

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Розглянуто актуальні теоретичні та практичні проблеми експлуатації магістральних електричних мереж, вивчення яких виконувались в рамках науково-дослідної роботи «Розробка методів та засобів режимної безпеки електроенергетичних систем та мереж». Наведено отримані результати, показано шляхи подальших досліджень.

Рассмотрены актуальные теоретические и практические проблемы эксплуатации магистральных электрических сетей, изучение которых выполнялось в рамках научно-исследовательской работы «Разработка методов и средств режимной безопасности электроэнергетических систем и сетей». Приведены полученные результаты, намечены пути дальнейших исследований.

При проектуванні й будівництві основних елементів електричної мережі за базовий приймають нормальний усталений режим, при якому техніко-економічні показники її роботи є оптимальними з погляду надійності, якості та ефективності електропостачання. Але електрична мережа є динамічною системою, яка змінюється як у часі (зміна схеми і навантажень), так і в просторі (поява нових елементів у процесі розвитку або реконструкції). У результаті безперервних змін існуючий в мережі усталений режим завжди буде відрізнятися від проектного, тому попередньо прийняті рішення повинні піддаватись постійній корекції для збереження бажаних значень критеріїв оптимальності.

Магістральні лінії електропередачі надвисокої номінальної напруги 330...750 кВ (ЛЕП НВН) є основними системоутворюючими лініями в енергосистемі України і забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій (АЕС), а також необхідний обмін між окремими частинами енергосистеми. Поза тим їх розвиток та ефективна експлуатація є основною передумовою забезпечення інтеграції енергосистеми України в Європейську енергосистему UCTE. Вихід з ладу ЛЕП НВН або обладнання, що забезпечує їх приєднання до енергосистеми, є важкою системною аварією. Вона може спричинювати розпад системи на окремі частини з дефіцитом та надлишком генеруючих потужностей, що вимагатиме відключення споживачів у дефіцитних регіонах та зупинки блоків електростанцій у надлишкових. Зрозуміло, що такий аномальний режим магістральної електричної мережі буде далеким від оптимального і матиме значні відхилення показників якості та ефективності, тому попередження виходу з ладу ЛЕП НВН є важливою науковою та практичною задачею не тільки з точки зору забезпечення безперебійності електропостачання. Вирішенню цієї задачі у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки Національної академії наук України (ІЕД НАНУ) були присвячені дослідження згідно з науково-дослідною темою «Розробка методів та засобів режимної безпеки електроенергетичних систем та мереж».

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання, що трапляється в магістральних електричних мережах, є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги за максимально допустиму згідно з технічним регламентом. Це пояснюється, зокрема, тим фактором, що через велику ціну ізоляції даного класу напруги передбачено порівняно малий її резерв для складових елементів магістральних мереж. В цілому перенапруги поділяють: на короткочасні, які виникають в результаті атмосферних та комутаційних процесів, і тривалі, які обумовлені певним несприятливим поєднанням схеми, параметрів та режиму мережі, що викликає появу резонансних кіл. Резонанс – явище, яке порівняно часто зустрічається в електричних мережах, оскільки в них завжди присутні ємнісні та індуктивні елементи, здатні до коливального обміну енергією. На відміну від комутаційних перенапруг, що з'являються в результаті відключень чи підключень обладнання і тривають соті частки секунди, резонансні вини-

кають непередбачено і можуть існувати порівняно тривалий час [7]. Згідно з нормами Міжнародного стандарту ІЕС-71, резонансні перенапруги мають бути обмежені із застосуванням спеціальних заходів. Ці перенапруги не повинні братись до уваги при визначенні параметрів розрядників та вибору ізоляції, оскільки традиційні захисні заходи не є достатніми для попередження ушкоджень обладнання внаслідок резонансних процесів. Так, якщо резонансні перенапруги досягають рівня спрацювання нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), то ці пристрої виходять з ладу через 10...15 хв, бо розраховані тільки на короточасну дію.

Якщо розглянути складові частини можливих коливальних контурів в електричних мережах, то можна відмітити, що всі ємнісні елементи мають практично лінійну залежність між струмом та напругою. В той же час серед індуктивних елементів трапляються як лінійні (без осердя), так і нелінійні (зі стальним осердям). Відповідно в першому випадку буде спостерігатись резонанс у лінійному колі, яке може бути утворене, зокрема, розподіленою ємністю ЛЕП НВН та лінійними шунтуючими реакторами (ШР) [3]. За статистичними даними енергосистем, серед загальної кількості причин аварійних відключень ліній напругою 750 кВ, переважну більшість складають однофазні короткі замикання (КЗ) – понад 95 %. Частка дугових замикань від загального числа КЗ, тобто замикань, у яких однофазне автоматичне повторне включення (ОАПВ) потенційно може бути успішним, оцінюється до 80 %. Таким чином, застосування ОАПВ здатне запобігти перерві електропостачання по ЛЕП напругою 750 кВ у більшій частині випадків КЗ. Але ОАПВ може супроводжуватись резонансними перенапругами. Відповідні кола утворюються розподіленими ємностями ліній та індуктивностями ШР. Величини розподілених ємностей ЛЕП 750 кВ становлять значні величини, які визначаються довжиною і геометрією ЛЕП: розщепленням фаз, взаємним розташуванням проводів і тросів, висотою підвіски їх над землею, видом транспозиції й ін. Шунтуючі реактори призначені для компенсації зарядної потужності ЛЕП із метою обмеження підвищення напруги в режимі мінімального навантаження ЛЕП, а також зниження перенапруг у динамічних процесах. Зрозуміло, що коли ступінь компенсації ШР зарядної ємності лінії близько 100 %, на відключеній у результаті ОАПВ фазі можуть виникнути значні резонансні перенапруги, амплітуда яких обмежується тільки втратами на корону (на практиці до рівня 1,3...1,4 від робочої напруги). Це стає причиною спрацювання захисту від підвищення напруги (ЗПН) з наступним відключенням ЛЕП. Оскільки безструмова пауза ОАПВ зазвичай не повинна перевищувати 3 с, спрацювання першого, повільнодіючого ступеня ЗПН (зазвичай уставка 1,1 від робочої напруги) навіть при резонансному підвищенні напруги на відключеній фазі не відбувається. Однак у таких лініях є небезпека трифазного відключення ЛЕП дією другого, швидкодіючого (0,15 с) ступеня ЗПН, уставка якого складає 1,25 від робочої напруги. Тому для ЛЕП зі ступенем компенсації зарядної потужності більшим ніж 80 %, необхідно виконувати перевірку на можливість виникнення перенапруг на відключеній під час ОАПВ фазі. Якщо аналіз аварійного режиму показує, що у ЛЕП НВН з ШР усталена величина напруги на відключеній фазі може досягти 1,2 від робочої і більше, необхідно запровадити спеціальні заходи, що запобігають трифазному відключенню ЛЕП у безструмову паузу ОАПВ після успішного гасіння дуги.

Слід відзначити, що зараз доля дугових замикань у мережах 750 кВ України, для яких ОАПВ є успішним, складає близько 52 %. Це значно менше від теоретичної величини. Головною проблемою, що виникає при використанні ОАПВ ЛЕП НВН, є забезпечення необхідної для його успіху тривалості безструмової паузи та запобігання резонансним перенапругам. Вимоги до тривалості безструмової паузи ОАПВ обумовлені тим, що після відключення аварійної фази з двох сторін, дуга в місці виникнення КЗ продовжує горіти, оскільки отримує підживлення струмом від здорових фаз лінії через розподілені ємності ЛЕП (струм підживлення). Якщо при спробі загасити дугу в місці її горіння відновлюється достатньо велика напруга (відновлювана напруга), обумовлена електростатичними зв'язками зі здоровими фазами, то дуга може виникнути знову, що спричиняє в результаті зростання сумарної тривалості горіння дуги і відповідне зниження ефективності ОАПВ, та погіршення умов динамічної стійкості енергосистем, які об'єднані за допомогою ЛЕП НВН. Струм підживлення під час паузи ОАПВ, як відомо, обумовлений електростатичним і електромагнітним зв'язками між

ушкодженою й робочою фазами лінії. За результатами моделювання режимів ЛЕП НВН виявилось, що при струмах підживлення 50...100 А й більше, характерних для електропередачі 750 кВ, гасіння дуги не може бути досягнуте при безструмових паузах, менших ніж 2,5 с. Тому в ІЕД НАНУ були виконані дослідження та запропоновані спеціальні заходи як для обмеження струму підживлення й величини відновлюваної напруги відновлюється на дуговому проміжку, так і для запобігання резонансним перенапругам [1], з метою вирішення завдання ефективного застосування ОАПВ ВЛ 750 кВ на практиці.

При визначенні струмів підживлення й відновлюваних напруг можна обмежитися розглядом варіантів КЗ на кінцях аварійної фази, як найбільш важких режимів. Пояснюється це тим, що при КЗ в якій-небудь проміжній точці лінії, струми в неушкоджених фазах наводять на ділянках аварійної фази, які розташовані по різні сторони від точки КЗ, компенсуючі одна одну поздовжні електрорушійні сили (ЕРС). Струми підживлення й відновлювана напруга мало залежать від реактивних опорів по прямій і нульовій послідовностях системи, що приймають до лінії, це позначається лише на деякій зміні величин і фаз напруг на шинах відправної й приймальної підстанцій.

Головну роль у підживленні ушкодженої фази відіграють ємнісні зв'язки і їх компенсація. В залежності від довжини ЛЕП НВН, а значить, і робочої ємності лінії, резонанс може спостерігатись при наявності однієї чи двох груп ШР. Для попередження розвитку резонансного процесу необхідно розладнати відповідний контур перед відключенням лінії, змінивши його індуктивність чи ємність. Перший варіант передбачає зміну кількості підключених до ЛЕП НВН ШР або підключення в їх нейтраль спеціального компенсаційного реактора (КР), другий – шунтування ємності ушкодженої фази відносно землі. Включення в нейтраль ШР КР призводить також до різкого зменшення стаціонарної відновлюваної напруги, а отже, і максимального її значення, що виникає в перехідному процесі. Відповідно до цього знижується стаціонарне максимальне значення напруги на контактах вимикача, який здійснює повторне включення аварійної фази. Одночасно розстроюється електростатичний зв'язок між фазами в режимі ОАПВ, оскільки підключення КР еквівалентне введенню додаткових індуктивностей між фазами ліній.

Під час моделювання аномальних режимів досліджувались всі можливі варіанти попередження резонансних перенапруг: встановлення КР, автоматична комутація ШР (АКШ), автоматичне шунтування відключеної фази (АШФ). Результати досліджень вказують на те, що кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, тому вибір визначається конкретними умовами експлуатації ЛЕП НВН. Були визначені характеристики, які необхідно перевіряти при виборі заходу запобігання резонансним перенапругам, та зони, в яких застосування певного заходу має переваги. Найбільш ефективним для більшості ЛЕП 750 кВ України виявилось встановлення КР, оскільки при цьому одночасно вирішуються два завдання: відбувається розладнання резонансного контура, а також обмежується струм підживлення дуги. В той же час дослідження показали також, що при певних поєднаннях параметрів схеми та з урахуванням випадкового характеру зміни навантажень у різні періоди часу, точка резонансу може виявитись на верхній межі можливого діапазону зміни частоти в енергосистемі. Тоді тільки підключенням реактора режим не вдається вивести за нижню межу можливого діапазону зміни частоти, оскільки його індуктивність обмежена величиною перенапруги, яка виникає під час ОАПВ, на самому КР. У такому випадку доцільно перед комутацією застосувати АКШ і тим самим запобігти виникненню резонансних перенапруг. Струм підживлення, а значить, і час безструмової паузи ОАПВ при цьому змінюються в невеликому ступені. Якщо необхідне зменшення струму підживлення, а використання КР неможливе, доцільно відразу після початку безструмової паузи ОАПВ застосовувати АШФ. Для цього необхідним є встановлення додаткового вимикача з роз'єднувачами та ОПН, а також відповідне перепрограмування алгоритмів роботи систем релейного захисту та протиаварійної автоматики.

Практична реалізація схем з КР залежить у першу чергу від величини напруги промислової частоти, що впливає на ізоляцію нейтральних виводів ШР від моменту виникнення КЗ до моменту повторного включення. У цей період виникаюча напруга не повинна перевищити

рівень ізоляції нейтральних виводів. Від виникнення несиметричного КЗ до відключення лінійних вимикачів на КР впливає напруга промислової частоти, величина якої визначається співвідношенням реактансів ШР і КР, а також, у меншому ступені, співвідношенням параметрів систем по прямій і нульовій послідовностях. Нейтральний вивід стандартного ШР 750 кВ має клас ізоляції 35 кВ. Стала напруга не перевищує однохвилинної іспитової напруги виводу (85 кВ), впливає на ізоляцію протягом паузи ОАПВ, тобто протягом 1...2 с і, отже, небезпеки не представляє. На КР впливають також комутаційні перенапруги, що виникають як при роботі вимикачів під час усього циклу ОАПВ, так і при інших комутаціях. Якщо в циклі ОАПВ комутаційні перенапруги не перевищують припустимих значень для ізоляції класу 35 кВ, то при деяких інших комутаціях перенапруги, що впливають на компенсаційний реактор, вимагають примусового обмеження. Розрахунки показали, що максимальні перенапруги (до 195 кВ) мають місце при неповнофазному включенні лінії. Тим часом, короткочасна (протягом 0,01...0,03 с) максимальна міцність ізоляції нейтрального виводу ШР близька до 145 кВ. Тому заслуговує на увагу використання КР підвищеної потужності та виконання ізоляції як нейтрального виводу ШР, так і самого КР на напругу 110 кВ. Хоча вартість такого реактора буде більшою, ніж у тих, що встановлюють в енергосистемі України зараз, але його можна тримати під напругою весь час, оскільки при нормальному симетричному режимі ЛЕП НВН підключення КР не впливає на параметри режиму. Слід відзначити, що відмова від комутаційних апаратів не тільки дозволить зекономити на їх вартості, а й спростить алгоритм роботи засобів релейного захисту і підвищить надійність роботи ЛЕП НВН.

Попередні результати виконаних в ІЕД НАНУ досліджень режимів ОАПВ були впроваджені під час реконструкції підстанції ПС 750 кВ Західноукраїнська, яка проводилась з метою забезпечення можливості переведення на проектну напругу 750 кВ повітряної ЛЕП НВН „Рівненська АЕС – ПС Західноукраїнська 750” та створення умов для надійної видачі потужності Рівненської АЕС після введення на ній четвертого енергоблока. Підстанція Західноукраїнська розташована в Жидачівському районі Львівської області, має безпосередні електричні зв'язки на напрузі 750 і 330 кВ з Рівненською і Хмельницькою АЕС, Бурштинською тепловою електростанцією, Вінницьким (ПС Вінницька 750), Рівненським (ПС Радивилівська 330) та Львівським (ПС Львів – Південна 330) енерговузлами, а також з енергосистемою Угорщини (ПС Альбертірша 750). Лінія довжиною 282 км була збудована в габаритах 750 кВ і в 1986 році введена в дію на напрузі 330 кВ. Для її переведення на напругу 750 кВ і забезпечення передачі електроенергії необхідно було забезпечити надійне функціонування ОАПВ, оскільки трифазне відключення спричиняє необхідність зупинки четвертого блока Рівненської АЕС з відповідними наслідками. Результати досліджень склали основу технічних умов на виготовлення КР, за якими реактори були побудовані на ВАТ «Запоріжтрансформатор» та встановлені на ПС Західноукраїнська 750 і Рівненській АЕС. Успішна експлуатація обладнання підтвердила достовірність результатів виконаних досліджень та ефективність їх реалізації.

Часом у магістральних мережах спостерігаються резонансні процеси на частотах, що відрізняються від основної. Як показали дослідження, при цьому резонансне коло утворюють лінійні ємність та індуктивність, а нелінійна індуктивність є джерелом ЕРС з частотами гармонійних складових. Зокрема, під дією змінного магнітного поля робочої частоти магнітна проникність сталі, з якої виготовлено осердя трансформатора, буде змінюватись періодично з основною частотою. Таким чином, трансформатор є змінною індуктивністю, в якій можливе так зване параметричне збудження коливань. Відповідна ЕРС прикладається до лінійного резонансного кола, що утворене ШР та розподіленими ємностями ЛЕП. На практиці гармонійний резонанс також може викликати перенапруги, і через те повинна виконуватись перевірка наявності необхідних і достатніх умов його виникнення як під час проектування, так і експлуатації ЛЕП. Аналіз наявної інформації показав, що для магістральних мереж України доводиться рахуватися перш за все з можливістю збудження другої гармонійної складової в ЛЕП НВН порівняно великої довжини.

Виконані в ІЕД НАНУ дослідження процесів в існуючих ЛЕП 750 кВ магістральних електричних мереж України показали наявність достатніх умов виникнення резонансу на

другій гармонійній складовій, зокрема, для ЛЕП 750 кВ Хмельницька АЕС – Жешув (Польща). Ця лінія зараз не експлуатується, але за планами посилення міждержавних зв'язків з метою інтеграції з USTE на ній проектується побудова трьох модулів вставок постійного струму, що дасть можливість збільшити експорт електроенергії до європейських країн на 600 МВт. Моделювання процесів у цій лінії показало, що для попередження перенапруг на частоті другої гармонійної складової необхідно виконати розладнання резонансного контура шляхом зміни потужності встановлених ШПР.

Виконана реконструкція ЛЕП НВН 750 кВ Західноукраїнська значно підвищила надійність електропостачання відповідальних енерговузлів та ефективність роботи системи в цілому. На перспективу до 2030 року в ОЕС України зберігається стратегія розвитку основних електричних мереж, відповідно до якої системоутворюючі функції видачі потужності електростанцій та забезпечення паралельної роботи з енергосистемами інших країн залишаються за мережами 330...750 кВ з послідовним зростанням ролі мережі 750 кВ. Розвиток мереж 330...750 кВ здійснюється шляхом спорудження ЛЕП НВН для утворення нових та підсилення діючих системоутворюючих зв'язків як усередині окремих енергетичних районів, так і між регіонами та енергосистемами інших країн; видачі потужності діючих електростанцій та електростанцій, що споруджуються та розширюються; забезпечення надійного електропостачання потужних вузлів електроспоживання. Передбачається спорудження об'єктів, що забезпечують видачу потужності електростанцій, формування системоутворюючої мережі ОЕС України для передачі потужності із надлишкових західних регіонів країни у дефіцитні центральний та східний регіони, посилення міждержавних зв'язків з метою інтеграції з USTE та збільшення експортних поставок електроенергії, переведення електропостачання півдня Одеської області від Молдовської енергосистеми на генеруючі джерела ОЕС України, підвищення надійності електропостачання Кримського, Київського, Карпатського регіонів та Східного Донбасу. Крім того, для забезпечення можливості паралельної роботи ОЕС України з енергетичним об'єднанням країн Європи, з метою поліпшення стандартів роботи ОЕС України і поступового приведення їх до вимог USTE, необхідно виконати значний обсяг організаційно-технічних заходів, спрямованих на модернізацію та розвиток всієї енергосистеми, створити системні комплекси протиаварійної автоматики. У наступних періодах для забезпечення сталої роботи ОЕС України, ефективного використання потужностей електростанцій України, дотримання нормативних умов видачі потужності Хмельницької, Рівненської, Запорізької атомних електростанцій та регулюючих потужностей гідроакumuлюючих електростанцій, зокрема, Дністровської, необхідно завершити формування двох транзитних магістралей напругою 750 кВ – південної (Хмельницька АЕС – Дністровська ГАЕС – Приморська – Каховська – Запорізька АЕС загальною довжиною ліній до 1050 км та трансформаторною потужністю підстанцій Приморська та Каховська – 4000 МВА) та північної (Рівненська АЕС – Київська – Північноукраїнська – Харківська – Донбаська, загальна довжина ліній якої 1200 км, з трансформаторною потужністю підстанцій Київська та Харківська – 4000 МВА). Введення в експлуатацію цих магістралей створить необхідні умови для паралельної роботи ОЕС України з енергосистемою USTE та значного збільшення експорту електроенергії, що відповідає довгостроковим завданням зовнішньої політики щодо інтеграції України до Європейського Союзу.

В ІЕД НАНУ послідовно виконуються дослідження можливих аномальних режимів ЛЕП НВН, що проектуються й будуються НЕК «Укренерго». Так, були досліджені режими ОАПВ та можливість виникнення резонансу на другій гармоніці для ЛЕП «ПС Вінницька 750 – ПС Київська 750» та ««ПС Чорнобильська 750 – ПС Київська 750», що дало змогу ввести в експлуатацію ПС Київська 750. Зараз аналогічні роботи виконуються для ЛЕП НВН «Рівненська АЕС – ПС Київська 750», «ПС Північноукраїнська 750 – ПС Київська 750», «Хмельницька АЕС – ПС Київська 750», «Запорізька АЕС – ПС Каховська 750». Отримані теоретичні та практичні результати забезпечують успішне розв'язання розглянутих вище проблем у функціонуванні магістральних мереж при введенні нових ЛЕП НВН в експлуатацію.

Найбільш складними як для попередження, так і виявлення в магістральних електричних мережах є процеси, зумовлені явищем насичення сталюого осердя в індуктивностях, що входять в резонансне коло, яке через те й називають ферорезонансним. Головні відмінності ферорезонансного кола від лінійних, які були розглянуті попередньо: можливість виникнення резонансних коливань у широкому діапазоні зміни ємності; частота коливань напруги та струму, яка може відрізнятись від частоти синусоїдального джерела ЕРС; існування декількох стабільних усталених режимів для даної схеми та значень параметрів (один з цих режимів є очікуваним "нормальним" з лінійними характеристиками, у той же час як інші – аномальними, параметри яких часто становлять небезпеку для обладнання) [5]. Але й актуальність створення адекватних методів досліджень таких складних процесів зростає, оскільки ймовірність виникнення ферорезонансу в електричних мережах останнім часом безупинно збільшується. Серед факторів, що обумовлюють небажаний розвиток подій, можна відзначити: появу та розповсюдження кабельних мереж високої напруги; впровадження сучасних силових трансформаторів з малими втратами (що одночасно збільшує загрозу появи нетрадиційних ферорезонансів); зростання питомої ваги в розподільчих пристроях (РП) ПС сучасної компактної комутуючої апаратури на елегазі. Тому, як при проектуванні нових електричних мереж, так і при модернізації існуючих, необхідно звертати особливу увагу на можливість появи ферорезонансу, що й зумовило розвиток відповідних досліджень в ІЕД НАНУ.

Аналіз ферорезонансних схем виконується на основі моделі перехідних й усталених процесів мережі, структура якої визначається системою нелінійних диференціальних рівнянь стану електричних і магнітних кіл. Основною проблемою при складанні рівнянь елементів розрахункової схеми заміщення є математичне представлення нелінійних елементів (наприклад, з застосуванням аналітичної апроксимації їх характеристик). До таких елементів у даному випадку відносяться нелінійні індуктивності магнітопроводів трансформаторів з сталі [2]. У загальному вигляді аналіз ферорезонансних схем складається з таких етапів:

- за допомогою розрахункової схеми заміщення записується вихідна система нелінійних диференціальних рівнянь стану за першим і другим законами Кірхгофа для електричного і магнітного кіл;
- на наступному етапі здійснюється вибір змінних стану та перетворення вихідної системи рівнянь у нормальну форму Коші. Вибір змінних стану виконується за умовою відповідності його правилам комутації й одержання найбільш простого математичного запису для рівнянь стану;
- виконується рішення рівнянь стану методами чисельного інтегрування.

Розрахунок перехідного процесу передбачає визначення початкових умов для змінних стану. Ферорезонансні схеми виникають при різних комутаціях. У найпростішому випадку, коли коло, що досліджується, було відключене від мережі, початкові умови будуть нульовими. В інших випадках, наприклад, для ферорезонансних схем РП 110-500 кВ із вимикачами, на яких встановлені ємнісні дільники, та електромагнітними трансформаторами напруги (ТН), перед комутацією до шин ПС прикладена робоча напруга. Тоді, використовуючи модель трансформатора як нелінійного елемента, можна визначити струм через обмотку вищої напруги (ВН) до комутації. Система диференціальних рівнянь стану у формі Коші і рівняння для струмів та напруг в обмотці ВН ТН будуть кінцевою формою математичної моделі ферорезонансної схеми в даному випадку. Пошук окремих розв'язків, що відповідають стабільним усталеним режимам, можливо виконати за допомогою покрокового руху в просторі часу, починаючи з довільної точки. Тобто задачу аналізу режиму в ферорезонансному колі доцільно розглядати як двоточкову крайову задачу для моделювання як перехідного процесу, так і усталеного стану. Відомо, що диференціальне рівняння такого типу не може бути виражене через елементарні функції. Тому попередніми дослідниками було запропоновано ряд графічних та спрощених аналітичних методів аналізу ферорезонансу, які в кращому випадку дають опис якісної сторони процесу. Не змінили радикально ситуацію й поява та швидкий розвиток обчислювальної техніки, хоча практика застосування методів чисельного аналізу диференціальних рівнянь й давала надію на отримання результатів, що достовірно відтворюють кількісну сторону явища в умовах конкретної електричної мережі. Зокрема, деякі до-

слідники використовують для вивчення ферорезонансу програмне забезпечення, орієнтоване на аналіз перехідних процесів в електричних колах (наприклад, відомий пакет програм ЕМТР). Такий підхід не є цілком коректним, оскільки досліджуваний процес належить до класу параметричних резонансів, коли один з параметрів поступово налагоджується під зовнішню силу, а тому перехідний процес може тривати сотні періодів, і непростою задачею є навіть визначення моменту його закінчення. Як наслідок, програми типу ЕМРТ можуть бути використані тільки у випадках жорсткого ферорезонансу з малим перехідним періодом, а також для верифікації окремих результатів, отриманих іншими методами. Навіть подальше підвищення швидкодії обчислювальних машин з відповідним зростанням періоду часу, на якому можна виконати моделювання перехідного процесу в реальній мережі з заданою точністю, не зможе дати гарантованих відповідей при аналізі ферорезонансів, оскільки головна причина невизначеності результатів у іншому – у наявності нелінійних осциляторів.

Електромагнітні процеси в електричних мережах мають властивість передбачуваності, тобто характеризуються як динамічні системи: існує однозначний перехід від реального процесу до його математичної моделі. Динамічна система, миттєвий стан якої задається двома величинами, узагальненою координатою x та її похідною, визначає нелінійний дисипативний осцилятор. Поведінка ферорезонансного кола повністю відповідає даному класу осциляторів (узагальненою координатою є поточне значення, дисипація відбувається в активній провідності, а джерело ЕРС характеризує вплив системи на процеси в даній електричній мережі). Але саме зовнішня сила перетворює нелінійний осцилятор у неавтономну систему, яка може демонструвати складну динаміку й перехід до хаосу.

У математиці хаос визначають як крайню непередбачуваність постійного нелінійного й нерегулярного складного руху, що виникає в динамічній системі. Слід зазначити, що цей хаос, незважаючи на властивість непередбачуваності, характеризує невинуваті процеси. Більше того, він динамічно детермінований, оскільки підкоряється своїм закономірностям. По суті, якщо розв'язок рівняння обмежений, але не є стабільним або періодичним, його класифікують як хаотичний. Непередбачуваність хаосу пояснюється в основному саме істотною залежністю від початкових умов. Один з головних висновків теорії хаосу полягає в наступному – майбутнє пророчити неможливо, тому що завжди будуть помилки вимірювання, породжені в тому числі незнанням всіх факторів і умов, а малі зміни або помилки можуть породжувати великі наслідки. Характерною властивістю хаотичної поведінки є експонентне нагромадження помилки. Відповідно до квантової механіки початкові умови завжди невизначені, а відповідно до теорії хаосу – ці невизначеності будуть швидко наростати й перевищать припустимі межі передбачуваності. Тому другий висновок теорії хаосу – вірогідність результатів залежно від часу швидко зменшується.

Відомо, що в нелінійних дисипативних динамічних системах, які знаходяться під дією періодичної сили, можливі три типи реакції: періодична, квазіперіодична та хаотична. Таким чином, в електричному ферорезонансному колі можна очікувати на появу таких коливань: періодичних (як на основній частоті, так і на частотах вищих та нижчих гармонійних складових); коливань з нестабільним періодом; повністю хаотичних коливань. Причому в двох останніх випадках у спектрі коливань присутні гармонійні складові, які не є кратними основній частоті, і саме тому за критерій початку ферорезонансу доцільно вибрати ступінь загального спотворення синусоїди основної частоти, а не перевищення вмісту якоїсь певної гармонійної складової. Найбільш небезпечним для обладнання електричних мереж є періодичний ферорезонанс на основній частоті, оскільки при цьому коливанням максимально передається енергія джерела. Це підтверджується й досвідом експлуатації. Інші типи коливань також можуть стати причиною ушкоджень, але частіше за все спричиняють відмови засобів релейного захисту та автоматики. Тому загроза їх появи також повинна бути виявлена й попереджена. З цією метою запропоновано використовувати метод продовжень, що дозволило визначити як впливає зміна одного з параметрів режиму чи схеми на можливість існування усталеного ферорезонансу.

Вивчення особливості поведінки окремих розв'язків при зміні параметрів системи базується на принципах теорії якісного дослідження диференціальних рівнянь. Одним з основних питань цієї теорії є питання про стійкість рішення, або руху системи, якщо рівняння трактувати як модель фізичної системи. Метод продовжень передбачає аналіз стійкості окремого розв'язку рівняння при відхиленнях досліджуваного параметра (без необхідності виконання обчислень у часовому просторі). У результаті отримуємо інтервали зміни параметра, в яких можливе виникнення та існування ферорезонансного процесу певного типу. Границі інтервалів є точками біфуркацій. Взагалі теорія біфуркації довела свою ефективність при вивченні нелінійних динамічних систем як адекватний математичний інструмент. Поводження таких систем описується діаграмами біфуркацій які, у міру зростання керуючого параметра, дають послідовність розгалужень. У таких точках відбувається зміна типу ферорезонансу. Виявити точки біфуркації можна за критеріями стійкості згідно з Ляпуновим, що передбачає дослідження про те, як змінюється частинний розв'язок нелінійного рівняння при малих відхиленнях параметру, вплив якого вивчається. Ознакою стійкості частинного розв'язку є те, що всі множники Флоке будуть за модулем менші одиниці, тобто перехідні процеси на всіх осях будуть згасаючі. Якщо ж при дослідженні множник Флоке вийде за межі $+1$, то в цій точці ферорезонансний процес змінює свій характер в результаті тангенціальної біфуркації. Також про наявність біфуркації свідчить поява множника Флоке, який вийде за межі -1 , але це буде біфуркація іншого типу – подвоєння періоду. І, нарешті, коли з'являється пара спряжених комплексних множників, модулі яких перевищують одиницю, то це відповідає біфуркації Хопфа (ферорезонанс з періодичного стає квазіперіодичним).

Оцінка вірогідності запропонованої математичної моделі ферорезонансних схем РП із трансформаторами напруги і повітряними вимикачами, які містять ємнісні дільники напруги, була виконана шляхом зіставлення експериментальних осцилограм струму та напруги на ВН ТН при протіканні ферорезонансних процесів у реальній мережі, отриманих, наприклад, за допомогою реєстратора РЕГНА, з залежностями струму та напруги від часу, які були отримані в результаті моделювання. Також перевірялась відповідність місць ушкодження ТН, зареєстрованих у магістральних електричних мережах, з зонами небезпечних параметрів ферорезонансних схем. Отримані результати стали основою для розробки нормативного документу Мінпаливенерго України, який впроваджений в дію [4].

Реалізація розробленого спеціалізованого програмного забезпечення [6], що є додатком до [4], дозволяє краще зрозуміти фізичну картину процесів та причини появи аномальних режимів, дослідити наявність необхідних і достатніх умов існування ферорезонансів. Так, перевірка необхідних умов існування ферорезонансних процесів при експлуатаційній постановці задачі передбачає дослідження методом продовжень залежності режимів від ємності дільників, ємності шин, втрат в активній провідності. Початкові умови (початковий заряд конденсатора, залишковий потік в осерді трансформатора, момент комутації) визначають, яким в результаті буде усталений режим. Аналіз повинен бути виконаний для всіх можливих конфігурацій електричної мережі з урахуванням не тільки нормальних, але й аварійних, післяаварійних і ремонтних схем. При цьому слід враховувати роботу засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики. Виконання цього етапу забезпечує перевірку необхідних умов для розвитку ферорезонансного процесу. Перевірка достатніх умов передбачає аналіз можливості виникнення в мережі подій, що можуть ініціювати ферорезонанс: підключення трансформатора, відключення лінії електропередачі (у тому числі неповнофазні), падіння навантаження, атмосферні і комутаційні перенапруги та інші відхилення від нормального режиму.

На практиці при виявленні небезпеки виникнення ферорезонансного процесу в електричній мережі повинні бути впроваджені заходи щодо його попередження. Зокрема, в ІЕД НАНУ були запропоновані, досліджені та рекомендовані для використання на практиці такі засоби: виключення можливості утворення ферорезонансного контура; розладнання ферорезонансного контура, що утворюється джерелом живлення, ємностями та індуктивностями; зниження добротності ферорезонансного контура включенням у нього резистора; ведення в ферорезонансний контур стороннього джерела електричної енергії для виведення феромагнітного осердя з стану насичення; використання захисного відключення. Три останніх заходи

зумовили розробку спеціальних захисних пристроїв, які мають датчики початку ферорезонансу, логічні схеми та системи керування комутаційними апаратами або елементами корекції, що підключаються до існуючих елементів мережі. Зважаючи на принципову неможливість точного прогнозування розвитку ферорезонансного процесу, вживання захисних пристроїв визнано найбільш універсальним і ефективним заходом.

При подальших теоретичних дослідженнях аномальних режимів у магістральних мережах особливу увагу буде приділено нетиповим резонансним процесам, які хоч безпосередньо не викликають ушкодження основного обладнання, оскільки напруги та струми не досягають критичних значень, але зумовлюють неправильну дію засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики, а також систем автоматизованої діагностики та керування режимами, що впроваджуються в сучасних мережах. Це стосується перш за все лінійних резонансів на частотах субгармонійних та ультрагармонійних складових, а також квазіперіодичних та хаотичних ферорезонансів.

1. *Боровик Ю.М.* Дослідження резонансних процесів у ЛЕП надвисокої напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – №2(20). – С. 26.
2. *Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю.* Моделювання трансформатора напруги при ферорезонансних процесах // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська Політехніка". – 2007. – № 596. – С. 127–131.
3. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Боровик Ю.М., Яндульский А.С.* Моделирование ОАПВ в линии электропередачи 750 кВ // Problemy Electroenergetyki. Materialy V Miedzynarodowego Seminarium (Lodz 11-12 czerwca 2007) – Lodz: Instytut Electroenergetyki. – S. 57–66.
4. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шидловський А.К., Гаїмов А.М., Дмитрієв Є.В.* Виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги та запобігання їм: Методичні вказівки // Затверджено Мінпаливенерго. Наказ №536 від 4.11.2008р -ДП НЕК Укренерго. – 52 с.
5. *Тугай Ю. І.* Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: НУ «Львівська Політехніка». – 2007. – Вип. 596. – С.132–136.
6. *Тугай Ю.І.* Програмне забезпечення для аналізу ферорезонансних процесів в електричних мережах з заземленою нейтраллю // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – №2(20). – С. 27.
7. *Тугай Ю.І.* Резонансні процеси в електричних мережах високої напруги // Пр. конф. «Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики» (Київ, 2008), Київ: «Політехніка», 2008. – С. 193–196.

№ 15. ВІДДІЛ ТРАНЗИСТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

УДК 621.314

**О.М. Юрченко, М.М. Юрченко, В.Я. Гуцалюк,
В.О. Павловський, Ю.О. Твердохліб, П.Ю. Герасименко**

ВИСОКОЧАСТОТНІ ТРАНЗИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

Представлено результати досліджень за останній рік з трьох основних напрямків наукової діяльності співробітників відділу транзисторних перетворювачів (№ 15), а саме: розробка та дослідження високочастотних високовольтних пристроїв для бортових електронно-променевих технологічних установок; розробка та дослідження високочастотних транзисторних перетворювачів для установок індукційних технологій; дослідження електромагнітної сумісності систем електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами.

Представлены результаты исследований за последний год по трем направлениям научной деятельности сотрудников отдела транзисторных преобразователей (№ 15), а именно: разработка и исследование высокочастотных высоковольтных устройств для бортовых электронно-лучевых установок; разработка и исследование высокочастотных транзисторных преобразователей для установок индукционных технологий; ис-

1. Розробка принципів побудови систем електроживлення бортових електронно-променевих технологічних установок

Використання сучасної елементної бази з метою досягнення граничних характеристик високочастотних транзисторних перетворювачів (ВТП) для технологічного устаткування як наземних, так і тих, що експлуатуються у навіолоземному просторі, вимагає вивчення електромагнітних процесів у них з урахуванням специфіки режимів енергоперетворення та керування.

Одним із важливих принципів побудови таких ВТП є принцип перетворення електроенергії на високій частоті (20...1000 кГц), який дає змогу не тільки поліпшувати масогабаритні показники цих пристроїв, а й здійснювати якісні зміни у технологічних процесах. Висока частота перетворення дає можливість досягти потрібних динамічних характеристик систем електроживлення (СЕЖ), тобто забезпечувати високу швидкодію у керуванні вихідними вольт-амперними характеристиками СЕЖ і тим самим здійснювати повну керованість, яку вимагають фази технологічних процесів.

Створення сучасних СЕЖ вимагає розробки нових принципів конструювання, зокрема побудови силових перетворювальних каскадів у вигляді модулів на основі паралельного з'єднання комірок. Кожна комірка має у своєму складі різноманітні елементи – транзистор, діод, конденсатор або набір конденсаторів та запобіжник. При цьому важливою задачею, яка вирішувалась, є зниження комутаційних перенапруг на транзисторах при великій швидкості їх перемикання та незалежність від індуктивностей з'єднувальних провідників між комірками та загальних з'єднувальних провідників.

На основі цих модулів були створені СЕЖ для бортової електронно-променевої технологічної установки (БЕПТУ) [5, 8]. Особливістю цих СЕЖ є перетворення бортової напруги (23..34 В) постійного струму у високу постійну напругу близько 10 кВ з потужністю декілька кіловат. Ця СЕЖ складається з двох блоків – високочастотного транзисторного перетворювача та високочастотного високовольтного пристрою (ВВП). Для надійної роботи БЕПТУ СЕЖ повинна відповідати одночасно як електричним вимогам, що забезпечують технологічний процес, так і загальним вимогам щодо бортової апаратури. Така СЕЖ використовувалась для зварювання, паяння, різання та напилення металів на борту автономних об'єктів.

У зв'язку з особливостями експлуатації дуже важливою характеристикою ВВП є жорсткість його вихідної характеристики. В умовах ускладненого охолодження, що має місце під час роботи бортової апаратури, значно зростає значення такого важливого параметру, як надійність. Виходячи з цього, основними вимогами при побудові ВВП для БЕПТУ є:

- забезпечення жорсткості вихідної характеристики у широкому діапазоні зміни навантаження (від холостого ходу до максимального навантаження);
- забезпечення необхідної надійності ВВП.

Частково ці питання розглянуті у роботах [2, 3, 4, 5]. Однак аналіз надійності ВВП БЕПТУ представляє собою більш складну задачу. Особливо це стосується кіл, які містять високочастотні високовольтні трансформатори (ВВТ). Виникає необхідність забезпечити електричну міцність конструкції, безпеку експлуатації та врахувати електромагнітні процеси у пристроях перетворення рівня напруги, а також наявність високої напруженості електричного поля, яка призводить до погіршення електромагнітної сумісності.

Відомо, що застосування методу глибокого секціонування дає змогу досягти високої надійності схемотехнічної частини ВВП при заданому ресурсі роботи [3, 4, 7]. Тому, з практичної точки зору, надійність ВВП може визначатися станом електричної ізоляції ВВТ.

У процесі експлуатації старіння електричної ізоляції значно прискорюється при одночасній дії двох або більше факторів, внаслідок їх взаємного впливу. Разом з тим механізми старіння ізоляції до цього часу достатньо ще не вивчені, тому надійним способом збільшення ресурсу роботи ВВП є ретельне проектування та зменшення впливу згаданих факторів на виготовлення ВВТ. Послаблення дії принаймні одного з них буде сприяти багаторазовому збільшенню ресурсу роботи ВВП.

Одним із основних вузлів ВВП є ВВТ, який створює великі щільності магнітних та електричних полів, які впливають на навколишнє середовище, особливо на власні кола та інші пристрої. Враховуючи, що у високовольтному трансформаторі ВВП вторинна обмотка розбита на n секцій, що споряджені власними випрямлячами та фільтрами, напруга, яка наводиться на зажимах приймача, буде дорівнювати сумі напруг, наведених на кожній із n обмоток, що мають в n раз меншу ЕРС.

Якщо припустити, що ємнісний опір (\dot{X}) між ВВТ та елементами схеми у стільки ж разів більший повного опору (\dot{Z}) між елементами схеми та корпусом ($\dot{X} \gg \dot{Z}$), тоді напруга, яка наводиться між ВВТ та елементами схеми, буде приблизно в n раз меншою напруги, яка наводиться на тому ж приймачі ВВТ. У такому разі можна зробити висновок, що застосування способу підсумовування випрямляючих напруг дає змогу суттєво покращити електромагнітну сумісність ВВП.

Загальна безвідмовність роботи ВВП БЕПТУ може бути значно підвищена при застосуванні більш сучасних комплектуючих елементів, що мають кращі масогабаритні, частотні та інші експлуатаційні параметри.

Щодо подальшого дослідження розглянутих питань та їх доцільності, необхідно зробити достатньо широке коло різних системних випробувань ВВП у СЕЖ, які могли б забезпечити високу надійність бортової апаратури, в яку вони входять.

2. Транзисторні інвертори напруги для установок індукційного нагрівання з НЧ імпульсною модуляцією

У рамках робіт, спрямованих на розвиток теорії та принципів побудови високочастотних транзисторних перетворювачів для технологічного устаткування індукційного нагрівання, проводились дослідження режимів роботи високочастотних транзисторних інверторів з послідовним резонансним контуром на виході та розробка ефективних способів регулювання вихідного струму при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження.

Використання транзисторних перетворювачів частотою 10...440 кГц замість широко розповсюджених лампових генераторів є одним із енергозберігаючих заходів у галузі високочастотних індукційних технологій. Це дає змогу зменшити споживання електричної енергії на 35...45 %, відмовитись від водяного охолодження, зменшити у кілька разів масу, габарити і відповідно матеріалоемність обладнання, збільшити ресурс роботи за рахунок відмови від електровакуумних приладів. Круг технологічних задач дуже широкий (плавлення, паяння, нагрівання, загартування та інше), а серійне виробництво таких перетворювачів в Україні не налагоджено. Тому ця тематика є актуальною та перспективною.

Для забезпечення технологічних режимів необхідно здійснювати регулювання і стабілізацію вихідного струму чи потужності. Використання структурної схеми, яка складається з некерованого випрямляча напруги трифазної мережі живлення та інвертора напруги, в якому регулюється вихідний струм, дає змогу суттєво спростити силову частину перетворювача, тим самим знизити собівартість та підвищити надійність. Існують різні способи регулювання та стабілізації вихідного струму транзисторного інвертора, такі як частотне регулювання, регулювання з використанням імпульсної та НЧ імпульсної модуляції, а також різні їх комбінації. Дослідження можливості використання способів НЧ імпульсної модуляції для подібного застосування недостатньо представлені в публікаціях.

Практично нульові динамічні втрати потужності є значною перевагою інверторів з НЧ регулюванням порівняно зі способами регулювання на основній частоті [1]. Нульові втрати потужності досягаються за рахунок перемикання транзисторів при струмі, близькому до нуля, що відповідає режиму роботи на частоті, близькій до резонансної. Для забезпечення цього використовується система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ).

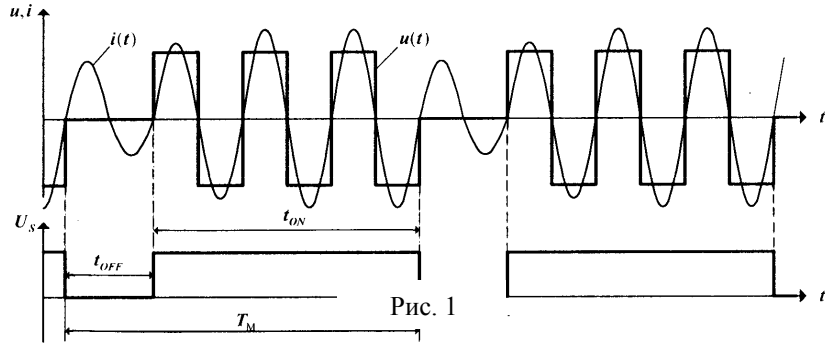
На рис. 1 наведені діаграми вихідних напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ інвертора та напруги керування u_S при НЧ імпульсній модуляції. При НЧ модуляції час модуляції T_M , час ввімк-

неного стану t_{ON} та час вимкненого стану t_{OFF} зручно характеризувати цілими числами, що кратні періоду вихідної напруги інвертора T_0 :

$$T_M = sT_0, \quad t_{ON} = mT_0, \quad t_{OFF} = nT_0, \quad (1)$$

де $n = s - m$ – кількість періодів за час вимкненого стану t_{OFF} ; m – кількість періодів за час ввімкненого стану t_{ON} ; s – кількість періодів T_0 за час модуляції T_M .

При високих добротностях Q можна знехтувати вищими гармоніками у вихідній напрузі інвертора. Це дає змогу суттєво спростити аналіз та отримати вирази у аналітичному вигляді. В результаті аналізу отримано вирази для вихідного струму інвертора в усталеному режимі, які дозволяють проводити аналіз при різних комбінаціях n, s, m . Аналіз показав, що швидкість зростання та спаду амплітуди струму визначається постійною часу $\tau = \frac{2L}{R} = \frac{QT_0}{\pi}$, яка збільшується при збільшенні згаданої вище добротності.



Середнє за модулем значення струму $I_{сеп}$, максимальне $I_{a \max}$, мінімальне $I_{a \min}$ значення амплітуди

струму та різниця між максимальним та мінімальним значеннями амплітуди струму ΔI_a можна визначити спрощеними виразами:

$$I_{сеп} = \frac{2U_{m(1)}\gamma}{\pi R}; \quad (2)$$

$$I_{a \max} = \frac{U_{m(1)}}{R} \left[1 - \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}n}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} e^{-\frac{\pi}{Q}\left(s-n-\frac{1}{4}\right)} \right]; \quad (3)$$

$$I_{a \min} = \frac{U_{m(1)}}{R} \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}(s-n)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} e^{-\frac{\pi}{Q}\left(n-\frac{1}{4}\right)}; \quad (4)$$

$$\Delta I_a = \frac{U_{m(1)}}{R} \left[1 - \frac{e^{-\frac{\pi}{Q}(s-n)} - 2e^{-\frac{\pi}{Q}s} + e^{-\frac{\pi}{Q}n}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} e^{\frac{\pi}{4Q}} \right]; \quad (5)$$

де $U_{m(1)}$ – амплітуда першої гармоніки напруги інвертора після трансформатора; $\gamma = \frac{t_{ON}}{T_M} = \frac{m}{s}$ – коефіцієнт заповнення модульованої напруги.

На практиці впродовж технологічного циклу активний опір навантаження може як збільшуватись, що характерно для немагнітних матеріалів, так і зменшуватись, що відповідає процесу нагрівання магнітних матеріалів. Також змінюється L , хоч і меншою мірою, та відповідно Q . Залежно від цього вибирається початковий режим роботи системи керування.

Розглянуто режими стабілізації струму при зменшенні опору навантаження від початкового значення R_n , якому для прикладу буде відповідати $\gamma = 1$, до кінцевого значення R_k . При цьому вважатимемо $L = const$. На рис. 2 представлено графіки залежності відносних максимального та мінімального значень $I_{a\max}^* = \frac{I_{a\max}}{U_{m(1)}/R_n}$, $I_{a\min}^* = \frac{I_{a\min}}{U_{m(1)}/R_n}$ при стабілізації

$I_{сер}$ для НЧ-ШІМ ($s=const$) при зміні $R^* = \frac{R}{R_n}$. Прийmemo $s = 10$, початкову добротність $Q_n = 5, 10$.

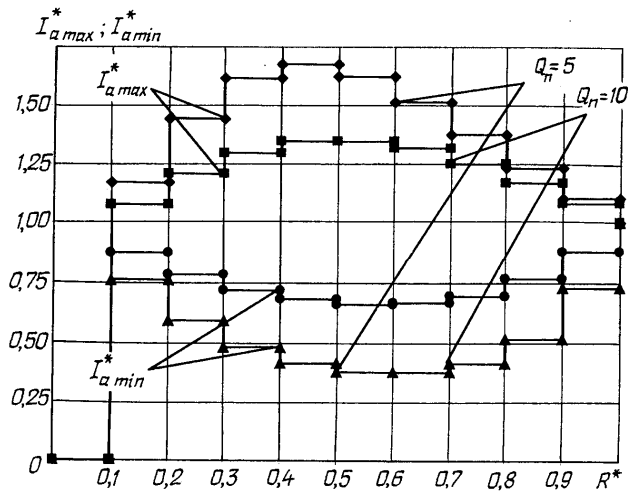


Рис. 2

З рис. 2 видно, що зменшення R^* призводить до появи НЧ пульсації струму, однак у всьому діапазоні зміни R^* система працює в режимі безперервного струму. Максимальне значення амплітуди пульсації відповідає $R^* = 0,5$ та $\gamma = 0,5$. $I_{a\max}^*$ при $Q_n = 5$ досягає максимального значення 1,68, що слід враховувати при виборі елементів схеми.

При НЧ-ШІМ нестабільність та дискретність регулювання визначаються параметром s . Дискретність зміни струму майже рівномірна. Однак при зменшенні γ збільшується амплітуда НЧ пульсації струму та може виникнути режим роботи інвертора, коли струм спадає до нуля.

Це обмежує можливість використання цього способу регулювання при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження та при малих значеннях Q . При цьому виникають складності практичної реалізації системи керування з АПЧ.

Рис. 3, 4 відображають результати досліджень НЧ-ЧІМ ($n = 1$) та НЧ-ЧІМ ($n = 2$) при аналогічних умовах. Для НЧ-ЧІМ при $n = 1$ $I_{a\max}^*$ збільшується до 1,18, а при $n = 2$ $I_{a\max}^*$ досягає 1,31. Перевагою НЧ-ЧІМ перед НЧ-ШІМ є те, що амплітуда НЧ пульсації струму обмежена і є меншою. Але для НЧ-ЧІМ характеристика регулювання нерівномірна та не дає

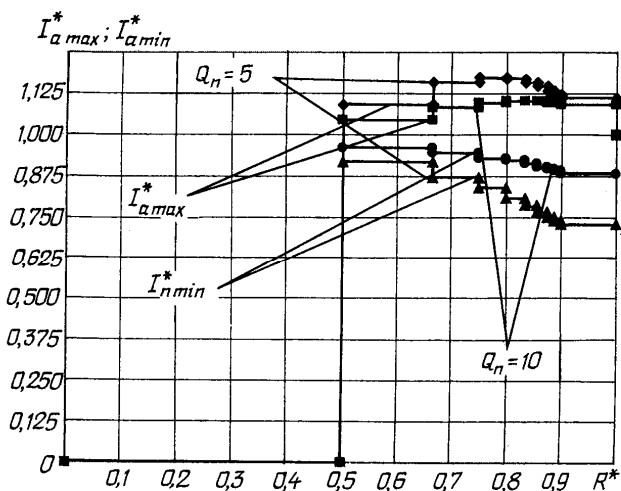


Рис. 3

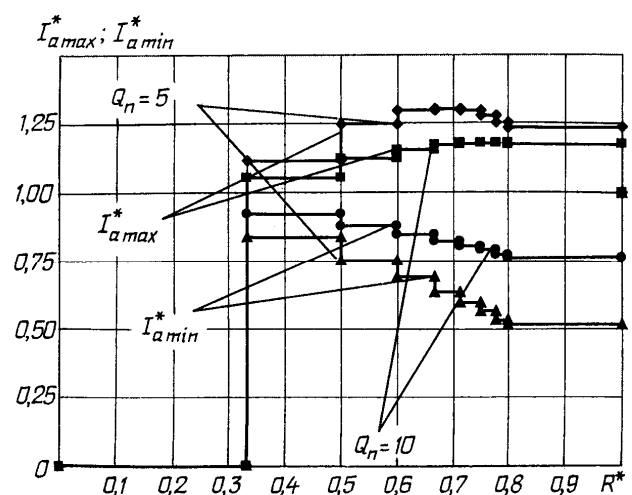


Рис. 4

змоги стабілізувати струм при зменшенні R більше ніж у 2 рази для $n=1$ та більше ніж у 3 рази для $n=2$. Збільшення n збільшить амплітуду НЧ пульсації струму. Доцільне використання одночасно $n=1$ та $n=2$, що покращить характеристики.

Параметри регулювання n, s, m впливають на дискретність регулювання струму, нестабільність, величину пульсації амплітуди струму. При великих значеннях s ($s > 10$) дискретність регулювання зменшується, однак стають можливими режими переривистого струму, що ускладнює роботу системи керування з АПЧ та збільшує вимоги до вхідного фільтра.

Було проведено експериментальні дослідження на макеті транзисторного перетворювача індукційної установки з НЧ-ШІМ керуванням, призначеної для паяння інструмента. Еквівалентна схема заміщення навантаження мала такі параметри: $C = 10,47$ мкФ; $L_n = 0,72$ мкГ; $f_n = 57,87$ кГц; $R_n = 0,026$ Ом; $Q_n = 10,2$. Величини L, R та Q отримані в результаті розрахунків на основі експериментальних досліджень.

Схема керування з НЧ-ШІМ модуляцією забезпечувала стабілізацію середнього значення вихідного струму за модулем та мала систему АПЧ. У процесі нагрівання активний опір навантаження зменшився на 40 %, а індуктивність – на 8 %.

Осцилограми вихідного струму протягом циклу нагрівання наведені на рис. 5.

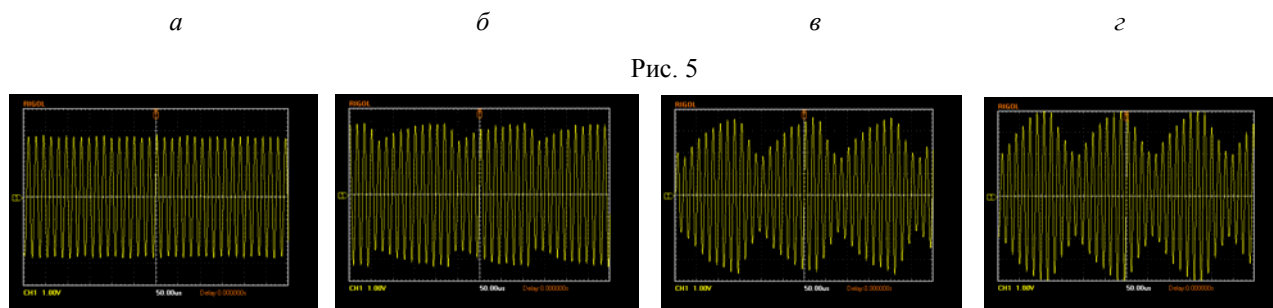


Рис. 5

Під час нагрівання коефіцієнт заповнення змінювався від початкового значення $\gamma_n = 1$ до кінцевого $\gamma_k = 0,6$. При цьому максимальне та мінімальне значення амплітуди струму по відношенню до початкової амплітуди струму досягали 1,46 та 0,71 відповідно, що підтверджує правомірність отриманих виразів. Експериментальні дослідження показали можливість використання НЧ-ШІМ для виконання даної технологічної задачі. Наявність пульсації струму необхідно враховувати при виборі елементів схеми. Однак зменшення добротності контура навантаження призводить до появи режимів переривистих струмів і є неприпустимим.

НЧ-ШІМ ($s = const$) та НЧ-ЧІМ ($n = const$) мають свої переваги та недоліки. Їх використання можливе при високих рівнях добротності або невеликому діапазоні регулювання. Подальші дослідження мають проводитись в напрямку розробки ефективних способів та алгоритмів регулювання при змінних параметрах регулювання n, s, m , що дасть змогу покращити характеристики при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження.

Практично нульові динамічні втрати потужності є значною перевагою інверторів з НЧ регулюванням. Їх використання дозволяє спростити силову частину перетворювача, зменшити втрати потужності, тим самим розширити частотні можливості. Зазначені вище недоліки НЧ-ШІМ та НЧ-ЧІМ роблять недоцільним їх широке застосування. Їх використання доцільне при високих рівнях добротності, невеликому діапазоні зміни параметрів навантаження, незначних вимогах до характеристик регулювання та стабілізації. Подальші дослідження мають проводитись у напрямку розробки НЧ способів та алгоритмів регулювання при змінних параметрах регулювання n, s, m , що дасть змогу покращити характеристики при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження.

3. Моделювання електромагнітних завад випромінювання в автономних системах електроживлення із високочастотними транзисторними перетворювачами

Одним з важливих аспектів електромагнітної сумісності (ЕМС) в автономних СЕЖ із високочастотними транзисторними перетворювачами є електромагнітні завади (ЕМЗ) випромінювання. Процеси виникнення та розповсюдження ЕМЗ у автономних СЕЖ різноманітних електротехнологічних установок аналогічні таким же процесам, що протікають у СЕЖ автономних електротранспортних засобів (АЕЗ). Тому результати досліджень, що були отримані при аналізі СЕЖ АЕЗ та наведені нижче, будуть використані при створенні будь-яких автономних систем електроживлення.

Добре відомо [7], що ЕМЗ випромінювання тісно пов'язані з кондуктивними завадами, особливо на частотах нижче 1000 МГц. Існують прості співвідношення між ЕМЗ випромінювання та кондуктивними завадами [6]. Проте ці співвідношення є справедливими лише для дуже простих геометричних форм випромінювачів та низьких частот і електрично коротких кабелів, де розподіл струму завади вздовж випромінюючого провідника можна вважати приблизно рівномірним.

Для оцінки ЕМЗ випромінювання у ситуаціях з реальними геометрією та розмірами кабелів АЕЗ часто застосовують методи електронного моделювання. Ці методи потребують достатньо складних моделей завод і кабелів, а точність результату моделювання є не завжди достатньою.

Для моделювання ЕМЗ випромінювання від систем зі складними геометричними формами запропоновано емпіричний алгоритм [1], який дає змогу визначити коефіцієнти випромінювання від кабелів АЕЗ та рівень випромінювання від всього АЕЗ, використовуючи прості тестові процедури. При цьому спочатку визначаються основні канали розповсюдження ЕМЗ, після чого сумарне випромінювання ЕМЗ в АЕЗ нескладно визначити шляхом комбінації одержаних коефіцієнтів випромінювання і вимірних кондуктивних завод у них.

На рис. 6 спрощено показаний механізм розповсюдження ЕМЗ випромінювання від одного електронного модуля або функціонального вузла АЕЗ, до якого під'єднаний кабель. Тут прийняті такі позначення: 1 – електронний модуль або функціональний вузол; 2 – пробник напруги; 3 – кабель; 4 – приймальна антена.

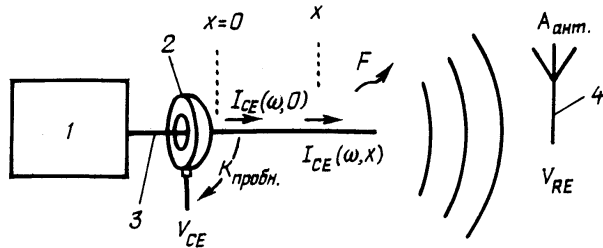


Рис. 6

Електронний модуль генерує кондуктивні завади, струм яких певним чином розподілений по кабелю АЕЗ. Прийнято, що струм завади розподілений нерівномірно вздовж кабелю і може бути описаний таким рівнянням:

$$I_{CE}(\omega, x) = I_{CE}(\omega, 0) \cdot D(\omega, x), \quad (6)$$

де $I_{CE}(\omega, x)$ – струм кондуктивної завади в точці x кабелю; $I_{CE}(\omega, 0)$ – струм кондуктивної завади на початку кабелю, в точці під'єднання кабелю до електричного модуля; $D(\omega, x)$ – функція розподілу, яка залежить від частоти та геометрії джгута кабелів.

Частину енергії завади, яка випромінюється кабелем у навколишнє середовище, можна визначити з рівняння

$$F_{RE}(\omega) = \int_{x=0}^L I_{CE}(\omega, x) R(\omega, x) dx, \quad (7)$$

де $F_{RE}(\omega)$ – напруженість поля ЕМЗ випромінювання, виміряна в точці розташування антени; L – довжина кабелю; $R(\omega, x)$ – функція, що пов'язує між собою струм кондуктивної завади та поле її випромінювання на невеликому сегменті кабелю в точці x . Ця функція теж залежить від частоти, геометрії розводки кабелів та властивостей навколишнього середовища.

Підставляючи (6) у (7), одержимо:

$$F_{RE}(\omega) = \int_{x=0}^L I_{CE}(\omega, 0) D(\omega, x) \cdot R(\omega, x) dx = I_{CE}(\omega, 0) \int_{x=0}^L D(\omega, x) \cdot R(\omega, x) dx, \quad (8)$$

або

$$F_{RE}(\omega) = I_{CE}(\omega, 0) \cdot F(\omega), \quad (9)$$

де

$$F(\omega) = \int_{x=L}^L D(\omega, x) \cdot R(\omega, x) dx. \quad (10)$$

З рівняння (9) видно, що поле випромінення можна однозначно пов'язати зі струмом кондуктивної завади в точці $x=0$, де кабель виходить з електронного модуля.

Зазвичай струм кондуктивної завади вимірюється за допомогою стандартного пробника струму:

$$V_{CE}(\omega) = I_{CE}(\omega) \cdot K_{probe}(\omega) \quad \text{і} \quad V_{CE}(\omega, 0) = I_{CE}(\omega, 0) \cdot K_{probe}(\omega), \quad (11)$$

де $K_{probe}(\omega)$ – коефіцієнт передачі пробника; $V_{CE}(\omega)$ – напруга на виході пробника.

З іншого боку, поле ЕМЗ приймає антена, яка перетворює це поле в напругу $V_{RE}(\omega)$, пропорційну полю:

$$V_{RE}(\omega) = F_{RE}(\omega) \cdot A_{ant}(\omega), \quad (12)$$

де $A_{ant}(\omega)$ – це антенний фактор.

Підставляючи рівняння (9) і (11) в (12), одержимо:

$$V_{RE}(\omega) = V_{CE}(\omega, 0) \frac{F(\omega) \cdot A_{ant}(\omega)}{K_{probe}(\omega)} = V_{CE}(\omega, 0) \cdot F'(\omega), \quad (13)$$

де

$$F'(\omega) = \frac{F(\omega) \cdot A_{ant}(\omega)}{K_{probe}(\omega)}. \quad (14)$$

Для системи, яка містить лише один кабель (поле визначається тільки одним чинником), рівняння (14) можна записати в іншій формі:

$$F'(\omega) = \frac{V_{RE}(\omega)}{V_{CE}(\omega, 0)}. \quad (15)$$

З цього рівняння впливає можливість емпірично оцінювати ефективність випромінення поля ЕМЗ кабелем. Для цього достатньо виміряти напругу на зажимах антени, напругу на виході пробника струму і обчислити відношення цих напруг.

Якщо система містить декілька кабелів, то сумарне поле ЕМЗ є векторною сумою полів, які випромінюються кожним кабелем:

$$V_{RE}(\omega) = \sum_{i=1}^n V_{CEi}(\omega, 0) \cdot F'_i(\omega), \quad (16)$$

де $V_{CEi}(\omega, 0)$ – напруга кондуктивної завади, виміряна в i -му кабелі; $F'_i(\omega)$ – ефективність випромінення.

Це рівняння достатньо точно описує всю систему кабелів, якщо взаємні зв'язки по полю між кабелями слабкі. Така умова є природною і легко виконується при грамотному, з точки зору ЕМС, конструюванні АЕЗ і системи його кабелів.

Один з можливих способів визначити коефіцієнт $F'_i(\omega)$ одиночного кабелю з системи кабелів полягає в тому, щоб примусово внести значне загасання для всіх інших кондуктивних завод. Це можна досягти шляхом встановлення в кожен з решти кабелів високоімпедансних котушок індуктивності [7].

У такій ситуації ефективність випромінення $F'_i(\omega)$ в i -му кабелі дорівнює

$$F'_i(\omega) = \frac{V_{RE}(\omega)}{V_{CEi}(\omega, 0)} \Big| V_{CEj}(\omega, 0) \approx 0, \quad j \neq i \quad (17)$$

Звичайно, введення високоімпедансних котушок індуктивності послідовно у кожен з кабелів змінює імпеданс цих кабелів і відповідно рівень кондуктивних завод у них. Але імпеданс кабелю без котушок індуктивності, який, власне, і підлягає дослідженню, лишиться тим самим, і тому випромінення цього кабелю теж не зміниться. З цієї причини еквівалентна ефективність випромінення, яка характеризується коефіцієнтом $F'_i(\omega)$, залишиться такою ж, як і при відсутності котушок індуктивності.

Для подальшого розгляду важливо зазначити, що напруга $V_{CEi}(\omega)$ у рівнянні (17) може бути напругою кондуктивної завади, яка виникає всередині електронного модуля СЕЖ; але з другого боку, цю напругу можна подати на електронний модуль ззовні, і спектральний склад такої тестової напруги може бути наперед заданим або відомим. Якщо тестову напругу (невеликої амплітуди) подати в точку, де кабелі виходять з електронного модуля, так, щоб не порушити нормального функціонування згаданого модуля, то струм, спричинений цією напругою, потече по кабелю тим самим шляхом, що і струм власної завади модуля, і в результаті з'явиться поле випромінення, яке матиме таку ж структуру, що і поле від "своєї" кондуктивної завади.

Знання спектрального складу тестової напруги дає змогу застосувати досконалі кореляційні алгоритми обробки результуючого сигналу. При цьому можна чітко відмежуватись від усіх паразитних ефектів, що зазвичай супроводжують високочастотні вимірювання, і одержати достовірний результат. Тому при проведенні таких тестових вимірювань необхідно використовувати спеціалізовані генератори сигналів та спектроаналізатори [7].

Після того, як обчислені коефіцієнти випромінення для кожного з кабелів джгуту, їх можна співставити з напругою реальних кондуктивних завод АЕЗ (як результат вимірювань у системі, де заданий вище електронний модуль функціонує у штатному режимі роботи). У результаті такого співставлення є можливість вирахувати реальний рівень випромінення ЕМЗ, використовуючи вираз (16).

Оскільки рівняння (16) є векторним, то напруга $V_{CEi}(\omega, 0)$ і коефіцієнт $F'_i(\omega)$ також є векторними величинами. Це означає, що при вимірюваннях, наприклад, $V_{CEi}(\omega, 0)$ потрібно використовувати спектроаналізатори, які вимірюють не тільки амплітуду, але також і початкову фазу напруги. Для того щоб можна було використовувати більш доступні спектро-аналізатори скалярного типу, без необхідності вимірювати початкову фазу векторної напруги, доцільно запропонувати вираз для обчислення середньоквадратичного значення амплітуди поля випромінення ЕМЗ:

$$|V_{RE}(\omega)| = \left| \sum_{i=1}^n V_{CEi}(\omega, 0) \cdot F'_i(\omega) \right| \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[|V_{CEi}(\omega, 0)|^2 \cdot |F'_i(\omega)|^2 \right]} \quad (18)$$

За допомогою виразу (18) можна достатньо просто оцінити рівень випромінення ЕМЗ від АЕЗ з прийнятною точністю.

Для перевірки запропонованого методу моделювання співробітниками відділу транзисторних перетворювачів та лабораторії електромобілів ІЕД НАН України були виконані вимірювання поля ЕМЗ від електромобіля ЗАЗ 11029, який перебував на відкритому повітрі. При вимірюваннях використовувались стандартні вимірювальні прилади: еквівалент мережі типу NNB111, селективний мікровольтметр типу SMV11 (для частот до 30 МГц) та типу SMV 8.5 (для частот від 30 до 100 МГц), а також штирвова вимірювальна антена, пробники струму типу FCC F-130A та FCC F-61. Антена була встановлена над металевим листом розмірами 75 x 100 мм спереду автомобіля на відстані приблизно 0,5 м від нього.

На рис. 7 повторено фінальний результат моделювання за наведеною методикою [4] (суцільна лінія), і для порівняння показано криву вимірювань фактичного поля ЕМЗ СЕЖ (пунктирна лінія).

З порівняння двох кривих видно, що вони проходять достатньо близько одна від одної. Це означає, що запропонована методика моделювання ЕМЗ випромінювання від електромобіля є правильною і може бути ефективно використана для моделювання, передбачення і дослідження поля випромінювання будь-якої автономної СЕЖ.

У подальшому планується розширення та поглиблення наукових досліджень в галузі електромагнітної сумісності високочастотних транзисторних перетворювачів, а також проведення фундаментальних досліджень в галузі ЕМС автономних систем електроживлення з такими перетворювачами.

В узагальненому вигляді згадані вище дослідження включають у себе: аналіз процесів в електротехнічних системах з напівпровідниковими перетворювачами з точки зору виникнення ЕМЗ; аналіз та вивчення можливих шляхів розповсюдження ЕМЗ від місця виникнення до заданої точки у просторі; розробку економічних та ефективних методів зменшення ЕМЗ (трансформація спектра ЕМЗ, зменшення інтенсивності гармонійних складових спектра, раціональний вибір робочого циклу силових компонентів у перетворювачах напруги тощо).

Проведення цих досліджень, у першу чергу, має на меті зменшення інтенсивності кондуктивних завад та завад випромінювання, які генерують високоефективні транзисторні перетворювачі та системи електроживлення з такими перетворювачами в бік первинної мережі та до споживача, до рівнів, що регламентуються сучасними стандартами та нормативними документами.

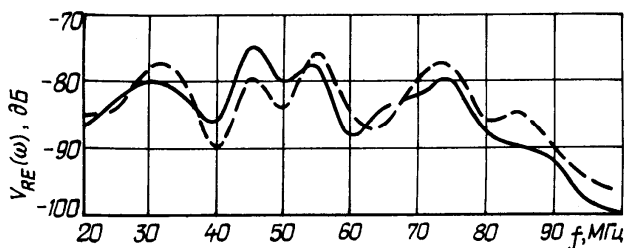


Рис. 7

1. Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Шевченко П.М., Герасименко П.Ю. Транзисторні інвертори напруги установок індукційного нагріву з НЧ імпульсною модуляцією в режимі стабілізації струму навантаження // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 2. – С. 109–112.
2. Юрченко М.М., Павловський В.О., Юрченко О.М., Гуцалюк В.Я. Формування вихідної характеристики систем електроживлення технологічної установки без тигельного зонного переплаву // III МНТК "Світотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи". – Тернопіль. – 2008. – С. 26–28.
3. Юрченко М.М., Твердохліб Ю.О. Високовольтні перетворювальні пристрої джерел живлення бортового технологічного устаткування // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 19. – С. 91–94.
4. Юрченко М.М., Твердохліб Ю.О. Високочастотні перетворювальні пристрої з підвищеною вихідною напругою бортового технологічного устаткування // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С. 49–50.
5. Юрченко М.М., Шевченко П.М., Сенько В.І. Особливості побудови високочастотного високовольтного пристрою бортової електронно-променевої технологічної установки // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – № 4. – С. 91–92.
6. Юрченко О.М., Павловський В.О., Твердохліб Ю.О. Моделювання та передбачення виникнення та розповсюдження електромагнітних завад в системах енергоживлення автономних електротранспортних засобів // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 4. – С. 82–86.
7. Юрченко О.М., Павловський В.О., Юрченко М.М. Моделювання електромагнітних завад випромінювання в автономних електротранспортних засобах // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч. 4. – С. 26–28.
8. Пат. 83148. Установа для електронно-променевої зонної плавки матеріалу в космосі в умовах мікрогравітації і космічного вакууму / Б.Є. Патон, Ю.А. Асніс, М.М. Юрченко, П.М. Шевченко та інш. – 2008. – Бюл. № 11.