

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЛЬНИХ ЛАМП ЗА ДОЗОЮ ФЛІКЕРУ НАПРУГИ

Ленко В.Г.

Донецький національний технічний університет

[edek@dgtnu.donetsk.ua](mailto:edek@dgtnu.donetsk.ua)

The task of estimation of electromagnetic compatibility (EMC) of lamps is considered. The lamps parameters are differed from standard in IEC flicker-model. It's shown, that power-saving lamps are considerable improved EMC by voltage flicker dose.

**Постановка задачі.** Коливання діючих значень напруги викликають коливання діючих значень освітлення, які додатково втомлюють людину, що призводить до погіршення зору та зменшення продуктивності праці. Універсальним показником коливань є доза флікеру напруги [1], яка оцінює ці негативні ефекти.

Доза флікеру вимірюється флікерметром [2], до складу якого неявно входить стандартна лампа розжарювання PL-60 потужністю 60 Вт, напругою 230 В, заповнена інертним газом [3]. Введення стандартної лампи для задачі нормування є цілком обґрунтованим. Дійсно, при стандартизації неможливо врахувати параметри усіх ламп, тому умовно вибирають якусь одну лампу. Це дозволяє оцінювати EMC у точках комерційного обліку електроенергії за єдиним показником – з метою розмежування відповідальності за порушення EMC між енергопостачальною організацією і споживачем, не зважаючи на те, що освітлення виконується зовсім іншими лампами.

Для споживача ж актуальною є ще і інша задача: для конкретних ламп, що застосовуються у виробництві або побуті, потрібно розраховувати фактичні дози флікеру, що і є метою статті\*. Соціальні та економічні показники в функції дози флікеру будемо вважати відомими. Відмітимо лише, що окрім витрат на засоби зменшення коливань напруги і збитків від зменшення продуктивності праці людини доцільно встановити розрахунковий збиток від погіршення зору людини.

Для короткості розглядається окремий випадок гармонічних коливань, у разі якого методи гармонійного аналізу є найбільш ефективними, а аналітичне рішення – гранично простим. У загальному випадку доцільно застосовувати метод парціальних реакцій [4].

**Базовий зважувальний фільтр.** Модель флікеру з [2] є базовою для вирішення задачі. Її основу становить зважувальний фільтр, який моделює реакцію зору  $Y(t)$  на коливання напруги  $\Delta U(t)$ . Згідно [5] до його складу входять три фільтри: ФВЧ – вищих і ФНЧ – нижчих частот, ФСК – фільтр сприйняття коливань\*\* (рис. 1). Інші складові моделі флікеру розглянуто у додатку.

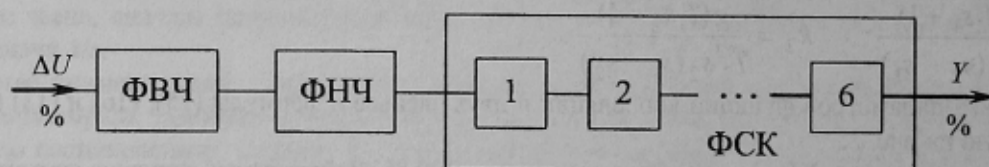


Рисунок 1 – Структурна схема зважувального фільтра

До ФСК входять послідовно з'єднані ланки: 1 – пропорційна з коефіцієнтом передачі  $k = 1,74802$ , 2 – коливальна зі сталими часу  $T_{k1} = 0,015418$  і  $T_{k2} = 0,017385$  с, 3 – диференціююча з  $T_k$ , 4 – форсуюча з  $T_\phi = 0,069811$  с, 5 і 6 – інерційні (аперіодичні) з одиничними коефіцієнтами передачі і сталими часу  $T_{i1} = 0,12989$  і  $T_{i2} = 0,007267$  с.

Амплітудно-частотна функція (АЧФ) базового ФСК дорівнює добутку АЧФ усіх ланок:

$$A_{\text{бск}}(\lambda) = 0,19094\lambda \sqrt{\frac{1 + 0,1924\lambda^2}{\left[ (1 - 0,01193\lambda^2)^2 + 0,009385\lambda^2 \right] (1 + 0,666\lambda^2) (1 + 0,002085\lambda^2)}}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – частота коливань, Гц.

Відомо [6], що фільтр нижчих частот  $n$ -го порядку з частотою зрізу  $\lambda_n$  при  $\lambda_n = \lambda/\lambda_n$  має АЧФ

\* Авторка вдячна професору Курінному Е.Г. за постановку задачі.

\*\* В [2] під зважувальним фільтром розуміється лише ФСК, а фільтри вищих і нижчих частот виділяються окремо.

$$A_{\text{нч}}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_*^{2n}}}$$

Можна показати, що АЧФ фільтру вищих частот  $n$ -го порядку становить

$$A_{\text{вч}}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/\lambda_*^{2n}}} = \frac{\lambda_*^n}{\sqrt{1 + \lambda_*^{2n}}}$$

У флікерметрі вищі частоти заглушуються фільтром Батерворта шостого порядку з частотою зрізу 35 Гц, у якого

$$A_{\text{нч}}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_*^{12}}} \quad (2)$$

Фільтр вищих частот першого порядку має  $\lambda_* = 0,05$  Гц і АЧФ

$$A_{\text{нч}}(\lambda) = \frac{\lambda_*}{\sqrt{1 + \lambda_*^2}} = \frac{20\lambda}{\sqrt{1 + 400\lambda^2}} \quad (3)$$

АЧФ базового зважувального фільтру

$$A_{\text{б}}(\lambda) = A_{\text{вч}}(\lambda) A_{\text{бск}}(\lambda) A_{\text{нч}}(\lambda) \quad (4)$$

Реакція зору вимірюється у процентах. Для переходу до відносних одиниць (в.о.) її ординати помножують на коефіцієнт  $k_y = 16$  (%)<sup>-1</sup>. Слід відзначити, що в [5] допущено описку у розмірності цього коефіцієнту.

**Фактичні зважувальні фільтри.** На необхідність врахування параметрів фактичних ламп вказувалося в [7], а потім у [8]. Очевидно, що для цього з ФСК базової моделі потрібно виключити модель стандартної лампи і додати модель фактичної [5]. Оскільки в (1) АЧФ  $A_{\text{л}}(\lambda)$  стандартної лампи у явному вигляді не виділено, для врахування фактичної лампи з АЧФ  $A_{\text{л}}(\lambda)$  в ФСК необхідно додати коректувальний блок з АЧФ

$$A_{\text{к}}(\lambda) = A_{\text{л}}(\lambda) / A_{\text{лс}}(\lambda) \quad (5)$$

Діапазон коливань є малим, тому моделі ламп можна лінеаризувати. Звичайно лампи моделюються інерційною ланкою з параметрами  $k_n$  і  $T_n$  або ланкою другого порядку з коефіцієнтом передачі  $k_n$  і двома сталими часу  $T_{n1}$ ,  $T_{n2}$ . В [8] прийнято такі параметри моделі стандартної лампи:  $k_{\text{лс}} = 1,9$  (у табл. 3 з [8] – 1,87) і  $T_{\text{лс}} = 0,023$  с, якій відповідає АЧФ

$$A_{\text{лс}}(\lambda) = \frac{k_{\text{лс}}}{\sqrt{1 + 4\pi^2\lambda^2 T_{\text{лс}}^2}} = \frac{1,9}{\sqrt{1 + 0,0209\lambda^2}} \quad (6)$$

З урахуванням (5) замість (4) отримаємо АЧФ

$$A_{\text{к}}(\lambda) = A_{\text{вч}}(\lambda) A_{\text{бск}}(\lambda) A_{\text{нч}}(\lambda) A_{\text{л}}(\lambda) / A_{\text{лс}}(\lambda) \quad (7)$$

фактичного зважувального фільтру. Таким чином, кожній лампі буде відповідати своя флікер-модель, яка буде відрізнятися від інших і базової моделі параметрами ФСК.

Зараз для освітлення ще широко застосовуються лампи розжарювання (індекс «лр»), які моделюються інерційною ланкою. У цьому випадку формула (5) дає АЧФ

$$A_{\text{клр}}(\lambda) = \frac{k_{\text{лр}}}{k_{\text{лс}}} \sqrt{\frac{1 + 4\pi^2\lambda^2 T_{\text{лс}}^2}{1 + 4\pi^2\lambda^2 T_{\text{лр}}^2}} = 0,5263 k_{\text{лр}} \sqrt{\frac{1 + 0,0209\lambda^2}{1 + 4\pi^2\lambda^2 T_{\text{лр}}^2}} \quad (8)$$

У звичайних ламп розжарювання коефіцієнт передачі дорівнює 3,6 (у [3] – від 3,4 до 3,8). Це у  $3,6 / 1,9 = 1,89$  разів перевищує параметр стандартної лампи, що потрібно враховувати при оцінюванні ЕМС. Сталі ж часу  $T_{\text{лр}}$  відрізняються мало. Так, за даними Яговкіна Г.М. (1971 р.), стала часу лампи потужністю  $P_n = 15$  Вт дорівнює 0,01 с, а 500 Вт – 0,1 с. Якщо у першому наближенні залежність сталої часу від номінальної потужності вважати лінійною:

$$T_n \approx 1,856 \cdot 10^{-4} P_n + 0,007216,$$

то при аргументі 60 Вт вона дасть значення 0,0184 с, яке на 20 % менше за 0,023 с.

У розрахунках потрібно використовувати фактичні параметри ламп. При їх відсутності для  $P_n \geq 15$  Вт можна застосовувати вираз

$$T_n \approx -2 \cdot 10^{-7} P_n^2 + 0,0003 P_n + 0,0055,$$

який було отримано нами шляхом комп'ютерної поліноміальної апроксимації точок (15; 0,01), (60; 0,023) і (500;

0,1). Позитивна якість цього виразу полягає у тому, що для лампи 60 Вт він дає значення 0,02278 с, яке усього на 1 % менше за 0,023 с (при 15 і 100 Вт похибки становлять -0,45 і 5,5 %).

Люмінесцентні лампи (індекс «ЛЛ») мають коефіцієнт передачі  $k_{лл}$  від 1,25 до 1,5 і малі сталі часу, які звичайно приймають рівними нулю. Це дозволяє моделювати їх пропорційною ланкою. У цьому випадку АЧФ (5)

$$A_{клл}(\lambda) = \frac{k_{лл}}{k_{лс}} \sqrt{1 + 4\pi^2 \lambda^2 T_{лс}^2} = 0,7895 k_{лл} \sqrt{1 + 0,0209 \lambda^2}. \quad (10)$$

У [8] для енергозберігаючої лампи ESL 11 потужністю 11 Вт запропоновано модель у вигляді коливальної ланки. З урахуванням формули (4) і даних табл. 3 з цієї статті\*, отримаємо АЧФ (індекс «ЛЗ»)

$$A_{лз}(\lambda) = \frac{k_{лз}}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 \lambda^2 T_{лз2}^2)^2 + 4\pi^2 \lambda^2 T_{лз1}^2}}, \quad (11)$$

де  $k_{лз} = 0,455$ ,  $T_{лз1} = 0,005382$  с,  $T_{лз2} = 0,002894$  с.

АЧФ коректувального блоку

$$A_{ккз}(\lambda) = 0,2395 \sqrt{\frac{1 + 0,0209 \lambda^2}{(1 - 3,3064 \cdot 10^{-4} \lambda^2)^2 + 0,0011435 \lambda^2}}. \quad (12)$$

Сталі часу енергозберігаючих ламп дуже малі, тому виникає питання про можливість дорівнювання їх нулю. У цьому випадку замість (11) і (12) отримуємо приблизні вирази:

$$A_{лз}(\lambda) \approx k_{лз} = 0,455; \quad A_{ккз}(\lambda) \approx 0,2395 \sqrt{1 + 0,0209 \lambda^2}. \quad (13)$$

Відносна похибка

$$\delta(\lambda) = \left[ \frac{0,455}{A_{ккз}(\lambda)} - 1 \right] 100$$

їх використання залежить від частоти. В [1] допускається похибка вимірювання доз флікеру у 5 %. З урахуванням (12) для цього значення розрахуємо максимальну частоту 14,25 Гц, при якій ще похибка не перевищує 5 %. При більших частотах використовувати (13) не можна.

**Доза флікеру.** Розрахунок доз флікеру від гармонічних коливань виконаємо загальним методом з [5] з урахуванням формул з додатку.

Амплітуда  $B$  коливань у 2 рази менша за їх розмах  $\delta U$ . На виході зважувального фільтру у стаціонарному режимі реакція буде мати амплітуду

$$B_f = BA(\lambda) \quad (14)$$

і таку ж саме частоту. Для базової моделі в (14) треба підставити вираз (4).

Процес після квадратора має постійну складову

$$B_z = k_f^2 B_f^2 / 2 = k_f^2 B^2 A^2(\lambda) / 2 \quad (15)$$

і гармонічну складову з амплітудою  $B_z$  та подвійною частотою. Інерційна ланка з АЧФ (Д.1) постійну складову не змінює, а амплітуду зменшує до величини

$$B_s = B_z A_{ж}(\lambda). \quad (16)$$

Рівні зорового відчуття, які відповідають заданим значенням інтегральних ймовірностей  $E$ , визначаються формулою (11) з [5], яку запишемо у більш компактному вигляді:

$$P = B_z + B_s \cos(\pi E / 100). \quad (17)$$

Формула (17), а також формули (Д.2) і (Д.3) з додатку дозволяють розраховувати дози.

**Порівняння ламп.** Для визначеності за дозою флікеру порівняємо такі лампи: стандартну і звичайну з однаковими потужностями 60 Вт, люмінесцентну та енергозберігаючу лампу 11 Вт.

На рис. 2 показано криву 1, що розрахована за формулою (4) для АЧФ базового ФСК у межах частот від 0,05 до 25 Гц, які вказані в табл. 1 з [2]. Звичайна лампа розжарювання має таку ж саме сталу часу, що і стандартна, а тому положення максимуму відповідної АЧФ остається незмінним (крива 2). Проте її ординати є більшими у 1,89 разів. Стала часу люмінесцентної лампи значно менша, що призводить до зсуву максимуму АЧФ

\* При виведенні формули (14) виправлено опіску з [8], де формула (4) для передавальної функції має розмірність  $c^2$ , що не є вірним.

вправо (крива 3,  $T_{лп} = 0$ ). Коефіцієнт передачі цієї лампи у  $1,9 / 1,5 = 2,784$  разів менший, тому у великому діапазоні частот крива 3 розташована під кривою 2.

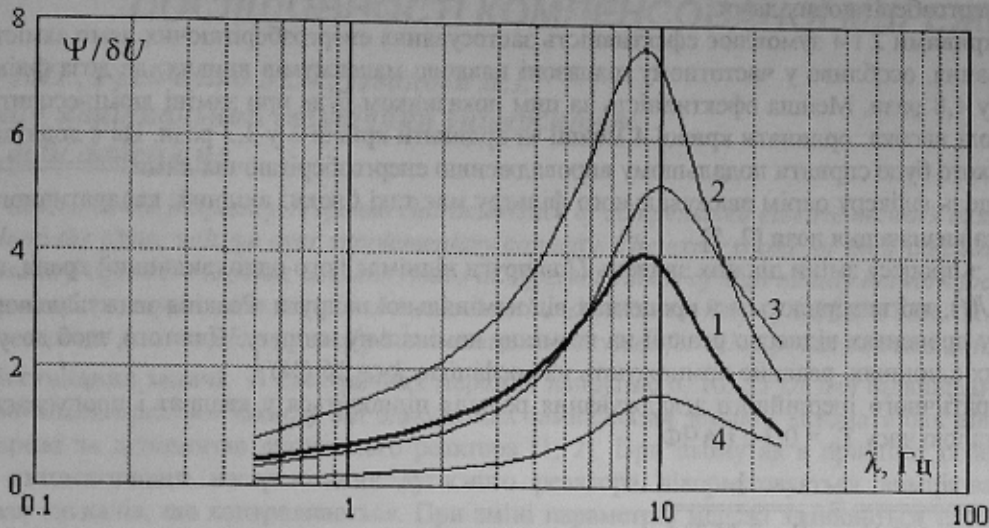


Рисунок 2 – АЧФ фільтрів сприйняття коливань для різних ламп

Стала часу затухання коливань перехідної функції

$$T_{мз} = 2T_{лс2}^2 / T_{м1} = 0,0031 \text{ с}$$

також значно менша за 0,023 с, тому АЧФ (крива 4) якісно подібна до кривої 3, але вона розташована нижче, бо коефіцієнт передачі менший, ніж у люмінесцентної лампи: 0,455 замість 1,5.

Відповідні залежності доз флікеру від частоти представлено на рис. 3. Дози для флікер-моделі зі стандартною лампою (крива 1) у 1,89 разів менші, ніж моделі зі звичайною лампою (крива 2). Менші сталі часу люмінесцентної та енергозберігаючої ламп є фактором, який збільшує дозу, але менші коефіцієнти передачі, навпаки, дозу зменшують (криві 3 і 4).

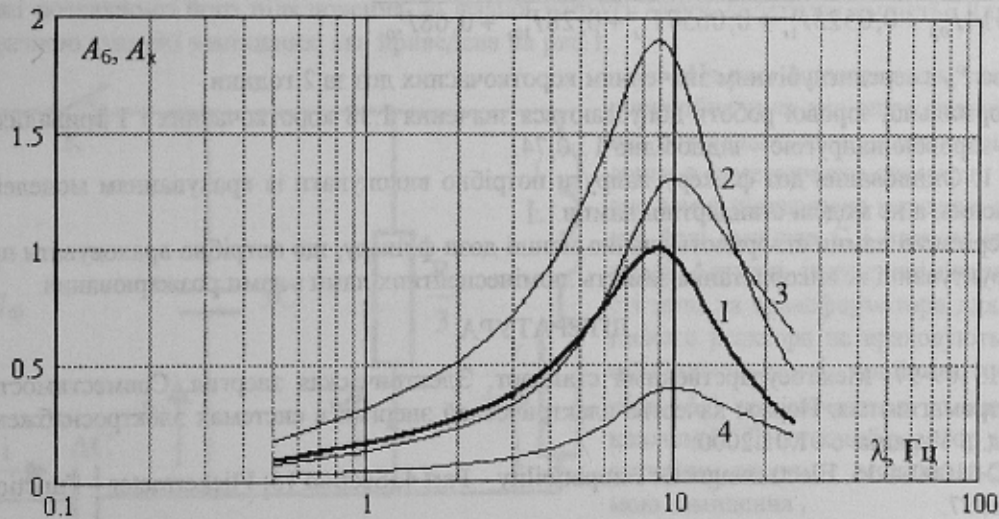


Рисунок 3 – Дози флікеру при гармонічних коливаннях для різних ламп

Ординати кривих на рис. 3 визначено у відносних одиницях. Для розрахунку доз флікеру при заданому розмаху достатньо помножити їх на цей розмах. Наприклад, при  $\delta U = 0,25\%$  максимум кривої 1 дорівнює одиниці, що відповідає даним табл. 1 з [2].

В [5] було висловлене припущення щодо можливості в інженерних розрахунках перераховувати дози по відношенню коефіцієнтів передачі  $k_n$  без врахування різниці у сталих часу. У випадку, який розглядається, це означає, що, наприклад, відношення ординат 3 і 1 на рис. 3 повинно бути однаковим для всього частотного діапазону і дорівнювати  $0,455 / 1,9 = 0,24$ . Насправді ж воно зростає від 0,24 при 0,05 Гц до 0,775 при 25 Гц. Це свідчить про неможливість такого спрощення – принаймні при великих розбіжностях у сталих часу, що притаманно люмінесцентним і енергозберігаючим лампам. Такий перерахунок можливий для ламп розжарювання у вузькому діапазоні потужностей: приблизно від 50 до 70 Вт – з похибкою, яка не перебільшує 5%.

Рис. 3 наочно показує необхідність врахування фактичних параметрів ламп: звичайна лампа 60 Вт має таку ж потужність, що і стандартна, але вона створює більші у 1,89 рази дози флікеру. Навпаки, результати вимірювань доз флікерметром зі стандартною лампою значно збільшують вимоги до ЕМС за цим показником для люмінесцентних і енергозберігаючих ламп.

Різниця між кривими 2 і 4 зумовлює ефективність застосування енергозберігаючих ламп замість звичайних ламп розжарювання, особливо у частотному діапазоні навколо максимумів кривих, де доза флікеру зменшується приблизно у 4,8 рази. Менша ефективність за цим показником буде при заміні люмінесцентних ламп, але вона все же доволі висока: ординати кривої 4 менші за ординати кривої 3 у 3,3 рази. Це є додатковим фактором, врахування якого буде сприяти подальшому впровадженню енергозберігаючих ламп.

**Додаток.** Модель флікеру окрім зважувального фільтру має такі блоки: вхідний, квадратичного інерційного згладжування та визначення дози [2, 5].

Вхідний блок з процесу зміни діючих значень  $U$  напруги віднімає його однохвилинний тренд, що дає коливання напруги  $\Delta U(t)$ , які вимірюються у процентах від номінальної напруги. Реакція зважувального фільтру також вимірюється у процентах відносно реакції на незмінну номінальну напругу. Для того, щоб дозу коливань виражати у відносних одиницях, реакцію помножують на коефіцієнт  $k_{\gamma} = 16 (\%)^{-1}$ .

У блоці квадратичного інерційного згладжування реакція підноситься у квадрат і пропускається через інерційну ланку зі сталою часу  $T_{\text{in}} = 0,3$  с і АЧФ

$$A_{\text{ж}}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi\lambda T_{\text{in}})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3,553\lambda^2}} \quad (\text{Д.1})$$

Процес  $S(t)$  на виході блоку називається зоровим відчуттям. В блоці визначення дози за кожні 10 хв розбудовується впорядкована діаграма зорового відчуття, абсциси  $E$  якої виражаються у процентах від часу запису, тобто є інтегральними ймовірностями. По заданих ймовірностях 0,1; 0,7; 1; 1,5; 2,2; 3; 4; 6; 8; 10; 13; 17; 30; 50 і 80% на діаграмі знаходять відповідні «рівні флікеру»  $P$ . Рівень  $P_{0,1}$  приймається без осереднення, а інші рівні осереднюються:

$$P_{1,5} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3, \quad P_{3,3} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3, \quad (\text{Д.2})$$

$$P_{10,3} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5, \quad P_{50,3} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3.$$

Короткочасні дози розраховуються за емпіричною формулою

$$P_{\text{ст}} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1,5} + 0,0657P_{3,3} + 0,28P_{10,3} + 0,08P_{50,3}} \quad (\text{Д.3})$$

Тривала доза  $P_{\text{т}}$  є середнекубічним значенням короткочасних доз за 2 години.

В [1] для нормальної зорової роботи допускаються значення 1,38 короткочасних і 1 тривалих доз, а для роботи зі значною зоровою напругою – відповідно 1 і 0,74.

**Висновки.** 1. Оцінювання доз флікеру напруги потрібно виконувати із врахуванням моделей ламп, які здійснюють освітлення, а не моделі стандартної лампи.

2. Енергозберігаючі лампи створюють значно менші дози флікеру, що потрібно враховувати при техніко-економічному обґрунтуванні їх використання замість люмінесцентних ламп і ламп розжарювання.

#### ЛІТЕРАТУРА

- ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
- CEI/IEC 61000-4-15. Electromagnetic compatibility – Part 4, Section 15: Flickermeter – Functional and design specification. 1997.
- Mirra C., Sani G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misura e metodi di limitazione. – L'Elettrotecnica. – 1987. – P. 805-822.
- Kourennyi E.G., Petrosov V.A., Chernikova L.V. Linear filtration on random processes in EMC models: the "partial reaction" method. – Fifteenth International Wroclaw symposium and exhibition: Electromagnetic compatibility 2000. – Wroclaw: National Institute of Telecommunications, 2000, part II. Pp. 587-590.
- Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Куренный Д., Цыганкова Н.В. Совершенствование модели фликера. – Электричество, 2003, № 2. С. 17-23.
- Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
- Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984. – 271 с.
- Brauner G., Hennerbichler C. Lamp models for flicker simulation and illumination planning. – Fifth International Conference: Electrical Power Quality and Utilization. – Cracow, 1999.