

УДК 621.311.1.018.3

О.М. ДМИТРИЄВА¹ (канд. техн. наук, доц.), І.І. ЛАРИНА¹ (канд. техн. наук, доц.),О.П. ЛЮТИЙ² (канд. техн. наук)¹ Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет»

² ВАТ «Дніпроспецсталь»n8400@matrixhome.net Lvuty@dss.com.ua

ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЗА НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ У ДІЮЧИХ МЕРЕЖАХ

Розглядається задача оцінювання ЕМС при неперіодичних спотвореннях синусоїдальної напруги. Показується невизначеність понять синусоїдальної і несинусоїдальної компонент. Пропонуються засоби усунення невизначеності: шляхом виділення синусоїдальної складової кореляційної функції або попереднього осереднення кривої напруги. Приводиться приклад оцінювання ЕМС конденсаторної установки.

Ключові слова: ЕМС, несинусоїдальність, кореляційна функція, спектральна щільність, синусоїдальна і несинусоїдальна компоненти, вплив на конденсаторну установку.

Постановка задачі. В [1] нормуються показники несинусоїдальності напруги за припущеннями періодичності параметрів електромагнітної сумісності (ЕМС) і наявності лише вищих гармонік, кратних частоті $f = 50$ Гц. У діючих мережах процеси $u(t)$ зміни миттєвих значень напруги є неперіодичними, для яких поняття гармоніки не існує. Тому обробка осцилограм $u(t)$ по «гармонікам» і «інтергармонікам» є математично некоректною і може допускатися як умовний прийом тільки для точок загального приєднання, де наявність фізичного смислу показників ЕМС не обов'язкова.

Інакше стоїть справа з ЕМС на затискувачах електроприймачів. Тут потрібно моделювати діяння несинусоїдальності, оцінюючи додаткові втрати активної потужності, максимальні температури перевищення та тепловий знос [2, 3]. Осцилограма $u(t)$ містить синусоїдальну компоненту (СК) $u_f(t)$ з частотою $f = 50$ Гц, несинусоїдальну компоненту (НСК) $u_v(t)$ та інші завади ЕМС. Тому моделювання оцінює інтегральний ефект діяння $u(t)$ в цілому. Проте для практики важливо визначити долю діяння від кожної складової напруги. Наприклад, якщо на час експерименту напруга була меншою за номінальну, то відносно велика НСК напруги може і не викликати недопустимий перегрів конденсаторної установки (КУ). Однак якщо напруга підвищиться, то та сама несинусоїдальність вже приведе до порушення ЕМС.

Для періодичних процесів $u(t)$ декомпозиція на складові є коректною задачею: відхилення і несиметрія напруг визначаються за першою гармонікою $u_f(t)$, а НСК – по процесу

$$u_v(t) = u(t) - u_f(t), \quad (1)$$

який є сумою гармонік і інтергармонік. Для неперіодичних процесів така задача по суті є невизначеною.

Метою статті є оцінювання ЕМС за несинусоїдальності по дослідним даним. Для короткості розглядається задача впливу НСК на КУ з врахуванням відхилень напруги. Процес $u(t)$ і його компоненти вважаються випадковими ергодичними, з нульовими середніми значеннями.

Інтегральна оцінка ЕМС. КУ з найбільш чутливою до НСК – як і ізоляція мережі та електрообладнання. Оскільки стала нагріву КУ набагато перевищує тривалість $t_f = 0,02$ с циклу синусоїди 50 Гц, то інтегральну оцінку ЕМС достатньо виконувати за ефективним струмом I_{C_e} . Згідно [4] конденсатори повинні допускати тривалу роботу при діючому значенні струму до 130% номінального струму I_{C_n} , що дає умову ЕМС

$$I_{C_e} \leq 130 I_{C_n}. \quad (2)$$

Можливі три види вихідної інформації: осцилограма струму $i_C(t)$ реальної КУ або вимірювального конденсатора, осцилограма напруги на шинах підстанції, спектральна щільність (далі – щільність) $S_u(\omega)$ напруги (не спектр «гармонік!»), де ω – кутова частота у межах від 0 до ∞ .

У першому випадку ефективний струм визначається по осцилограмі струму. В інших випадках спочатку розраховується струм КУ або його щільність. Для цього використовується динамічна модель «мережа – КУ», яка характеризується активним опором r і індуктивністю L мережі та активним опором r_C і ємністю C КУ. Основою моделі є зважувальний фільтр ЗФ, який моделює струм. Він складається з трьох ланок: пропорційної з коефіцієнтом передачі k_C , коливальної зі сталими часу T_1 , T_2 та форсуючої з параметром T_3 . Параметри ЗФ визначаються формулами [2]:

$$T_1 = L/r_C + r_C, \quad T_2^2 = LC, \quad T_3 = r_C C, \quad k_C = \sqrt{\frac{(1 - \omega_f^2 T_2^2) + \omega_f^2 T_1^2}{1 + \omega_f^2 T_3^2}},$$

де $\omega_f = 2\pi f = 100\pi$ рад/с – кутова частота синусоїди 50 Гц.

Передавальна і амплітудно-частотна АЧФ функції становлять:

$$W_C(p) = k_C \frac{T_3 p + 1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad A_C(\omega) = k_C \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_3^2}{(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2}}, \quad (3)$$

де p – оператор. Перехідна функція ЗФ визначається формулою (5.28) з [2]. Стала часу T_h перехідної функції дорівнює $2T_2^2/T_1$.

Позначивши через

$$\alpha_C = T_1/2T_2^2, \quad \beta_C = \sqrt{4T_2^2 - T_1^2}/2T_2^2,$$

отримаємо полюси передавальної функції ($j = \sqrt{-1}$)

$$p_{1,2} = -\alpha_C \pm j\beta_C.$$

Процес $i_C(t)$ доцільно розраховувати по осцилограмі $u(t)$ методом парціальних реакцій [2, 5], згідно з яким динамічну модель КУ представимо у вигляді паралельно з'єднаних інерційних ланок зі спряженими частотами $\gamma_{1,2} = -p_{1,2}$ і коефіцієнтами передачі¹

$$a_1 = -k_C \frac{T_3 p_1 + 1}{T_2^2 p_1 (p_1 - p_2)}, \quad a_2 = -k_C \frac{T_3 p_2 + 1}{T_2^2 p_2 (p_2 - p_1)}, \quad (4)$$

які є комплексними величинами.

При цифровому запису вхідний процес при $l = 0, 1, 2, \dots$ задається у вигляді гратчастої функції $u(l\Delta)$ з кроком Δ , який повинен бути значно меншим за T_h . В розрахунках реакції ЗФ потрібно вибрати вид функції у межах Δ . Найявність аналітичного виразу для перехідної функції дозволяє зробити це за умови відтворення її максимумів із заданою похибкою. При достатньо малих кроках гратчасту функцію можна вважати східчастою: на ділянці від $(l-1)\Delta$ до $l\Delta$ напруга $u(t) = u_l = \text{const}$. У цьому випадку кінцева ордината парціальної реакції

$$i_{1,2}(l\Delta) = i_{1,2} b_{\Delta 1,2} + a_{1,2} u_l (1 - b_{\Delta 1,2}) \quad \text{при } b_{\Delta} = 1 - \exp\{\gamma\Delta\}$$

є початковою ординатою $i_{i,l+1}$ наступної ділянки. При $l = 0$ реакція дорівнює нулю, тому для першої ділянки і початкова ордината є нульовою.

Якщо умова відтворення перехідної функції не виконується, то гратчасту функцію потрібно вважати кусково-лінійною, коли на ділянці від $(l-1)\Delta$ до $l\Delta$ напруга

$$u(t) = c_{1l} t + c_{2l} \quad \text{ї дè } c_{1l} = (u_l - u_{l-1})/\Delta, \quad c_{2l} = l u_{l-1} - (l-1) u_l.$$

З використанням загальної формули для інтеграла диференційного рівняння першого порядку, отримаємо

$$i(l\Delta) = i_{1,2} b_{\Delta 1,2} + a_{1,2} [c_{1l} l\Delta - (c_{1l}/\gamma_{1,2} - c_{2l})(1 - b_{\Delta 1,2})]. \quad (5)$$

При негативному результаті виконується сплайн-інтерполяція належного порядку.

Шуканий процес $i_C(t)$ визначається сумою парціальних реакцій. При підсумовуванні уявні величини взаємно компенсуються. Для розрахунку ефективного струму потрібно відкинути перехідний процес – від $t = 0$ до $3T_h$. Звідки витікає, що час осцилографування випадкової завади повинен бути значно більшим за $3T_h$.

При заданій щільності напруги ефективний струм

$$I_{Ce} = \sqrt{\int_0^\infty A_C^2(\omega) S_u(\omega) d\omega} = \sqrt{\int_0^\infty S_{iC}(\omega) d\omega}, \quad (6)$$

де $S_{iC}(\omega)$ – щільність струму КУ. Інтеграл від щільності дає дисперсію D_{iC} процесу². Якщо аргументом щільності є частота λ у Гц, то заміна ω на $2\pi\lambda$ дає вираз $S_{iC}(\lambda)$, інтегрування якого потрібно виконувати по $2\pi\lambda$, а не по λ – інакше інтеграл дасть величину $D_{iC}/2\pi$, а не дисперсію.

¹ У відповідних формулах в [2, 5] пропущено знак мінус, але розрахунки виконано вірно.

² В радіотехніці [6] щільність відрізняється від її визначення в [2, 7] відсутністю множника $1/\pi$, тому інтегрування дає величину, у π разів більше за дисперсію.

Параметри компонент. У практичних застосуваннях теоретичну невизначеність компонент можна умовно усунути, якщо задати спосіб їх виділення. В [3] запропоновано поциклічний розрахунок амплітуд «першої гармоніки» з попереднім осередненням вихідного процесу на інтервалі з $\theta \leq t_f/2$. Компоненти можна отримати і пропусканням процесу $u(t)$ через смугопропускаючий і смугозагороджуючий фільтри.

Розглянемо спочатку випадок, коли заданою є спектральна щільність напруги. СК являє собою вузькосмуговий процес $u_f(t)$ з великою дисперсією D_{uf} , тому на графіку щільності при кутовій частоті $\omega_f = 2\pi f$ чітко виділяється вузький «імпульс». Його можна або вилучити з масиву щільності або апроксимувати виразом

$$S_{uf}(\omega) = D_{uf} \frac{1}{\pi} \alpha_f \left[\frac{1}{\alpha_f^2 + (\omega + \omega_f)^2} + \frac{1}{\alpha_f^2 + (\omega - \omega_f)^2} \right] \quad (7)$$

з параметрами α_f і ω_f . При нульовому середньому значенні компоненти дисперсія дорівнює квадрату ефективного значення U_{fe} .

Якби компоненти були б некорельованими, то згідно (1) щільність НСК

$$S_{uv}(\omega) = S_u(\omega) - S_{uf}(\omega). \quad (8)$$

Насправді ж компоненти є корельованими, оскільки їх частотні діапазони перетинаються. Тому щільність СК вміщує частку НСК і навпаки. Визначити ці частки по $S_u(\omega)$ неможливо, тому для практичних цілей доводиться використовувати співвідношення (8).

Результат визначення щільності по осцилограмі залежить від вибору виду вагової функції [7]. Тому площа під кривою щільності може і не дорівнювати дисперсії, яку знайдено по осцилограмі. За цієї обставини доцільно спочатку знаходити не щільність, а кореляційну функцію $B_u(\tau)$, значення якої для аргументу $\tau = 0$ співпадає з дисперсією. Виразу (7) відповідає кореляційна функція СК

$$B_{uf}(\tau) = D_{uv} \exp\{-\alpha_f |\tau|\} \cos \omega_f \tau, \quad (9)$$

яка також виділяється без ускладнень. Наочно це видно у випадку періодичного процесу, коли $\alpha_f = 0$ і кореляційна функція (9) є косинусоїдою з частотою ω_f . Імпульс же щільності має нескінченну ординату і нульову ширину.

Щільність СК розраховується згідно з (7) по параметрах кореляційної функції СК. Кореляційна функція НСК дорівнює різниці між $B_u(\tau)$ і (9), а щільність НСК визначається за формулою (8).

Щільність струму КУ і його компонент визначається по відповідним щільностям напруги шляхом помноження їх на квадрат АЧФ (3). Оскільки у діапазоні частот навколо 50 Гц АЧФ практично є постійною, тому у процентах СК струму співпадає з СК напруги, а $S_{icf}(\omega) \approx S_{uf}(\omega)$. Співвідношення між щільностями компонент струму є аналогічним (8), а дисперсія НСК у (%)²

$$D_{icv} = D_{ic} - D_{icf} = D_{ic} - D_{uf}. \quad (10)$$

Використання щільностей не дозволяє виділити СК і НСК, оскільки щільність не дає інформації про фазові співвідношення. Компоненти можна отримати за $u(t)$. Для цього цей процес пропускається через вузькосмуговий фільтр, АЧФ якого при ω_f дорівнює одиниці. Отриманий процес потрібно зсувати за фазою, протилежною значенню фазочастотної функції фільтра при $\omega = \omega_f$, бо інакше процес (1) буде визначено з великою похибкою.

За відсутності низькочастотної НСК доцільно використовувати метод попереднього осереднення з [3], узагальнивши його на випадкові процеси. Для цього на інтервалі $\theta \leq 0,01$ с осереднення прийняти ковзним, а не по циклам. Щоб уникнути фазових зсувів між процесами $u(t)$ і $u_\theta(t)$, осереднення потрібно виконувати у межах від $t - \theta/2$ до $t + \theta/2$. Процес $u_\theta(t)$ має більш виражену СК, що полегшує визначення її кореляційної функції і щільності $S_{u\theta f}(\omega)$. Шукана щільність СК

$$S_{uf}(\omega) = \frac{S_{u\theta f}(\omega)}{A_\theta^2(\omega_f)} = \frac{S_{u\theta f}(\omega)}{\text{sinc}^2(\omega_f \theta/2)}, \quad (11)$$

де $A_\theta(\omega)$ – АЧФ ланки осереднення [2]. При $\theta = 0,01$ с, коли $\omega_f \theta/2 = \pi/2$, АЧФ дорівнює $2/\pi$.

Оцінка ЕМС. Коефіцієнт несинусоїдальності напруги оцінює ЕМС електроприймачів з активною вхідною провідністю. Він є пропорційним відношенню ефективних значень U_{ve} і U_{fa} компонент:

$$K_U = 100 U_{ve} / U_{fa} = 100 \sqrt{D_{uv} / D_{uf}}. \quad (12)$$

Коефіцієнт несинусоїдальності струму КУ

$$K_{IC} = 100\sqrt{D_{iCv}/D_{iCf}} \quad (13)$$

при переваженні високочастотної НСК перевищує (12).

Квадрат ефективного струму КУ

$$I_{Ce}^2 = I_{Cfe}^2 + I_{Cve}^2 = D_{iCf} + D_{iCv} \approx D_{uf} + D_{iCv} \quad (14)$$

має два доданки: перший відноситься до СК і враховує відхилення напруги, а другий – несинусоїдальність напруги. Тому підстановка величини I_{Ce} у (2) дає інтегральну оцінку ЕМС на момент осцилографування.

Однак стандарт [1] допускає підвищення напруги до 110%, що по відношенню до номінальної напруги КУ становить $110/1,05 \approx 105\%$. За цієї обставини, якщо $I_{Cfe} < 105\%$, умову потрібно записати у вигляді

$$\sqrt{105^2 + I_{Cve}^2} \leq 130\%. \quad (15)$$

Слід відзначити, що зростання струму на 30% не можна порівнювати з I_{Cve} – інакше вимога до ЕМС буде значно завищеною. Дійсно, формула (15) дає умову $I_{Cve} \leq 77$, а не 30%.

Додаткові втрати активної потужності в КУ та кратність зниження строку служби розраховуються за формулами (6.36) і (6.37) з [2], в яких ефективний струм вимірюється у процентах до номінального струму КУ.

У якості прикладу на рис. 1 кривими 1 і 2 представлено спектральні щільності напруги і її НСК в електричній мережі, що живить дугову сталеплавильну піч. Для силового конденсатора, параметри якого приведемо в

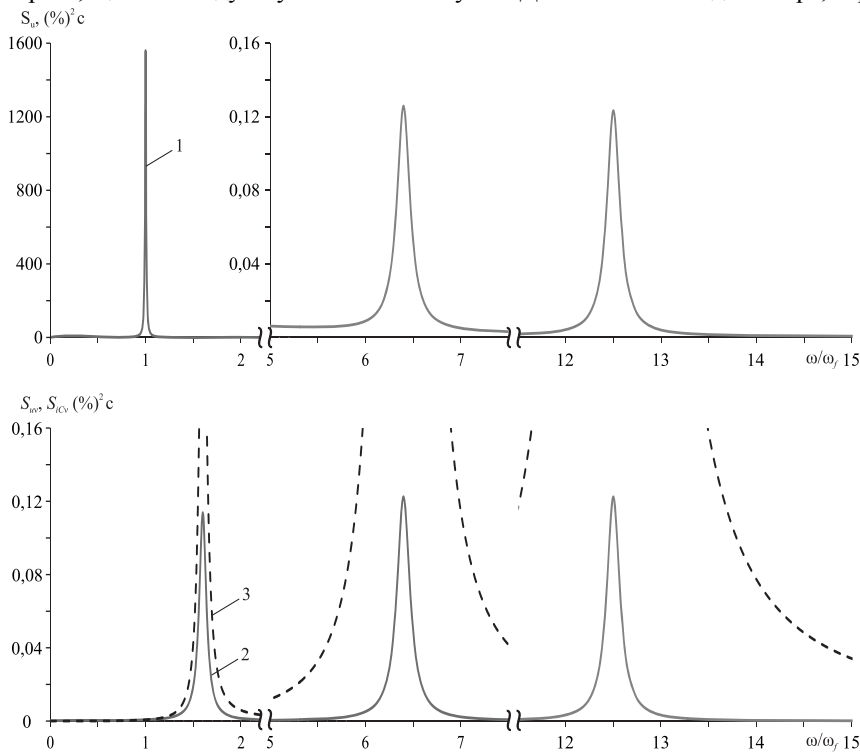


Рисунок 1 - Спектральні щільності напруги і її НСК в електричній мережі

п. 5.4 з [2] було розраховано спектральну щільність струму конденсатора (крива 3). Коефіцієнти несинусоїдальності і струму становлять 5,05 і 45,45%, а ефективне значення струму дорівнює 114,2%. Умова ЕМС (15) виконується.

Висновки. 1. При неперіодичних процесах зміни миттєвих значень напруги поняття синусоїдальної і несинусоїдальної компонент можна вважати визначеним, якщо задати спосіб їх виділення.

2. Для виділення синусоїдальної компоненти потрібно процес зміни напруги пропустити крізь вузько смуговий фільтр з наступною компенсацією фазового зсуву. За відсутності низькочастотної компоненти рекомендується використовувати спосіб попереднього ковзного осереднення. Якщо за умовами задачі достатньо знайти тільки характеристики компонент, доцільно виключити імпульс з кривої спектральної щільності в області малих частот біля 50 Гц.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. . Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт.: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине с 01.01.2000].
2. Кузнецов В.Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куренный, А.П. Лютый. - Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
3. Куренный Э.Г. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии / Э.Г. Куренный, А.П. Лютый // Электричество. - 2005. - №8. – С. 3-9.
4. . Конденсаторы для повышения коэффициента мощности. Общие технические условия. Группа Е. 53: ГОСТ 1282-88. – [Введ. 01.01.89].

5. Куренный Э.Г. Метод парциальных реакций для анализа процессов на выходе линейных фильтров в моделях электромагнитной совместимости / Э.Г. Куренный, А.П. Лютый, Л.В. Черникова // *Электричество*. - 2006. - №10. - С. 11-18.
6. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. - М.: Сов. Радио, 1966. - 678 с.
7. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. М.: Наука, 1986. - 463 с.

REFERENCES

1. GOST 13109-97. Intergovernmental standard. Electric energy. Electromagnetic compatibility of hardware. Standard of electric energy quality in the power supply systems of the general purpose. – Standardize in Ukraine from 01.01.2000.
2. Kuznetsov V.G., Kurenyy E.G., Lyuty A.P. *Electromagnitnaya sovместimost'. Nesimmetriya i nesinusoidal'nost' naprjazheniya* [Electromagnetic compatibility. Voltage unsymmetry and unsinusoidality]. – Donetsk: Nord-Press, 2005. 250 p.
3. Kurenyy E.G., Lyuty A.P. Estimation of voltage unsinusoidality at the analysis of electric power quality // *Electrichestvo*. 2005: №8; P.3-9.
4. GOST 1282-88. Condensers for the increase of power-factor. General technical conditions. Group of E. 53. – Standardize from 01.01.89.
5. Kurenyy E.G., Lyuty A.P., Chernikova L.V. Method of partial reactions for the analysis of processes on the output of linear filters in the models of electromagnetic compatibility // *Electrichestvo*. 2006; №10: 11-18.
6. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [The Statistical radio engineering]. – М.: Sovetskoe radio, 1966. 678 p.
7. Sveshnikov A.A. *Prikladnye metody teorii sluchajnih funktsij* [The applied methods of theory of random functions]. – М.: Nauka, 1986. – 463 p.

Надійшла до редакції 26.03.2013

Рецензент: Е.Г. Курінний

Е.Н. ДМИТРИЕВА¹, И.И. ЛАРИНА¹, А.П. ЛЮТЫЙ²

¹ Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

² ОАО «Днепроспецсталь»

Оценивание электромагнитной совместимости по несинусоидальности напряжения в действующих сетях. Рассматривается задача оценивания ЭМС при непериодических искажениях синусоидальности напряжения. Показывается неопределенность понятия синусоидальной и несинусоидальной компонент. Предлагаются способы устранения неопределенности: путем выделения синусоидальной составляющей корреляционной функции или предварительного осреднения кривой напряжения. Приводится пример оценивания ЭМС конденсаторной установки.
Ключевые слова: ЭМС, несинусоидальность, корреляционная функция, спектральная плотность, синусоидальная и несинусоидальная компоненты, воздействие на конденсаторную установку.

E. DMITRIEVA¹, I LARINA¹, A. LYUTY²

¹ State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

² Public Corporation “Dneprospetsstal”

Evaluation of Electromagnetic Compatibility for Nonsinusoidal Voltage in Functioning Networks. Voltage unsinusoidality causes the additional losses of active power and reduction of electrical equipment service life. For the estimation of these effects it is necessary to select two components from voltage oscillogram: sinusoidal (SC) with frequency 50 Hz and nonsinusoidal (NSC). For periodic processes this task is decided unequivocally: by decomposition in the Fourier series. However in operating electric networks the processes are unperiodical. The notion “harmonic” is absent for them. Therefore the estimation of EMC by “harmonics” and “interharmonics” is mathematically incorrect, and task of separation the components is theoretically indefinite. The methods of elimination of uncertainty are considered in the article, and the estimation of EMS of the condenser setting is as an example given. The spectral density of voltage is used in the first method of SC separation. Such possibility is conditioned that in a neighbourhood of frequency 50 Hz the very narrow impulse is observed on the density graphic. It is considered the spectral density of SC. The spectral density of NSC is determined as a difference of densities. In the second method the SK is separated by a narrow-band filter on frequency 50 Hz with subsequent compensation of phase shift. In the absence of low-frequency distortions it is suggested to use continuous averaging of voltage on an interval no more than 0,01 s without a phase shift. Reduction of process ordinates after averaging is compensated by their division into the amplitude-phase characteristic value of averaging window at frequency 50 Hz. NSC is determined by subtraction of obtained SC from an initial process. The condenser setting is designed as three series connected links: proportional, forced and oscillatory. EMC is estimated by effective current, which must not exceed 130 % from rated. The effective current and its components are calculated on the appropriate spectral densities either on SC or NSC of voltage. In last case it is recommended to use the method of partial reactions, where the model of condenser setting is offered by two in-parallel inertia links of the first order. An example of EMC estimation of the condenser setting during work of arc steel-making furnace is given.

Key words: EMC, nonsinusoidality, correlation function, spectral density, sinusoidal and nonsinusoidal components, the capacitor installation's influence.