

УДК 621.311

Г.І. Лагутін<sup>1</sup>, В.М. Лисенко<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Сумський національний аграрний університет, Суми

## ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ МИРНОГО ЧАСУ ТА ПРИ ВЕДЕННІ БОЙОВИХ ДІЙ

У статті розглядаються шляхи забезпечення електромагнітної сумісності елементів комплексів озброєння та військової техніки, таких як радіолокаційні станції і радіолокаційні комплекси, з урахуванням їх впливу на автономні джерела електричної енергії.

**Ключові слова:** комплекси озброєння й військової техніки, системи електропостачання, автономні джерела електричної енергії, електромагнітна сумісність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Гарантоване, якісне, економне та безпечне електропостачання радіолокаційних комплексів та радіолокаційних станцій Повітряних Сил Збройних Сил України є необхідною умовою постійної бойової готовності та боєздатності радіотехнічних військ Повітряних Сил під час проведення антитерористичної операції. Порушення нормального режиму роботи системи електропостачання може призвести до зриву виявлення повітряних цілей, їх супроводження та видачі радіолокаційної інформації на командні пункти вищих ланок управління в зоні проведення антитерористичної операції й, як наслідок, ураження угруповань своїх військ (сил), найважливіших промислових і економічних центрів і інших об'єктів або позицій самих радіотехнічних підрозділів. Комплекси ОБТ, особливо радіолокаційні станції (РЛС) та радіолокаційні комплекси (РЛК), під час функціонування суттєво впливають на режим роботи як самої електричної мережі, так і через мережу один на одного. Цей факт впливу відбиває таке поняття, як електромагнітна сумісність обладнання (ЕМС).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У цей час питанням електромагнітної сумісності елементів комплексів ОБТ приділяється досить велика увага. У цілому ряді публікацій розглядаються вимоги електромагнітної сумісності автономних джерел електричної енергії, використовуваних у збройних силах різних держав при підготовці й веденні бойових дій. У [2] проведений аналіз автономних джерел електричної енергії обґрунтування переліку характеристик і показників електротехнічних засобів комплексів ОБТ, що задовольняють вимогам електромагнітної сумісності. В [3, 4] уточнюються вимоги до джерел електричної енергії з точки зору електромагнітної сумісності і проводиться оцінка перспектив розвитку військових засобів електропостачання з урахуванням досвіду проведення антитерористичної

операції. Методи визначення розрахункових навантажень комплексів ОБТ, що дозволяють обґрунтувати вимоги до потужності автономних електростанцій стосовно електромагнітної сумісності, викладено в [5]. Особливості обґрунтування показників електромагнітної сумісності електротехнічних засобів, які входять до складу систем електропостачання комплексів озброєння й військової техніки, з використанням математичного апарата теорії графів проаналізовані в [1]. В [6] ці питання розглядаються з застосуванням математичного апарата кореляційного аналізу.

**Метою статті** є аналіз шляхів забезпечення електромагнітної сумісності елементів радіолокаційних станцій і радіолокаційних комплексів з урахуванням їх впливу на автономні джерела електричної енергії.

### Виклад основного матеріалу

Поняття ЕМС розглянуті у серії стандартів МЕК 61000 «Електромагнітна сумісність», розроблених Технічним комітетом Міжнародної електротехнічної комісії ТК 77 "Електромагнітна сумісність обладнання, включаючи електричні мережі" [7]. Під електромагнітною сумісністю (ЕМС) розуміють спроможність обладнання чи системи задовільно функціонувати в навколишній електромагнітній обстановці та не створювати недопустимих електромагнітних завад будь-чому в цій електромагнітній обстановці. При цьому під електромагнітними завадами мається на увазі не тільки вплив на радіоелектронну апаратуру РЛС та РЛК з боку власних електричних та магнітних полів, але й динамічні зміни напруги (провали або перерви живлення, перенапруги) електроживлення, наносекундні комутаційні перенапруги внаслідок підключення або відключення індуктивних навантажень, коливання напруги електроживлення, зміни частоти живлячої напруги, викривлення синусоїдальності напруги електроживлення тощо [8]. З цієї точки зору, основними типами спотворень в системах електропостачання (СЕП) можна вважати:

- вищі гармоніки, частота яких кратна основній частоті;
- інтергармоніки – гармоніки, частота яких не кратна основній частоті;
- коливання напруги;
- короткочасні провали напруги, амплітуда яких перевищує 10 % і може досягати 100 % (перерва живлення);
- несиметрія напруги (у трьохфазних системах);
- сигнали систем управління, які передаються по проводах ліній електропередач;
- зміни частоти;
- постійна складова змінного струму (вторинні джерела електроживлення).

Постановка на озброєння нових комплексів ОВТ супроводжується зростаючим споживанням електричної енергії, різким збільшенням енергоємності і концентрації електричних навантажень. Зростає кількість нелінійних, несиметричних, різко змінних споживачів електричної енергії, таких як напівпровідникові перетворювачі напруги й частоти значної потужності, частотний керований електропривод антенних постів РЛС та РЛК, імпульсні джерела електроживлення для засобів обчислювальної техніки, а також люмінесцентні лампи та енергозберігаючі лампи з електронним баластом.

Невиконання вимог електромагнітної сумісності джерел електропостачання та комплексів ОВТ призводить до зниження показників бойових можливостей і бойових властивостей РЛС та РЛК, погіршення показників надійності функціонування комплексів ОВТ, порушення бойової готовності та зриву виконання поставлених завдань [2].

Так, **відхилення напруги**, зумовлені повільними процесами зміни навантажень у системі, надають різний вплив на режими роботи окремих споживачів. Наприклад, тривале підвищення напруги на затискачах електричних двигунів призводить до зростання втрат у сталі двигунів, бо такі втрати пропорційні квадрату підведеної напруги, а також збільшенню струму неробочого ходу і через це до зменшення коефіцієнта потужності  $\cos \phi$  електродвигунів. Зниження напруги на затискачах електродвигунів призводить до зниження обертового моменту, збільшенню ковзання, зростанню струму статора й зменшенню терміну служби ізоляції електродвигунів. Крім того, при підвищенні напруги на затискачах асинхронного двигуна відбувається перехід на нелінійну частину кривої намагнічування, що призводить до генерації вищих гармонік напруги. Найбільший вплив відхилення напруги чинить на режими роботи освітлювального навантаження. Наприклад, зниження напруги на затискувачах плавильних печей всього на 5 % від номінального значення знижує світловий потік ламп розжарювання на 18-

20 %, що може призвести до підвищеної втомленості та збільшення імовірності помилок при роботі операторів РЛС під час бойового чергування. Підвищення напруги на затискачах освітлювальних приладів на 10 % скорочує термін служби ламп розжарювання приблизно в 3 рази.

**Відхилення частоти**, яке звичайно відбувається при різкій зміні навантаження при роботі комплексів ОВТ від автономних джерел електропостачання, істотно впливає на роботу електродвигунів. Відомо, що споживана електричним двигуном потужність залежить від моменту опору приводного механізму. При цьому [9], якщо момент опору механізму незмінний і не залежить від частоти, то потужність двигуна прямо пропорційна частоті; якщо момент опору прямо пропорційний частоті, то активна потужність, що споживається двигуном, пропорційна квадрату частоти; в системах вентиляції момент опору пропорційний квадрату частоти, тому потужність двигунів пропорційна частоті у кубі; потужність двигунів, що обертають відцентрові насоси, пропорційна частоті у степені від 3 до 10.

**Несиметрія напруг** також негативно впливає на роботу електродвигунів у складі комплексів ОВТ. Відомо що несиметричний режим може бути проаналізовано за допомогою метода симетричних складових [10]. Зворотна складова наводить у роторі двигуна ЕДС подвійної частоти. Якщо врахувати, що індуктивність зворотної послідовності асинхронного двигуна в 5 – 7 разів менше індуктивності прямої послідовності, то незначна несиметрія напруги може призвести до значного зростання несиметрії струму, що призводить до додаткового нагрівання обмоток. Так, при роботі з номінальним навантаженням при коефіцієнті напруги зворотної послідовності  $K_{2U} = 4\%$  термін служби ізоляції тільки з причини додаткового нагріву зменшується приблизно у 2 рази. Крім того, слід відмітити зменшення обертового моменту асинхронного двигуна через виникнення асинхронних моментів зворотної послідовності:

$$\Delta P_{AM} = 2.41 \cdot \Delta P_{m, ном} \cdot K_{\pi}^2 \cdot K_{2U}^2, \quad (1)$$

де  $P_{m, ном}$  – номінальні втрати в міді обмотки статора;  $K_{\pi}$  – кратність пускового струму.

Несиметрія напруг може бути причиною помилкової роботи систем автоматики і релейного захисту, пристроїв дистанційного керування елементами комплексу ОВТ.

Для зменшення впливу несиметрії напруг доцільно застосовувати заходи, які називають симетруванням режимів: забезпечення рівномірного розподілу навантажень по фазах; зменшення в мережах до 1 кВ опору нульової послідовності  $Z_0$  за рахунок збільшення перерізу нульового проводу, використання трансформаторів з меншим реактивним опором  $x_{T0}$ , що залежить від схеми з'єднання обмоток

(зигзаг, трикутник, зірка з нульовим проводом); застосування спеціальних симетруючих пристроїв.

**Несинусоїдальність напруги** характеризується кількістю та амплітудами вищих гармонійних складових (гармонік). Гармоніки виникають у мережах як наслідок роботи нелінійних навантажень, імпульсних джерел живлення, тиристорних перетворювачів, насичення магнітних кіл електричних машин і трансформаторів тощо. Наслідки появи гармонік проявляються у зниженні ККД двигунів і трансформаторів, додаткових втратах на нагрівання.

Зменшення несинусоїдальності може бути забезпечене шляхом збільшення числа фаз перетворювачів, використання фільтрів тощо.

**Коливання напруги** звичайно виникають внаслідок різко змінних навантажень, які є наслідком зміни режиму функціонування комплексу ОВТ. Вони призводять до появи флікеру, хибної роботи систем автоматики, збоїв у роботі цифрових пристроїв, коливанням моменту на валах двигунів, які призводять до підвищених втрат електроенергії та зносу матеріалів. Для зниження коливань напруги пропонується використовувати такі заходи, як автоматичне регулювання збудження генераторів автономних джерел електроенергії, стабілізацію напруги, а також роздільне живлення статичних і різко змінних навантажень.

**Оцінку впливу окремих джерел електричної енергії** та елементів комплексу ОВТ на погіршення якості електроенергії в системі електропостачання військового об'єкту пропонується здійснювати шляхом оцінювання взаємного впливу елементів системи з виділенням внеску кожного окремого елемента у спотворення електроенергії в певній точці системи та аналізу величини впливу спотворюючих факторів на електромагнітні процеси в елементі системи. Таким чином, при розгляді комплексу питань, які пов'язані з електромагнітною сумісністю елементів комплексів ОВТ, слід вирішити такі завдання:

визначення амплітуд гармонік  $U_n$  і оцінка сумарного впливу кількох гармонік;

визначення загального рівня спотворень  $U_{\text{гарм.}\Sigma}$  і допустимого індивідуального внеску споживача в напругу  $n$ -ої гармоніки у точці загального підключення;

визначення частотних характеристик елементів мережі і вузлів навантажень;

оцінка взаємного впливу на коливання напруги споживачів електроенергії з складу комплексу ОВТ;

визначення допустимого терміну перерви живлення.

**Амплітуди гармонік**  $U_n$  з номерами  $5 \geq n \geq 31$  можуть бути визначені за виразом:

$$U_n = U_1 / (n - 5 / n)^{1,2} .$$

Тоді **загальний рівень спотворень**  $U_{\text{гарм.}\Sigma}$  від сумарної дії  $m$  гармонік визначається як

$$U_{\text{гарм.}\Sigma} = \sqrt{\sum_{n=2}^m q_n^2 \cdot U_n^2} , \quad (2)$$

де  $U_n$  – значення напруги гармоніки  $n$ -го порядку;

$q_n$  – ваговий коефіцієнт, який дорівнює 1 при визначенні втрат у активному опорі,  $n$  – для конденсаторів,  $1/n$  – для синхронних та асинхронних машин.

**Допустимий індивідуальний внесок**  $i$ -го споживача у напругу  $n$ -ої гармоніки в точці загального підключення  $U_{n \text{ і доп}}$  може бути визначений за співвідношенням:

$$U_{n \text{ і доп}} = U_{n \text{ ЕМС}} \sqrt{P_i / P_{\text{пр}}} , \quad (3)$$

де  $P_i$  – максимальна потужність  $i$ -го споживача;

$P_{\text{пр}}$  – пропускна потужність мережі.

Значення  $a$  приймаються рівними 1 для  $n=3, 5, 7$ ; рівними 1,4 для  $n = 11, 13$  та рівними 2 для  $n > 13$ .

Для оцінки допустимості підключення до мережі потужних навантажень, що спотворюють, і вибору фільтрів вищих гармонік необхідно знати опори мережі на частотах гармонік, що досліджуються. **Частотні характеристики** можуть бути визначені розрахунком або за допомогою експериментів виду [8]: – вимірювання струмів і напруг вищих гармонік у вузлі що досліджується, які створюються нормально експлуатуючим обладнанням. В цьому разі необхідно вирішувати проблему відсіву фонових гармонік; – спеціального введення в вузол джерела неканонічних гармонік, наприклад парних, відсутність яких у мережах знімає проблему відсіву фонових гармонік; – створення перехідного процесу з наступною обробкою і отриманням частотного еквіваленту.

При **аналізі взаємного впливу** окремих елементів системи електропостачання та комплексу ОВТ на спотворення енергетичних процесів доцільно використовувати функції чутливості та проводити аналіз стійкості в малому [11]. Для моделей систем електропостачання при кількості генераторів  $n_g > 1$  й кількості споживачів електроенергії  $n_{\text{сп}} > 2$  вплив зміни показників якості електричної енергії кількох генераторів і споживачів на елемент, що розглядається, можна оцінити на наведеними нижче виразами на основі функцій чутливості:

$$\Delta\gamma = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} \Delta q_i \partial\gamma / \partial q_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} A_i \Delta q_i ; \quad (4)$$

$$\Delta\gamma / \gamma = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} S_{q_i}^{\gamma} \Delta q_i , \quad (5)$$

де  $\Delta\gamma$  – зміни показника  $\gamma$  на елементі системи;  $\Delta q_i$  – зміни  $i$ -го параметра чи сигналу генераторів і споживачів системи;  $n_{\text{пс}}$  – кількість параметрів та сигналів елементів системи;  $A_i$  – коефіцієнти впливу;  $\delta q_i = \Delta q_i / q_i$  – відносна зміна  $i$ -го параметра чи сигналу;  $S_{q_i}^{\gamma} = (q_i / \gamma) (\partial\gamma / \partial q_i)$  – функція чутливості.

Допустимий термін перерви живлення залежить від категорії та характеристик споживача електроенергії і повинен визначатися на підставі техніко-економічних співставлень витрат на забезпечення підвищення надійності та збитків від порушення електропостачання.

## Висновки

1. За рівнем впливу на функціонування РЛС та елементів РЛК з причини хибної роботи систем автоматичного регулювання, релейного захисту і автоматики, показники електромагнітної сумісності елементів комплексу ОВТ можна розташувати в такій послідовності: вищі гармоніки та інтергармоніки; коливання напруги, несиметрія напруги; відхилення напруги та частоти.

2. Для оцінювання рівню впливу показників електромагнітної сумісності елементів комплексу ОВТ на функціонування окремих РЛС та елементів РЛК пропонується здійснювати аналіз взаємного впливу елементів комплексу з виділенням внеску кожного окремого елемента у спотворення електроенергії в певній точці системи та розрахунку величини впливу спотворюючих факторів на електромагнітні процеси в елементі комплексу.

3. Для зменшення впливу показників електромагнітної сумісності на електромагнітні процеси пропонується застосовувати автоматичне регулювання збудження генераторів автономних джерел електроенергії, стабілізатори напруги, а також роздільне живлення статичних і різко змінних навантажень; симетрування режимів електроспоживання; зменшення несинусоїдальності напруги за рахунок збільшення числа фаз перетворювачів, використання фільтрів тощо.

## Список літератури

1. Лагутин Г.И. Особенности обоснования характеристик и показателей образцов электротехнических средств электроснабжения комплексов вооружения и военной техники / Г.И. Лагутин // Системы озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2015. – № 4(44). – С. 21-23.

2. Лагутин Г.И. Анализ методов визначення характеристик та показників якості систем електропостачання комплексів озброєння та військової техніки / Г.И. Лагутин // Системы озброєння і військова техніка. – 2016. – № 1(45). – С. 29-34.

3. Лагутин Г.И. Требования к автономным источникам электрической энергии общевойскового назначения с учетом опыта проведения антитеррористической операции / Г.И. Лагутин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 3(20). – С. 147-151.

4. Lagutin G.I. Military power supply units development prospects on the combat operations experience basis / G.I. Lagutin // Системы озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2015. – Вып. 3(43). – С. 45-48.

5. Лагутин Г.И. Анализ режимов потребления электрической энергии комплексами вооружения и военной техники / Г.И. Лагутин // Системы озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 3(39). – С. 46-49.

6. Лагутин Г.И. Особенности определения перечня параметров и характеристик систем электроснабжения / Г.И. Лагутин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 4(41). – С. 73-76.

7. ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 Словник електротехнічних термінів. Глава 161. Електромагнітна сумісність (ІЕС 60050-161:1990, ІДТ). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2003.

8. Король Е.Г. Требования по электромагнитной совместимости технических средств на объектах электроэнергетики и промышленности / Е.Г. Король, М.Г. Пантелеев // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 15 (988). – С. 35-60.

9. Электричные машины: підручн. / Б.Т. Кононов, Г.И. Лагутин, О.Б. Котов, А.О. Нечаус; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Х.: ХУПС, 2015.

10. Теоретичні основи електротехніки: навч.-метод. посібн. Ч. 1 / Л.І. Вдовенкова, В.В. Ніконов, В.В. Тарасова та ін. – Х.: ХВУ, 1998.

11. Задачі забезпечення електромагнітної сумісності потужного електроенергетичного обладнання / О.В. Кириленко, С.П. Денисюк, О.Ф. Буткевич, О.Б. Рибіна // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – С. 61-68.

Надійшла до редколегії 9.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

## ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ МИРНОГО ВРЕМЕНИ И ПРИ ВЕДЕНИИ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ

Г.И. Лагутин, В.Н. Лысенко

В статье рассматриваются пути обеспечения электромагнитной совместимости элементов комплексов вооружения и военной техники, таких как радиолокационные станции и радиолокационные комплексы, с учетом их влияния на автономные источники электрической энергии.

**Ключевые слова:** комплексы вооружения и военной техники, системы электроснабжения, автономные источники электрической энергии, электромагнитная совместимость.

## WAYS OF PROVIDING OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRIC ENERGY CONSUMERS IN THE CONDITIONS OF PEACE-TIME AND AT CONDUCT OF BATTLE ACTIONS

G.I. Lagutin, V.N. Lysenko

The ways of providing of electromagnetic compatibility of armament and military equipment complexes elements, such as the radars and radar complexes, taking into account their influence on autonomous electric supply units, are examined in the article.

**Keywords:** armament and military equipment complexes, power supply system, autonomous electric supply units, electromagnetic compatibility.