рівня ЯЕ у системах тягового електропостачання електрифікованих залізниць має здійснюватись застосуванням необхідних технічно можливих заходів при розробці та виготовленні обладнання і комплектувальних виробів, проектуванні та побудові СТЕ на базі обґрунтованого вибору її конфігурації і параметрів та раціональних схем підключення до системи зовнішнього електропостачання. Розглядаючи ЕМС, як один із показників якості функціонування СТЕ, необхідно охоплювати весь комплекс технічних засобів, котрі задіяні в процесі передачі та споживання електроенергії.

У системі тягового електропостачання постійного струму порівняно простіше вирішується завдання симетричного навантаження фаз зовнішньої живильної енергомережі, у той час як в системі тягового електропостачання змінного струму ця проблема все ще чекає свого часу. Щодо електрорухомого складу постійного струму, то, незважаючи на порівняно низький рівень живильної напруги, його коефіцієнт корисної дії є дещо вищим за коефіцієнт корисної дії електрорухомого складу змінного струму. При цьому електромагнітну сумісність підсистем електричної тяги необхідно розглядати у більш широкому аспекті, а саме, як з боку виключення негативного впливу підсистем електричної тяги (тягового електропостачання та електрорухомого складу) на пристрої залізничної автоматики, зв'язку та інші суміжні пристрої, так і з боку виключення негативного впливу на якість споживаної електроенергії та негативного впливу однієї підсистеми електричної тяги на іншу, а також на систему зовнішнього електропостачання.

Основними пристроями енергетичних каналів СТЕ постійного струму є тягові перетворювачі. Їх застосування, як відомо, викликає низку негативних факторів: споживання реактивної енергії, спотворення первинних струму та напруги, генерацію вищих гармонійних складових. Наявність потужних нелінійних навантажень негативно впливає на якість електричної енергії як у лініях зовнішнього електропостачання, так і в тяговій мережі, що, в свою чергу, призводить до додаткових втрат електричної енергії та зниження терміну експлуатації електричних апаратів. Розвиток швидкісного руху та транспортних коридорів, впровадження сучасних технологій та обладнання, в тому числі нових типів електрорухомого складу, призводить до збільшення споживання електричної енергії, а, значить, і до збільшення споживання реактивної енергії, збільшення втрат активної енергії та погіршення гармонійного складу струмів і напруг як на стороні змінного, так і постійного струму.

Тягові підстанції електрифікованих залізниць постійного струму в основному обладнані випрямними агрегатами, які працюють за 6-пульсовими схемами випрямлення змінної напруги: мостовій і дві зворотні зірки з вирівнювальним реактором. При симетричній напрузі живильної лінії змінна складова на

шинах тягового навантаження включає гармоніки, кратні 300 Гц – 300, 600, 900, 1200 Гц і т.д. Однак, несиметрія фазових напруг живильних ЛЕП додатково призводить до появи гармонік із частотою, кратною 100 Гц, але не кратною 300 Гц, – 100, 200, 400 Гц і т.д. Нині на тягових підстанціях розпочате застосування 12-пульсових випрямлячів, які забезпечують поліпшення техніко-економічних показників роботи системи тягового електропостачання. У реальних умовах перетворення електричної енергії спектральний склад випрямленої напруги 12-пульсового випрямляча також складається з гармонік із частотами 100, 200, 300, 400 Гц і т.д., але амплітудні значення U_{mn} зазначених гармонік нижчі, ніж при 6-пульсових перетворювачах.

Проблема ЕМС перетворювачів розглядається у взаємозв'язку із проблемою якості електричної енергії, оскільки фізичні явища, що супроводжують процес перетворення параметрів електричної енергії: споживання реактивної потужності, генерація гармонік струму, спотворення форми кривої напруги, – впливають на якість електричної енергії в живильній електричній мережі.

З урахуванням жорстких вимог сучасних стандартів до електромагнітної сумісності тягових перетворювальних агрегатів підстанцій постійного струму із живильною і тяговою мережами можна стверджувати, що тиристорні випрямлячі у своєму класичному виконанні, які працюють в режимі стабілізації напруги на шинах тягової підстанції, не забезпечують потрібного рівня якості перетворення електроенергії трифазного змінного струму в постійний струм. Це стосується як несинусоїдності мережевих струмів і генерованої потужності, так і гармонійного складу випрямленої напруги і достатньо великої інерційності (до 10 мс) переходу агрегата із випрямного (тягового) в інверторний (рекуперативний) режими або режим нульової вихідної напруги (струмообмежувальний).

Компенсація реактивної потужності і близька до синусоїди форма мережевого струму забезпечується також в перетворювальних агрегатах, побудованих на 12-пульсних тиристорних випрямлячах (як некомпенсованих, так і компенсованих), при використанні силового активного фільтра (САФ) на основі автономного інвертора напруги (АН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), тобто при використанні засобів силової електроніки.

Основним споживачем електричної енергії на електрифікованих ділянках залізниць постійного струму є електрорухомий склад (ЕРС). У результаті електромагнітних процесів, що відбуваються в ЕРС при споживанні та перетворенні електричної енергії, він генерує ЕМП в широкому спектрі частот, які поширюючись через кондуктивні та індуктивні зв'язки, можуть негативно впливати на роботу суміжних низькоенергетичних пристроїв залізничної автоматики та інформаційно-керуючих систем. Джерелами ЕМП можуть бути, в першу чергу, комутаційні процеси: у разі зміни режиму роботи тягових двигунів, силового устаткування, виникання аварійних ситуацій, відриву струмоприймача, поганого контакту колесо-рейка, роботи перетворювальних приладів і т. і. Необхідно зазначити, що процес споживання електричної енергії ЕРС відбувається в умовах постійних коливань напруги на струмоприймачеві, яка, до того ж, містить гармонійні складові, обумовлені недосконалою роботою згладжувальних пристроїв на тяговій підстанції.

На сьогоднішній день на електрифікованих залізницях постійного струму України найбільше розповсюдження має ЕРС з колекторними двигунами постійного струму. Водночас розпочинається впровадження ЕРС з асинхронним приводом, а з урахуванням зусиль України по європейській інтеграції, можливо, розпочнеться експлуатація електровозів подвійного (надалі і багатосистемного) живлення. Таке різноманіття ЕРС, побудованого за різними схемами споживання та перетворення електричної енергії, із застосуванням різного електрообладнання загострює проблему забезпечення якості електричної енергії у СТЕ постійного струму.

Особливістю функціонування СТЕ змінного струму є однофазний характер тягового навантаження та застосування перетворювальних агрегатів низької пульсності, які встановлюються на ЕРС. Істотно на процеси комутації напівпровідникових вентилів впливає індуктивний опір трансформатора електровоза та індуктивний опір кола випрямленого струму. Необхідно також відзначити, що електроенергетичні процеси в СТЕ змінного струму відбуваються в умовах значного індуктивного впливу ліній каналізації електричної енергії.

У порівнянні зі СТЕ постійного струму в системі змінного струму для розрахунку показників якості електроенергії необхідно розглядати більш складну схему заміщення з урахуванням параметрів хвильових процесів у тяговій мережі. Відомо, що хвильові процеси виникають унаслідок накладання коливань, викликаних перехідними процесами, які, в свою чергу, спричинені комутацією напівпровідникових пристроїв перетворювальних агрегатів електровозів.

В науковій літературі сформувалися два основних напрями розрахунку систем тягового електропостачання змінного струму, які є колами змінного несинусоїдного струму з розподіленими нелінійними параметрами [4].

Перший напрям базується на застосуванні модифікованого перетворення Лапласа, який дозволяє отримати результат розрахунку у вигляді рядів Фур'є без застосування формул розкладання. В цьому методі миттєві величини напруги і струму розглядаються як функції двох змінних: координати та часу. Причому, по змінній координат застосовується пряме одностороннє перетворення Лапласа, а по змінній часу – перетворення Лапласа з кінцевими межами. Перше перетворення потребує застосування інтегралу згортки, а друге дозволяє результат розв'язку одразу виразити у вигляді масиву окремих гармонійних складових.

Для цього методу схема заміщення тягової мережі розглядається як коло з розподіленими параметрами зі спрощенням до однорідної двопровідної лінії. У загальному випадку однорідна двопровідна лінія описується системою телеграфних рівнянь, що використовується як вихідна для дослідження перехідних процесів. Перетворення Лапласа застосовується окремо по координатах t та x . Приймається, що p – комплексна змінна, що визначає перетворення у часовій області (координата t), q – по координаті x .

Після врахування певних особливостей та числових математичних перетворень мають місце такі кінцеві формули

$$u(x, t) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=0}^{\infty} \{u(0, p) \operatorname{ch}[\gamma(p)x] - Z_{\text{XB}}(p) i(0, p) \operatorname{sh}[\gamma(p)x] + u_2(x, t)\} e^{pt}; \quad (1)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=0}^{\infty} \{i(0, p) \operatorname{ch}[\gamma(p)x] - Y_{\text{XB}}(p) u(0, p) \operatorname{sh}[\gamma(p)x] + i_2(x, t)\} e^{pt}, \quad (2)$$

де

$$u_2(x, t) = L_0 \int_0^x \operatorname{ch}[\gamma(p)(x-\eta)] i[\eta, (0, \tau)] d\eta - C_0 Z_{\text{XB}}(p) \int_0^x \operatorname{sh}[\gamma(p)(x-\eta)] u[\eta, (0, \tau)] d\eta;$$

$$i_2(x, t) = C_0 \int_0^x \operatorname{ch}[\gamma(p)(x-\eta)] u[\eta, (0, \tau)] d\eta - L_0 Y_{\text{XB}}(p) \int_0^x \operatorname{sh}[\gamma(p)(x-\eta)] i[\eta, (0, \tau)] d\eta;$$

$$p = jk\omega_{\tau} = jk \frac{2\pi}{\tau}, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

$\tau = T$ – інтервал періодизації; T – період основної частоти;

$$u[\eta, (0, \tau)] = u(\eta, 0) - u(\eta, \tau); \quad i[\eta, (0, \tau)] = i(\eta, 0) - i(\eta, \tau);$$

$$u(\eta, 0) = U_{\text{пм}} e^{-\alpha\eta} \cos(-\beta\eta + \psi_{\text{п}}) + U_{\text{вм}} e^{\alpha\eta} \cos(\beta\eta + \psi_{\text{о}});$$

$$i(\eta, 0) = I_{\text{пм}} e^{-\alpha\eta} \cos(-\beta\eta + \psi_{\text{п}}) - I_{\text{вм}} e^{\alpha\eta} \cos(\beta\eta + \psi_{\text{о}});$$

$$u(\eta, \tau) = U_{\text{пм}}^{\tau} e^{-\alpha\eta} \cos(-\beta\eta + \psi_{\text{п}}^{\tau}) + U_{\text{вм}}^{\tau} e^{\alpha\eta} \cos(\beta\eta + \psi_{\text{о}}^{\tau});$$

$$i(\eta, \tau) = I_{\text{пм}}^{\tau} e^{-\alpha\eta} \cos(-\beta\eta + \psi_{\text{п}}^{\tau}) - I_{\text{вм}}^{\tau} e^{\alpha\eta} \cos(\beta\eta + \psi_{\text{о}}^{\tau});$$

$Z_{\text{XB}}(p) = Z_{\text{XB}}(jk\omega_{\tau})$; $Y_{\text{XB}}(p) = 1/Z_{\text{XB}}(p)$ – значення хвильового опору та хвильової провідності на частотах гармонійних складових; $U_{\text{пм}}$, $U_{\text{вм}}$ – амплітуди прямої та відбитої хвиль напруги; $I_{\text{пм}}$, $I_{\text{вм}}$ – амплітуди прямої та відбитої хвиль струму; $\psi_{\text{п}}$, $\psi_{\text{о}}$ – початкові фази прямої та відбитої хвилі.

Вирази (1), (2) являють собою ряди Фур'є в комплексній формі. При числових розрахунках застосовуються ряди з дійсними коефіцієнтами.

Розглянутий вище метод уперше запропоновано доктором технічних наук, професором Омського державного університету шляхів сполучення (ОмДУШС) Зажирко В.М.

Другий напрям базується на визначенні активних та обмінних характеристик пасивного споживача електричної енергії з урахуванням фізичної сутності процесів споживання та обміну електричною енергією в системі тягового електропостачання змінного струму. При такому підході за заданими вхідними залежностями миттєвих струмів і напруги визначаються параметри схеми заміщення та встановлюються залежності зміни цих параметрів у часі, що називаються активними та обмінними характеристиками. Дослідження різноманітних станів електричних кіл та енергетичних процесів, що виникають у цих колах, виконуються із застосуванням миттєвої форми виразів змінних електричних величин.

У разі індуктивного характеру кола, який уявляється послідовним з'єднанням еквівалентного активного та індуктивного елементів, які знаходяться під впливом миттєвих значень напруги $u(t)$ та струму $i(t)$, маємо рівняння вигляду

$$u(t) = r \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = r \cdot i(t) + L \cdot i'(t), \quad (3)$$

або

$$\frac{du(t)}{dt} = u'(t) = r \cdot i'(t) + \frac{dr}{dt} i'(t) \cdot i(t) + \frac{dL}{dt} [i'(t)]^2 + L \cdot i''(t). \quad (4)$$

З цього виразу виходить, що

$$\left. \frac{u'(t)}{i''(t)} \right|_{t=t_1} = L \Big|_{t=t_1} > 0, \quad (5)$$

де t_1 визначається з рівняння $i'(t_1) = 0$.

Для кола з еквівалентним паралельним з'єднанням елементів провідності g та ємності C , величина

$$\left. \frac{u'(t)}{i''(t)} \right|_{t=t_1} < 0. \quad (6)$$

Нерівності (5) та (6) називаються ознаками індуктивного та ємнісного характеру кола відповідно.

Відповідно до вищесказаного, характер будь-якого пасивного двополосника, який задано вхідною миттєвою напругою $u(t)$ та миттєвим струмом $i(t)$, визначає вибір деякої змінної $v(f) = f'(t)/f(t)$, яка необхідна для поділу миттєвого опору $z = u(t)/i(t)$ або миттєвої провідності $y = i(t)/u(t)$ на складові r та x або g та b .

Математичні властивості змінних $v(u)$ та $v(i)$ дозволяють використовувати їх при розгляді різноманітних процесів, які мають місце в колах з реактивними елементами. Для цього використовуються співвідношення, що пов'язують між собою ці змінні величини для складної розгалуженої схеми замикання.

Згідно з визначенням

$$v(u) = \frac{u'(t)}{u(t)} = \frac{[i(t) \cdot z]'}{i(t) \cdot z} = \frac{i'(t) \cdot z + i(t) \cdot z'}{i(t) \cdot z}. \quad (7)$$

Звідки

$$v(u) = v(i) + z'/z = v(i) + v(z). \quad (8)$$

Приймаючи до уваги, що $y = 1/z$, отримаємо також

$$v(i) = v(u) + y'/y = v(u) + v(y). \quad (9)$$

Використовуючи формулу (8), для послідовного з'єднання миттєвих опорів Z запишемо

$$v(u) = v(i) + \frac{z_1' + z_2' + \dots + z_n'}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}, \quad (10)$$

звідки випливає, що

$$zv(u) = z_1v(u_1) + z_2v(u_2) + \dots + z_nv(u_n), \quad (11)$$

де u – напруга на вході кола; u_1, u_2, \dots, u_n – напруги на ділянках z_1, z_2, \dots, z_n .

Для паралельного з'єднання таких елементів, аналогічно отримаємо

$$yv(i) = y_1v(i_1) + y_2v(i_2) + \dots + y_nv(i_n), \quad (12)$$

де i – вхідний струм кола; i_1, i_2, \dots, i_n – струми в паралельних вітках з провідностями y_1, y_2, \dots, y_n .

Формули (11), (12) показують зв'язок між змінними v на вході послідовного чи паралельного кола і тими ж змінними їх окремих ділянок.

Крім того, на роботу електровозів можуть істотно впливати динамічні нестационарні режими мережі, обумовлені вмиканням, вимиканням і зміною режимів роботи даного й сусіднього електровозів, спрацьовуванням апаратів захисту, включенням мотор-компресорів, перемиканням фідерів, підстанцій і ліній електропередачі [5].

Таким чином, у реальних умовах перетворення, розподілу і споживання електроенергії в СТЕ виникають спотворення форми синусоїдального струму і напруги. Ці спотворення виникають при генерації електроенергії, передачі електроенергії по мережах і, головним чином, при споживанні, зв'язаному в основному з перетворенням змінного струму в постійний і навпаки. Головною причиною виникнення спотворень є нелінійні елементи в системі електропередачі і споживання. Джерелами спотворення струмів і напруг у системі електропостачання залізниць є перетворювальні агрегати тягових підстанцій, лінії зовнішнього електропостачання, елементи тяго-

вої мережі, розподільні лінії поздовжнього електропостачання, автоблокування і ДПР, електрорухомий і рухомий склад з імпульсними перетворювачами.

Надійна робота, ефективне використання електроустаткування і електромагнітна сумісність системи електропостачання і суміжних пристроїв багато в чому визначається якістю електричної енергії як на вході тягової підстанції, так і на її виході. Для розгляду питань якості електричної енергії в системах тягового електропостачання електрифікованих залізниць необхідно аналізувати енергетичні процеси, що відбуваються в них за наявності тягового навантаження в різних режимах його роботи і аварійних режимах роботи у взаємозв'язку з режимами роботи інших споживачів та системи зовнішнього електропостачання в умовах виникаючих спотворень та перетоків реактивної потужності.

Принагідно треба відзначити, що досить строге визначення поняття “реактивна потужність” існує тільки для лінійних ланцюгів із синусоїдальними струмами і напругами. Для оцінки енергетичних співвідношень у ланцюгах із синусоїдальними струмами і напругами використовується поняття “миттєва потужність” і її інтегральні характеристики: “активна”, “реактивна” і “повна” потужності, які порівняно точно визначаються і доповнюють одна одну.

Звідси вирішення питань аналізу режимів електричних ланцюгів з нелінійними елементами при несинусоїдальних режимах неможливе без розробки методів розрахунку реактивної потужності, основаних на фізичних процесах. Різноманітність підходів до визначення поняття реактивна потужність в електричних ланцюгах при несинусоїдальних режимах вимагає їх детального аналізу. Слід відзначити, що режим реактивної потужності визначає як якість електроенергії, так і економічність режимів роботи систем електропостачання. Рівень реактивної потужності впливає на відхилення, коливання, несиметрію напруги; режим реактивної потужності нелінійних навантажень позначається на мірі спотворення кривих струмів і напруги. Таким чином, питання режиму реактивної потужності і якості електропостачання виявляються тісно пов'язаними одне з одним [6].

Висновки.

У зв'язку з вищевикладеним, проблема якості електричної енергії в системі тягового електропостачання вимагає розв'язку низки завдань, серед яких можна виділити:

- дослідження якості електричної енергії в точці загального приєднання при різних режимах функціонування навантаження в системі тягового електропостачання;
- оцінка внеску системи тягового електропостачання в показники якості електричної енергії;
- дослідження якості електричної енергії на шинах тягового навантаження при різних режимах функціонування системи тягового електропостачання;
- врахування обмінних процесів, що відбуваються в системах електропостачання за наявності несинусоїдальних джерел і споживачів електричної енергії;
- удосконалення методології розрахунку реактивної потужності та розробка заходів щодо її мінімізації;
- розробка методів розрахунку систем тягового електропостачання з нелінійними та несинусоїдальними елементами;
- розробка та удосконалення засобів підвищення якості електричної енергії у системах тягового електропостачання.

Список літератури

1. Кириленко, О. В. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2001. – С. 87–91.
2. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босій. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
3. Жаркин, А. Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев. – К.: ІЕД НАН України, 2010. – 167 с.
4. Босій, Д. О. Підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму: дис. к.т.н.: 05.22.09 / Д. О. Босій; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Д., 2010. – 165 с.
5. Мамошин, Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока / Р. Р. Мамошин – М.: Транспорт, 1973. – 167 с.
6. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий: монография / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, А. В. Горпинич, В. В. Нестерович. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 294 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Мухомою А.М.