

ВИСОКОЧАСТОТНА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ЛАМПИ

Запропоновано динамічну модель люмінесцентної лампи при її високочастотному живленні. Модель подано у вигляді PSpice-сумісної імітаційної моделі та у вигляді диференціального імпедансу, який характеризує зв'язок між огинаючими високочастотних напруги і струму лампи. Модель призначена для імітаційного моделювання та аналізу стійкості високочастотних електронних пускорегулювальних апаратів, виконаних за замкнутою чи розімкненою структурами.

Ключові слова: високочастотне живлення, люмінесцентна лампа, диференціальний імпеданс, динамічна модель.

А.М. LUPENKO

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

HIGH-FREQUENCY DYNAMIC MODEL OF FLUORESCENT LAMP

Abstract - The dynamic model of fluorescent lamp operating at high frequency is considered. The model is presented as PSpice-compatible simulation model and in terms of lamp incremental impedance. The model parameters may be simply obtained from lamp dynamic V-A characteristics. The model can be useful for simulation and stability analysis of open and closed-loop high frequency lamp electronic ballast systems. The model is in a good agreement with experimental results.

Key words: high-frequency operation, fluorescent lamp, differential impedance, dynamic model.

Постановка проблеми. Сучасні високоякісні високочастотні електронні пускорегулюючі апарати (ЕПРА) для люмінесцентних ламп (ЛЛ) з регулюванням світлового потоку виконують за замкнутою структурою, в якій ЛЛ є об'єктом регулювання. Одним із основних питань побудови таких структур є забезпечення стабільної роботи комплексу ЕПРА – ЛЛ в умовах дії зовнішніх збурень та керуючих впливів. Для цього необхідно знати як передавальні функції як всіх структурних вузлів ЕПРА, так і ЛЛ як об'єкта регулювання. В пускорегулювальних апаратах ЛЛ є нелінійним і інерційним об'єктом регулювання. Тому створення моделі люмінесцентної лампи, яка б враховувала ефекти її нелінійності та інерційності є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі математичні моделі ЛЛ [1-3] у вигляді диференціальних рівнянь є безумовно важливими для опису фізичних процесів в ЛЛ, але надто громіздкими для практичного використання в процесі аналізу та проектування ЕПРА в комплекті з ЛЛ.

Значно простішою для проведення імітаційного моделювання є модель [4], що описує динамічні властивості ЛЛ у вигляді комплексного диференціального імпедансу, який характеризує зв'язок між огинаючими високочастотних напруги і струму лампи. Дана модель базується на представленні ЛЛ у вигляді елемента електричного кола з резистивним і інерційним характером. Але в цій моделі не враховано нелінійність динамічних вольт-амперних характеристик (ВАХ) лампи, що значно, більше ніж в два рази, занижує значення модуля комплексного диференціального імпедансу. Тому використання такої моделі дає велику має велику похибку, що зменшує її цінність при аналізі стійкості ЕПРА.

В роботі [5] запропоновано модель у вигляді диференціального імпедансу лампи, який отримано на основі врахування нелінійності ВАХ ЛЛ. При цьому для опису динамічної характеристики ЛЛ застосовано її параболічну апроксимацію. Тому модель [5] демонструє суттєво вищий ступінь адекватності, ніж модель [4]. Так у моделі [4] добре узгоджується з експериментом лише фазо-частотна залежність диференціального імпедансу, тоді як в моделі [5] добре узгоджуються як фазо-частотна, так і амплітудно-частотна залежності.

Однак, як показує порівняння експериментальних даних із теоретичними, наведеними в [5], є можливість підвищення точності моделі за рахунок застосування степеневі функції з показником степеня, відмінним від 2.

Метою роботи є удосконалення моделі ЛЛ як об'єкта керування в режимі малого сигналу на основі опису динамічної нелінійності ЛЛ степеневою функцією, що дасть змогу підвищити точність моделі та застосувати відомі методи теорії автоматичного керування для аналізу і проектування замкнутих структур ЕПРА в комплекті з ЛЛ.

Виклад основного матеріалу. На ділянці високочастотного (ВЧ) дугового розряду ВАХ ЛЛ поводить себе як резистор із від'ємним диференціальним опором. Опір ЛЛ залежить від діючого значення струму I лампи, тобто від її потужності. При зміні потужності ЛЛ в межах $(100 \div 30)\%$ від номінальної статичну ВАХ лампи із достатньою для практики точністю можна апроксимувати прямою лінією [4].

З аналізу динамічних ВЧ ВАХ люмінесцентних, наведених на рис.1, витікає, що в тому ж діапазоні потужностей і амплітудні значення напруги U_m та струму I_m , тобто огинаюча сімейства ВАХ також лежать на прямій лінії. Спрощено це показано на рис.2 у вигляді прямої AB . Нахил прямої визначається від'ємним диференціальним опором R_s лампи. Ця пряма задовільняє рівнянню:

$$I_m(R_{ek}+R_s)=U_{sm}, \quad (1)$$

де $R_{ek}=U_m/I_m$ - еквівалентний опір лампи при даній потужності ЛЛ, U_{sm} – напруга в точці перетину

апроксимаційної прямої AB із віссю напруг. Диференціальний опір R_s лампи визначається з ВАХ (рис.2):

$$R_s = \frac{U_{sm} - U_m}{I_m} = \operatorname{tg} \beta. \quad (2)$$

Прийемо U_{sm} і R_s – за параметри ЛЛ. Для еквівалентного опор запишемо :

$$R_{ек} = \frac{U_{sm}}{I_m} - R_s = \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

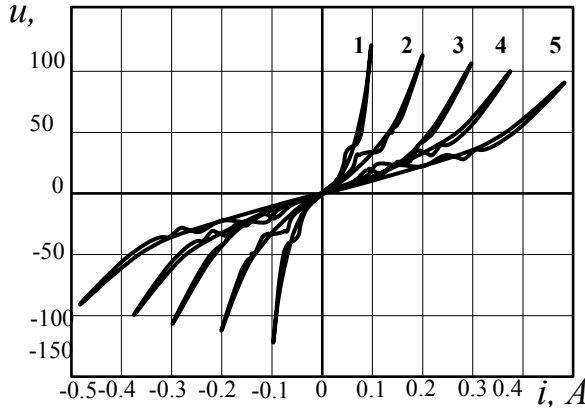


Рис.1. Динамічні ВАХ лампи PHILIPS TLD 18W/54 для п'яти потужностей: 1- 4,8 Вт, 2- 8,5 Вт, 3 – 12,5, 4 –15 Вт, 5 – 18 Вт

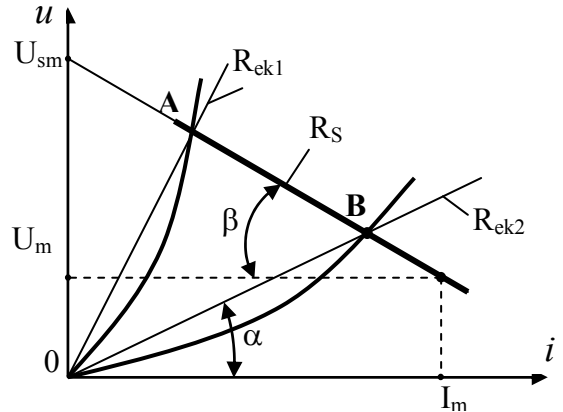


Рис.2. Апроксимація динамічних ВАХ ЛЛ: AB – огинаюча ВАХ; прями OA, OB – ВАХ лінійної моделі; параболи OA, OB – ВАХ нелінійної моделі

Вважаючи лампу в області ВЧ в першому наближенні як лінійний об'єкт, її спрощені динамічні ВАХ можна зобразити прямими лініями OA, OB , нахил яких визначається опором $R_{ек}$. Однак, при цьому втрачаються нелінійні ефекти лампи. Для підвищення ступеня адекватності моделі лампи врахуємо нелінійність її динамічних ВАХ. Виходячи з розгляду різноманітних варіантів апроксимації ВАХ, наведеного в [6], можна вважати степеневу залежність між миттєвими значеннями напруги u і струму i компромісним варіантом стосовно точності та складності моделі, а саме:

$$|u| = k i^\alpha, \quad (4)$$

де $|u|$ - модуль напруги u на лампі; k – апроксимаційний коефіцієнт, який є параметром лампи; α – показник степеневі апроксимаційної функції, який залежить від типу лампи і підлягає визначенню, причому $\alpha > 1$.

Для амплітуди напруги на лампі запишемо співвідношення:

$$k I_m^\alpha = R_{ек} I_m. \quad (5)$$

Враховуючи (3) - (5), запишемо вираз для коефіцієнта k :

$$k = \frac{R_{ек}}{I_m^{\alpha-1}} = \frac{U_{sm} - I_m R_s}{I_m^\alpha}. \quad (6)$$

Тоді динамічна ВАХ може бути описана виразом:

$$|u| = \frac{U_{sm} - I_m R_s}{I_m^\alpha} i^\alpha, \quad (7)$$

або

$$i = \operatorname{sign}(u) \left(\frac{(\sqrt{2}I)^\alpha |u|}{U_{sm} - \sqrt{2}IR_s} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (8)$$

де I – діюче значення струму лампи.

Інерційні властивості ЛЛ на ВЧ, як і в роботі [5], враховуємо в імітаційній моделі шляхом введення інтегруючої RC -ланки, параметри якої визначаються, виходячи із часів релаксації в газовому розряді ЛЛ [7], або експериментальним шляхом (див. нижче). RC -ланка приймає участь у формуванні діючого значення струму. Слід вказати, що в такому підході є прихований дефект, пов'язаний із формуванням амплітуди струму I_m через діюче значення струму I у вигляді $I_m = \sqrt{2}I$, що є справедливим для синусоїдних струмів. Але при роботі ЛЛ на ВЧ цей дефект, враховуючи резонансні властивості інвертора, як показує порівняння результатів моделювання із експериментальними даними, незначно впливає на адекватність моделі.

Імітаційна модель лампи (рис.3) реалізована в середовищі PSpice системи схмотехнічного моделювання Мігросар-6. ЛЛ подано у вигляді функціонального генератора струму G1. Керуючий сигнал генератора G1 формується функціональними генераторами напруги E1, E2, E3. Генератор E1 формує

напругу, яка чисельно дорівнює квадрату миттєвого струму лампи i^2 . Ця напруга прикладена до інтегруючої RC-ланки, на виході якої для частот $\omega > 1/RC$ і часу $t > RC$ формується напруга U_p вузла **p**, яка чисельно дорівнює квадрату діючого значення струму лампи I^2 :

$$U_p = \frac{1}{T} \int_0^T [i(G1)]^2 dt. \tag{9}$$

На виході генератора напруги E2 (вузол **rms**) формується напруга, що чисельно дорівнює діючому значенню струму I . Генератор E3 формує напругу (вузол **I**) відповідно до виразу (8), чисельне значення якої присвоюється струму генератора G1. Струм генератора G1 відповідає миттєвому струму ЛЛ. В моделі (рис.3) ЛЛ використано параметри ЛЛ, визначені за динамічними ВАХ (рис.1), а саме: $U_{sm}=130V$ та $R_s=84$ Ом. Коефіцієнт $\alpha=2,1$ визначено за експериментальними даними, які наведено нижче. На рис.4 показано результати моделювання динамічної ВАХ, які добре узгоджуються з результатами експерименту (рис.1).

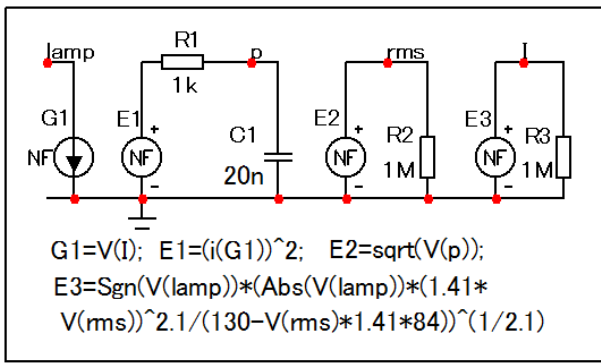


Рис. 3. Схема моделі ЛЛ

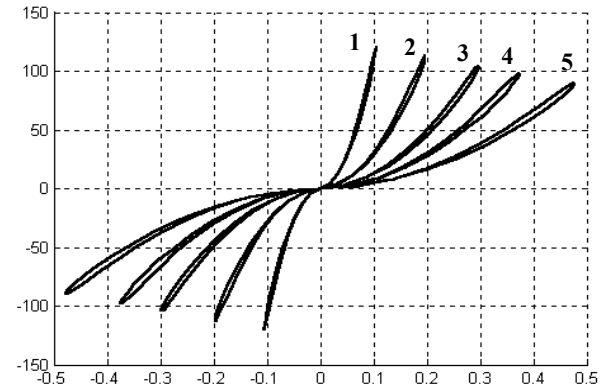


Рис.4. Динамічні ВАХ моделі для п'яти потужностей: 1- 4,8 Вт, 2- 8,5 Вт, 3 – 12,5, 4-15 Вт, 5 – 18 Вт

Математична модель в режимі малого сигналу

Для побудови моделі ЛЛ в режимі малого сигналу приймемо до уваги, що керування потужністю ЛЛ викликає зміни амплітуд її струму і напруги. Наявність в ЕПРА коливного контуру з добротністю більшою від одиниці дає підстави вважати, що "несуча" високочастотного живлення є близькою до синусоїди, а ЕПРА здійснює низькочастотну амплітудну модуляцію (АМ) ВЧ живлення ЛЛ в процесі регулювання її потужності.

У разі синусоїдної модуляції співвідношення між амплітудами та фазами огинаючих напруги і струму ЛЛ при зміні частоти модуляції можна описати за допомогою комплексного опору стосовно огинаючих – диференціального імпедансу. Диференціальний імпеданс відповідає частотній передатній функції ЛЛ і є її математичною моделлю в режимі малого сигналу для даної робочої точки ЛЛ. Диференціальний імпеданс ЛЛ можна визначити через його нулі і полюси.

Для визначення диференціального імпедансу надамо невеликі відхилення \hat{u} та \hat{i} відповідно амплітудам напруги U_m і струму I_m лампи на робочій частоті ω_s шляхом амплітудної модуляції з коефіцієнтом модуляції $m \ll 1$:

$$u = (U_m + \hat{u}) \sin \omega_s t, \tag{10}$$

$$i = (I_m + \hat{i}) \sin \omega_s t. \tag{11}$$

У випадку синусоїдної модуляції ці відхилення подамо виразами:

$$\hat{u} = |\hat{u}| \sin \omega_m t, \tag{12}$$

$$\hat{i} = |\hat{i}| \sin(\omega_m t - \varphi_m), \tag{13}$$

де ω_m - частота модулюючого сигналу, а φ_m - зсув фаз між огинаючими напруги і струму ЛЛ.

Диференціальний імпеданс лампи визначається як відношення амплітуд напруги і струму повільнозмінного модульованого сигналу із врахуванням фазового зсуву між ними:

$$Z(j\omega) = \frac{|\hat{u}|}{|\hat{i}|} e^{j\varphi_m}. \tag{14}$$

Знайдемо диференціальний імпеданс ЛЛ, скориставшись виразом (6) та алгоритмом формування сигналів у моделі (рис.3).

За виразом (7) запишемо повний диференціал напруги на лампі:

$$du = \alpha i^{\alpha-1} \frac{U_{sm} - I_m R_s}{I_m^\alpha} di + i^\alpha \frac{-R_s I_m - \alpha I_m^{\alpha-1} (U_{sm} - I_m R_s)}{I_m^{2\alpha}} dI_{m0}. \tag{15}$$

Використання позначення dI_{m0} замість dI_m в другому доданку виразу (15) підкреслює, що в алгоритмі PSpice-моделі формування амплітудного значення струму здійснюється через діюче значення, яке,

відповідно, формується за допомогою RC -ланки і водночас визначає інерційні властивості моделі.

Оскільки при АМ із $m \ll 1$ низькочастотні зміни сигналів сконцентровані на рівні амплітуд несучої, то прийемо у останньому виразі $i = I_m$, $di = dI_m$. Враховуючи співвідношення для еквівалентного опору (3), вираз (15) після перетворень набуває вигляду:

$$du = \alpha R_{ek} dI_m - (\alpha R_{ek} + R_S) dI_{m0}. \quad (16)$$

Перейдемо від диференціалів до приростів, позначивши їх $du = \mathfrak{k}$, $dI_m = \mathfrak{I}$; $dI_{m0} = \mathfrak{I}_0$, тоді отримаємо вираз стосовно приростів:

$$\mathfrak{k} = \alpha R_{ek} \mathfrak{I} - (\alpha R_{ek} + R_S) \mathfrak{I}_0. \quad (17)$$

Відповідно до алгоритму формування амплітуди I_m струму через його діюче значення I (8) на приріст \hat{i}_{m0} впливає RC -ланка із передавальною характеристикою фільтра низької частоти (ФНЧ):

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad (18)$$

Покажемо, що відхилення \hat{i} та \hat{i}_0 зв'язані між собою співвідношенням:

$$\mathfrak{I}_0(j\omega) = \mathfrak{I} \cdot H(j\omega). \quad (19)$$

Для випадку АМ можна записати:

$$\mathfrak{I} = m I_m. \quad (20)$$

При синусоїдальній АМ струм лампи змінюється по закону:

$$i = I_m (1 + m \sin \omega_m t) \sin \omega_s t. \quad (21)$$

Оскільки $m \ll 1$, вираз для сигналу генератора Е1 (квадратора) матиме вигляд:

$$E_1 \approx I_m^2 (1 + 2m \sin \omega t) \sin^2 \omega_s t = \frac{I_m^2}{2} (1 + 2m \sin \omega_m t) + \frac{I_m^2}{2} (1 + 2m \sin \omega_m t) \cos 2\omega_s t. \quad (22)$$

Після ФНЧ постійна складова сигналу генератора Е1 залишається без змін, низькочастотна складова із частотою модуляції ω_m буде "зважена" передавальною характеристикою ФНЧ, а високочастотна складова із частотою $2\omega_s$ відфільтровується. Тому напруга U_p в точці **p** моделі (рис.3) чисельно дорівнює:

$$U_p = \left(\frac{I_m^2}{2} + \frac{I_m^2}{2} \cdot 2m \sin(\omega_m t + \varphi_m) \right) \cdot |H(j\omega)|, \quad (23)$$

де φ_m - фазовий зсув ФНЧ на частоті модуляції ω_m .

Після добування кореня при умові $m \ll 1$ одержуємо наближений вираз для діючого значення струму ЛЛІ (для точки **rms** на рис.3) :

$$I \approx \frac{I_m}{\sqrt{2}} [1 + m \sin(\omega_m t + \varphi_m)] |H(j\omega)|. \quad (24)$$

До його складу крім постійної, входить низькочастотна модуляційна складова. Амплітуда змінної складової у (24) описується виразом:

$$|\mathfrak{I}_{m0}| = \frac{I_m}{\sqrt{2}} m |H(j\omega)|. \quad (25)$$

Ця величина трансформується генератором Е3 (рис.3) у модуляційну складову амплітуди „несучої” шляхом множення на $\sqrt{2}$:

$$|\mathfrak{I}_0| = m I_m |H(j\omega)|, \quad (26)$$

або, враховуючи (20):

$$|\mathfrak{I}_0| = |\mathfrak{I}| \cdot |H(j\omega)|. \quad (27)$$

Тоді на основі виразу (17) можна записати для частотної області:

$$\mathfrak{k}(j\omega) = \alpha R_{ek} \mathfrak{I} - (\alpha R_{ek} + R_S) \mathfrak{I}_0 \cdot H(j\omega), \quad (28)$$

або, скориставшись (18),

$$\mathfrak{k}(j\omega) = \frac{\alpha R_{ek} (1 + j\omega T) - (\alpha R_{ek} + R_S)}{1 + j\omega T} \mathfrak{I} = \frac{\alpha R_{ek} j\omega T - R_S}{1 + j\omega T} \mathfrak{I}, \quad (29)$$

Позначимо $\omega_0 = 1/(RC)$ та врахуємо, що вихідний сигнал має ФНЧ лише модуляційну складову з ω_m . Тоді отримаємо вираз для диференціального імпедансу ЛЛІ:

$$Z(j\omega) = R_S \frac{\alpha \frac{j\omega_m}{\omega_0} \frac{R_{ek}}{R_S} - 1}{\frac{j\omega_m}{\omega_0} + 1}. \quad (30)$$

Із виразу (30) витікає, що диференціальний імпеданс ЛЛІ має нуль в правій половині комплексної

площини. Тому ЛЛ, як ланка динамічної системи, відноситься до ланок немінимально-фазових типу. Наявність нуля в правій півплощині пояснює (і підтверджує) той факт, що ЛЛ не може безпосередньо живитися від джерела напруги, оскільки в цьому випадку не буде виконуватися умова стійкості її роботи. На відміну від [4] значення нуля є в α разів більшим, оскільки в даному виразі він визначається не статичним опором $R_{ек}$, як в [4], а динамічним опором, величина якого дорівнює $\alpha R_{ек}$ у зв'язку із степеневою апроксимацією динамічної ВАХ. Такий підхід є коректнішим і більш точним, оскільки відхилення \dot{u} та \dot{i} зв'язані між собою не через статичний, а через динамічний опір.

Із виразу (30) також видно поведінку лампи при низькочастотних і високочастотних діях. Так при повільних змінах керуючих впливів ЛЛ ($f_m \rightarrow 0$) диференціальний імпеданс є від'ємним ($Z \rightarrow -R_S$) і визначається диференціальним опором лампи. При швидких змінах керуючих впливів ЛЛ ($f_m \rightarrow \infty$) диференціальний імпеданс стає чисто активним і за величиною є в α разів більшим за еквівалентний опір лампи в її робочій точці.

Методика визначення параметрів моделі. Для практичного використання моделі необхідно знати її параметри R_S , $R_{ек}$, α та f_0 , які входять у вираз (30). Щоб визначити диференціальний опір R_S та еквівалентний опір $R_{ек}$ в робочій точці ЛЛ, слід зняти експериментальне сімейство динамічних ВАХ ЛЛ. З цього сімейства визначаються параметр U_{sm} і за виразами (2) і (3) проводиться розрахунок R_S та $R_{ек}$.

Для визначення параметра інерційності f_0 та показника α запишемо модуль і фазу для виразу (30) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} Z &= R_S \frac{\sqrt{1+(\alpha k F)^2}}{\sqrt{1+F^2}} \\ \phi &= \arctg \frac{F(k+1)}{\alpha k F^2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

де $k = 2R_{ек} / R_S$, $F = f_m / f_0$ - відносна частота, f_m - частота модуляції, $f_0 = 1 / (2\pi RC)$. Шукані параметри F та α є розв'язком системи рівнянь (31). Вона не має аналітичного розв'язку, тому необхідно використати чисельні методи. Система рівнянь (31) має чотири розв'язки. Серед них вибираємо такий, в якому параметри F та α є додатними (виходячи з фізичного змісту), а значення показника α лежить в діапазоні від 2 до 4 (базуючись на результатах аналізу варіантів апроксимації ВАХ ЛЛ, наведеного в [6]).

Пару значень ϕ та Z для системи рівнянь (31) вибирають за експериментально знятою залежністю диференціального імпедансу від частоти модуляції (рис.5).

Одержані параметри дають змогу описати диференціальний імпеданс конкретної ЛЛ за допомогою виразу (30).

Експериментальні дослідження моделі

Щоб оцінити адекватність запропонованої моделі, проведено експериментальні дослідження диференціального імпедансу трубчастих люмінесцентних ламп типів ЛБ8 та TLD 18W/54, TLD36W/54 фірми Philips, а також компактних люмінесцентних ламп OSRAM DULUX EL 21W/41-827 фірми OSRAM та GE Biah T/E 13W фірми General Electric.

Дослідження виконані на стенді, до складу якого входять низькочастотний генератор амплітудно-модульованого сигналу Г6-34, модернізований підсилювач потужності ТУ-100, баластний опір, осцилограф.

Вимірювання проводились на робочій частоті 25 кГц, частота модуляції встановлювалась в межах від 100 до 8000 Гц. Результати експерименту для лампи TLD 18W/54 наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експерименту для лампи TLD 18W/54

f_m , Гц	75	156	306	502	700	896	1008	2007	3000	4042	5000	7000	8000
Z , Ом	78	89	137	178	246	301	380	616	800	960	984	986	986
ϕ , град	170	157	132	118	100	93	85	70	54	36	27	15	10

На рис.5 наведено експериментальну залежність диференціального імпедансу лампи TLD 18/54 та результати, отримані за допомогою математичної моделі (30), а також результати, які дає модель [5]. При побудові залежності (рис.5) враховано наступні дані експерименту та розрахунків: $I=0,24$ А, $U=116$ В, $R_S=84$ Ом, $R_{ек}=484$ Ом, $\phi=15^\circ$, $Z=986$ Ом. Значення показника степеня $\alpha=2,1$ та частоти $f_0=2600$ Гц отримано з розв'язку системи рівнянь (31). Порівняння результатів показує вищий ступінь адекватності даної моделі, ніж відомої моделі.

Висновки

На основі нової PSpice-сумісної нелінійної інерційної моделі люмінесцентної лампи удосконалено малосигнальну модель люмінесцентної лампи як об'єкта регулювання. PSpice-сумісна модель базується на апроксимації динамічної вольт-амперної характеристики лампи степеневою функцією з показником степеня, який визначається шляхом розв'язку системи рівнянь. Малосигнальна модель люмінесцентної лампи має вигляд комплексного диференціального імпедансу, який характеризує зв'язок між огинаючими високочастотних напруги і струму в робочій точці лампи. Модель призначена для аналізу стійкості

високочастотних електронних пускорегулюючих апаратів, побудованих за замкненою структурою, відомими методами теорії автоматичного керування. Наведено методіку визначення параметрів моделі. Результати експериментальних досліджень засвідчують адекватність моделі.

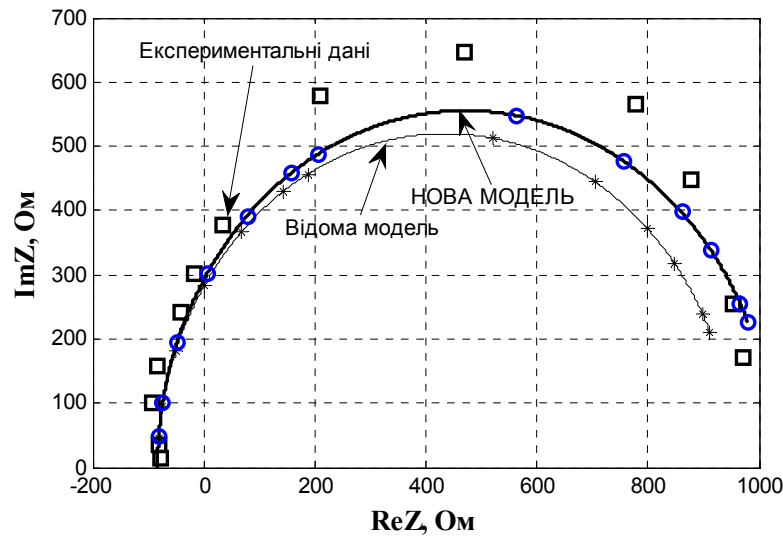


Рис.5. Диференціальний імпеданс ЛЛ TLD 18W/54: експериментальні дані та результати моделювання

Література

1. Краснополский А.Е., Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А.Е. Краснополский, В.Б. Соколов, А.М.Троицкий М. - Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
2. Клык М.Е. Расчеты электрических цепей с разрядными лампами. / М.Е.Клык, А.Е. Краснополский, В.Б. Соколов. // Светотехника - 2002 - №2, С.2-4.
3. Намиток К.К. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме / К.К.Намиток, П.Л.Пахомов, С.Н.Харин. - Алма-Ата: Наука, 1988. –208 с.
4. S. Ben-Yaakov, M.Shvartsas, S. Glozman. Statics and Dynamics of Fluorescent Lamps Operating at High Frequency: Modeling and Simulation // Proceeding IEEE APEC'99.-1999.-pp. 467-472.
5. А. Лупенко. Модель люминесцентной лампы как объекта регулирования / А. Лупенко // Теоретична електротехніка, Львівський національний університет ім. І. Франка, 2005. – Випуск 58. – с. 167-175.
6. T.J.Ribarich, J.J.Ribarich A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model // IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 1998. - Vol.3. - p. 2094 - 2098.
7. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света / Г.Н. Рохлин - М.: Энергоатомиздат, 1991.- 720 с.

References

1. Krasnopol'skij A.E., Puskoregulirujushhie apparaty dlja razrjadnyh lamp / A.E. Krasnopol'skij, V.B. Sokolov, A.M.Troickij M. - Jenergoatomizdat, 1988. – 208 s.
2. Klykov M.E. Raschety jelektricheskikh cepej s rjazrjadnymi lampami. / M.E.Klykov, A.E. Krasnopol'skij, V.B. Sokolov. // Svetotehnika - 2002 - №2, S.2-4.
3. Namitokov K.K. Matematicheskoe modelirovanie processov v gazorazrjadnoj plazme / K.K.Namitokov, P.L.Pahomov, S.N.Harin. - Alma-Ata: Nauka, 1988. –208 s.
4. S. Ben-Yaakov, M.Shvartsas, S. Glozman. Statics and Dynamics of Fluorescent Lamps Operating at High Frequency: Modeling and Simulation // Proceeding IEEE APEC'99.-1999.-pp. 467-472.
5. А. Lupenko. Model' ljuminescentnoj lampi jak ob'ekta reguljuvannja / А. Lupenko // Teoretichna elektrotehnika, L'vivs'kij nacional'nij universitet im. I. Franka, 2005. – Vipusk 58. – s. 167-175.
6. T.J.Ribarich, J.J.Ribarich A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model // IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 1998. - Vol.3. - p. 2094 - 2098.
7. Rohlin G.N. Razrjadnye istochniki sveta / G.N. Rohlin - M.: Jenergoatomizdat, 1991.- 720 s.

Рецензія/Peer review : 23.9.2015 р.

Надрукована/Printed :20.10.2015 р.