

ВИСОКОЧАСТОТНА ДИНАМІЧНА PSpICE-СУМІСНА МОДЕЛЬ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ ЛАМПИ

Запропоновано нову високочастотну динамічну PSpice-сумісну модель люмінесцентної лампи. Модель базується на поєднанні лінійної апроксимації огинаючої амплітуд динамічних вольт-амперних характеристик із параболічною апроксимацією залежності миттєвих значень напруги і струму люмінесцентної лампи. Модель може бути використана для схемотехнічного моделювання комплексу "електронний пускорегулюючий апарат – люмінесцентна лампа" з неперервним регулюванням світлового потоку. Результати моделювання демонструють добрий ступінь відповідності моделі і люмінесцентної лампи при високій швидкодії моделі.

1. Вступ

Моделювання електричних схем сучасних електронних пускорегулюючих апаратів (ЕПРА) для люмінесцентних ламп (ЛЛ), які працюють на високих частотах (20кГц і вище), відіграє важливу роль в процесі пошуку оптимальних варіантів схемотехнічних рішень ЕПРА. В першу чергу, це стосується розробки нових структур однокаскадних ЕПРА з регулюванням світлового потоку ЛЛ, в яких реалізується плідна ідея об'єднання в одному каскаді як функції керованого високочастотного інвертора, так і функції коректора коефіцієнта потужності, за рахунок чого суттєво зменшується вартість таких ЕПРА при забезпеченні ними високої якості споживаної електроенергії та комфортності освітлення. Аналіз роботи та проектування таких ЕПРА, у зв'язку із складним алгоритмом їх роботи, без попереднього моделювання електричних режимів практично неможливі. Особливо гостро ця проблема постає в ЕПРА на базі зарядових pomp [1], корекція форми споживаного струму в яких здійснюється за бездросельною схемою. Оскільки ЕПРА працює в комплекті із люмінесцентною лампою (ЛЛ), для достовірного моделювання електричних процесів в ньому необхідно мати модель ЛЛ. На жаль, в бібліотеках компонентів сучасних програм-симуляторів, наприклад, ORCAD-9.2, Microcap-6, ядром яких є потужна програма схемотехнічного моделювання PSpice, відсутні моделі ЛЛ.

Модель ЛЛ повинна задовільняти щонайменше двом критеріям. По-перше, вона повинна адекватно поводити себе в електричному колі, віддзеркалюючи основні електричні властивості ЛЛ. По-друге, вона повинна добре узгоджуватися із PSpice-симулятором, забезпечуючи високу швидкодію моделювання.

Відомі диференціальні моделі ЛЛ [2,3,4] при роботі ламп на високих частотах (ВЧ) є надто складними, переобтяженими емпіричними значеннями їх параметрів. Приклад трансляції диференціальної моделі на базі рівнянь Кессі та Майра в PSpice-сумісну модель [5], незважаючи на її корисність для розуміння високочастотного використання ЛЛ, показує проблематичність її для практичного використання, складність та багатоетапність калібрування моделі. І хоча дана модель охоплює як низькі, так і високі частоти, результати моделювання мають швидше якісний ніж кількісний характер. Кращі результати отримано в [6], завдяки застосуванню в диференціальній моделі складної апроксимації нелінійних параметрів ЛЛ. Використання таких моделей, крім того, призводить до великих часових витрат, і в PSpice-симуляторах вони практично не застосовуються.

Тому розробці простих поведінкових ВЧ моделей приділяється значна увага зарубіжними фахівцями, про що свідчать численні публікації в періодичних виданнях.

В даній роботі на основі виконаного аналізу основних із відомих PSpice-моделей ЛЛ пропонується відносно проста і ефективна апроксимаційна модель ЛЛ, що призначена для моделювання електричних процесів в комплекті "ЕПРА-ЛЛ" при роботі на ВЧ та при регулюванні потужності ЛЛ в межах (100±30) % від номінальної. Модель

розрахована на використання в середовищі системи схемотехнічного моделювання Microcap-6, а також в інших PSpice-симуляторах.

2. Аналіз PSpice-моделей ЛЛ

В основі таких ВЧ моделей лежить уявлення про ЛЛ, як про елемент електричного кола, який поводить себе як імпеданс із нелінійними та інерційними властивостями.

В роботах [7,8] розроблено прості ВЧ моделі ЛЛ шляхом лінеаризації статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) ЛЛ в її робочому діапазоні. При цьому як параметри лампи використовуються від'ємний диференціальний опір лінеаризованої ділянки ВАХ та напруга, що відповідає точці перетину лінеаризованої характеристики з віссю напруг. Такі параметри легко визначаються за допомогою ВАХ ЛЛ. Встановлена аналітична залежність еквівалентного опору ЛЛ від вказаних параметрів та діючого значення струму лампи. Ця залежність і використовується для одержання PSpice-моделі ЛЛ. Моделювання динамічних властивостей ЛЛ вирішено шляхом введення інтегруючої RC-ланки в PSpice-модель для формування діючого значення струму ЛЛ. Однак, вказані моделі не враховують нелінійностей динамічних ВАХ, що зменшує точність схемотехнічного моделювання ЕПРА.

Подібний підхід використано і в роботі [9]. Але, на відміну від [7,8], тут застосовано нелінійну апроксимацію статичної ВАХ ЛЛ у вигляді суми двох експонент, параметри яких визначаються за ВАХ. Така модель дозволяє здійснити моделювання в більш широкому діапазоні регулювання потужності ЛЛ або ж підвищити точність моделювання. На жаль, і в цій моделі не враховується нелінійність динамічної ВАХ ЛЛ. Кращих результатів досягнуто в [10] шляхом вдало підібраної апроксимації ВАХ двома експонентами, в результаті чого модель описує ділянки як дугового, так і аномального розрядів.

В таких моделях використовується процес усереднення з метою визначення діючого значення струму ЛЛ або середньої потужності ЛЛ в робочій точці. Таким чином, лампа замінюється еквівалентним лінійним опором, величина якого змінюється при зміні потужності лампи, в той же час цей опір залишається постійним в межах півперіоду високої частоти. Хоча такі моделі є корисними і в багатьох випадках є достатніми, але вони не можуть спрогнозувати такі важливі параметри лампи, як коефіцієнт амплітуди та коефіцієнт потужності, оскільки реальні динамічні ВАХ ЛЛ є нелінійними, що в моделях [7-10] не враховано.

Ефекти нелінійності динамічних ВАХ ЛЛ проаналізовані і оцінені в роботі [11]. Встановлено, що, з точки зору точності і швидкодії моделі, параболічна залежність $u=ki^2$ між миттєвими значеннями напруги u і струму i є достатньо виправданим компромісом між простою лінійною моделлю і значно складнішою, але дещо точнішою, апроксимацією поліномом третього степеня. Але в даному підході не враховується зміна опору лампи при зміні режиму роботи ЛЛ в процесі регулювання її потужності, тобто модель є непридатною для моделювання “дімерів” – ЕПР, які дозволяють регулювати світловий потік ЛЛ.

До найбільш досконалих поведінкових моделей, які враховують як нелінійність статичної ВАХ ЛЛ, так і її динамічну нелінійність, належать моделі, запропоновані в [12,13,14].

В моделі Мадера – Хорна [12] миттєва напруга u на лампі представлена поліномом третього степеня від миттєвого струму i ,

$$u=A(\bar{P})i+B(\bar{P})i^3,$$

де коефіцієнти $A(\bar{P})$ і $B(\bar{P})$ є функціями від середньої потужності \bar{P} лампи, які визначаються із ВАХ за складними алгоритмами через допоміжні коефіцієнти $a_1, a_2, b_1, b_2, c_a, c_b$.

$$A(\bar{P}) = a_1(\bar{P} + C_a)^{a_2}$$

$$B(\bar{P}) = b_1(\bar{P} + C_b)^{b_2}$$

Недоліком моделі [12] є проблема стійкості розв'язку рівнянь, покладених в основу моделі, яка пов'язана із великим діапазоном зміни функції $V(\bar{P})$ при зміні потужності лампи приблизно в шість разів відносно номінального значення.

Для покращення моделі [12] Сан і Хестерман [13] запропонували підхід, який звужує діапазон зміни $V(\bar{P})$ і сприяє вирішенню проблеми стійкості розв'язку, але суть моделі залишається тією ж, що і у [12]. Нова модель [13] потребує складних процедур апроксимації, необхідних для визначення восьми параметрів, які входять в цю модель, за допомогою Mathcad, що ускладнює її використання.

Модель, запропонована в [14], є найбільш універсальною. Вона охоплює ділянки ВАХ ЛЛ як дугового, так і, частково, аномального розряду і враховує динамічну нелінійність ЛЛ. Але вона також є надто складною і потребує акуратного визначення восьми параметрів та інтенсивних обчислень.

Із вищенаведеного аналізу відомих поведінкових моделей можна зробити висновок, що вони є або надто складними, потребують визначення багатьох специфічних параметрів і мають занижену швидкодію, або не враховують нелінійності чи інерційності ЛЛ. В даній роботі пропонується компромісний варіант ВЧ PSpice-моделі, який гармонійно поєднує вказані властивості ЛЛ.

3. Концепція моделі

На ділянці високочастотного 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, як відмічено в [7], статичну ВАХ лампи із достатньою для моделювання точністю можна апроксимувати прямою лінією.

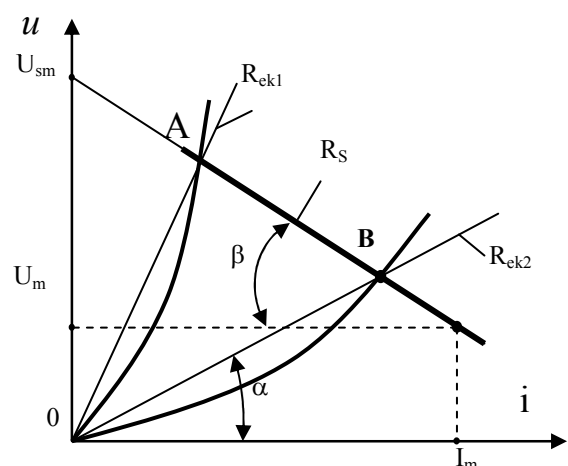
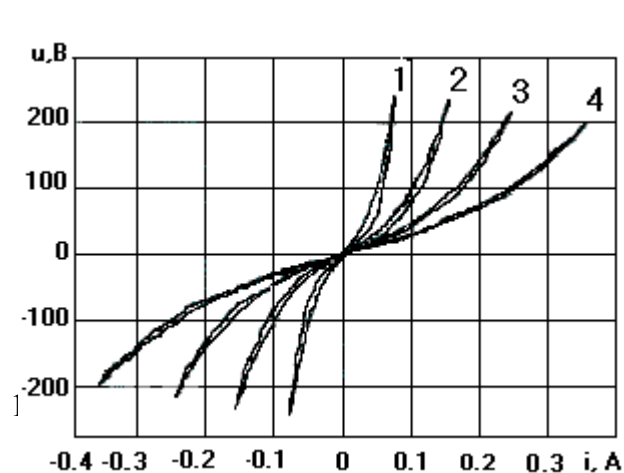
Із аналізу динамічних ВЧ ВАХ ЛЛ Т8-32W, наведених на рис.1, витікає, що в тому ж діапазоні потужностей і амплітудні значення напруги U_m та струму I_m , тобто огинаюча сімейства ВАХ також лежать на прямій лінії. Спрощено це показано на рис.2 у вигляді прямої AB . Нахил прямої визначається від'ємним диференціальним опором R_s . Ця пряма задовільняє рівнянню:

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

де $R_{ек} = \frac{U_m}{I_m}$ - еквівалентний опір лампи при даній потужності ЛЛ, U_{sm} - напруга в точці

перетину апроксимаційної прямої із віссю напруг. Диференціальний опір R_s визначається за допомогою ВАХ (рис.2):

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



Прийmemo U_{sm} і R_s – за параметри ЛЛ, що визначені із її ВАХ. Тоді еквівалентний опір ЛЛ буде (рис.2):

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

Вважаючи в першому наближенні в області ВЧ лампу як лінійний об'єкт, її спрощені динамічні ВАХ можна зобразити прямими лініями OA, OB, нахил яких визначається опором $R_{ек}$ (на рис.2 наведено ВАХ для двох значень потужностей).

Однак, при цьому втрачаються нелінійні ефекти поведінки ламп на ВЧ. При побудові поведінкової апроксимаційної моделі ці ефекти слід враховувати для підвищення ступеня її адекватності. При цьому бажано б використати нелінійну якомога простішу апроксимацію, яка забезпечувала б достатню для основних застосувань точність, з одного боку, та високу швидкодію моделювання, з іншого. Крім того, бажано, щоб модель описувалася простими аналітичними виразами, прозорими і зручними як для аналізу, так і для проектування. Виходячи із детального розгляду різноманітних варіантів апроксимації ВЧ ВАХ, наведеного в [11], можна вважати компромісним варіантом, стосовно точності та складності обчислень апроксимаційних коефіцієнтів, параболічну залежність між миттєвими значеннями напруги u і струму i :

$$|u| = \kappa i^2, \quad (4)$$

де κ – апроксимаційний коефіцієнт, який є параметром лампи, $|u|$ - модуль u .

Для визначення коефіцієнта κ можна записати два рівняння для амплітуд I_m і U_m , використовуючи (3) і (4):

$$U_m = R_{ек} I_m, \quad (5)$$

$$U_m = \kappa I_m^2, \quad (6)$$

звідки

$$\kappa = \frac{R_{ек}}{I_m} = \frac{U_{sm} - I_m R_s}{I_m^2}. \quad (7)$$

Тоді ВАХ для миттєвих значень може бути описана виразом:

$$|u| = \frac{U_{sm} - I_m R_s}{I_m^2} i^2, \quad (8)$$

або

$$i = \text{sign}(u) \sqrt{\frac{I_m^2 |u|}{U_{sm} - I_m R_s}}. \quad (9)$$

Інерційні властивості ЛЛ на ВЧ можна врахувати шляхом введення в модель інтегруючої ланки [8], параметри якої визначаються, виходячи із часів релаксації в газовому розряді ЛЛ [4].

Для цього запишемо вираз (9) у вигляді:

$$i = \text{sign}(u) \sqrt{\frac{2I^2 |u|}{U_{sm} - \sqrt{2}IR_s}}, \quad (10)$$

де

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (11)$$

- діюче значення струму ЛЛ.

Вираз (10) із врахуванням (11) є математичною моделлю ЛЛ при її роботі на високих частотах. В цьому виразі віддзеркалено як залежність напруг і струмів ЛЛ від робочої потужності (в діапазоні потужностей 100÷30% від номінальної), так і нелінійність та інерційність поведінки ЛЛ. Інерційність поведінки моделюється інтегруючою RC ланкою, яка вносить запізнення в каналі формування діючого значення струму. Стала часу RC ланки повинна відповідати інерційності газового розряду ЛЛ. Вираз (10) покладено в основу побудови PSpice-сумісної моделі ЛЛ.

Слід вказати, що в пропонованому 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, як показує порівняння результатів моделювання із експериментальними даними, незначно погіршує точність моделі.

В той же час такий підхід дозволяє суттєво спростити модель, а, отже, підвищити її швидкодію. Крім того, в даній моделі закладено можливість одержання аналітичного виразу частотної передавальної функції ЛЛ як об'єкта керування.

4. Побудова моделі

Для реалізації моделі в середовищі PSpice було використано систему схемотехнічного моделювання Мігросар-6. Важливою особливістю PSpice-симулятора є широкий набір засобів для аналогового поведінкового моделювання функціональних пристроїв. Це, в першу чергу, - функціональні джерела напруги і струму, які дозволяють, базуючись на математичних залежностях, проводити моделювання складних функціональних перетворень без використання власне схем компонентів. Саме такі функціональні джерела, а також інтегруюча RC-ланка, застосовані для побудови пропонованої моделі.

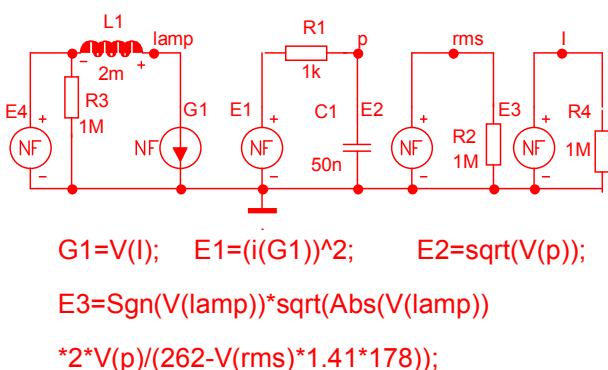


Рис. 3. Схема моделі ЛЛ

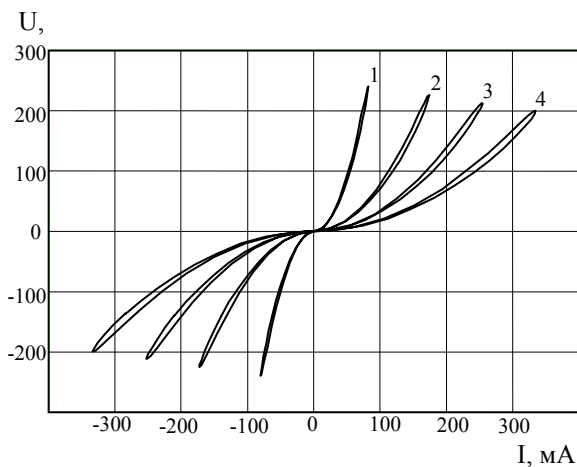


Рис. 4. Динамічні ВАХ моделі

В розробленій моделі люмінесцентну лампу подано у вигляді функціонального генератора струму G1, (рис.3), який емулює змінний опір у відповідності до (10) та (11). Для формування сигналу, що керує генератором струму G1, використовується ряд

проміжних функціональних генераторів E1, E2, E3. Напруга на ЛЛ відповідає напрузі вузла **lamp**. Генератор E4 моделює вихідний каскад ЕПРА, а індуктивність L1 – це дросель в колі високочастотного живлення ЛЛ. Ці два елементи не входять до складу моделі ЛЛ.

Функціональний генератор напруги E1 формує напругу, яка чисельно дорівнює квадрату миттєвого струму лампи i :

$$E1 = [i(G1)]^2. \quad (12)$$

Ця напруга прикладена до інтегруючої RC-ланки, на виході якої для частот $\omega > \frac{1}{RC}$ і часу $t > RC$ формується напруга $V(p)$ вузла **p**, що чисельно дорівнює квадрату діючого значення струму лампи:

$$V(p) = \frac{1}{T} \int_0^T [i(G1)]^2 dt = I^2. \quad (13)$$

На виході генератора напруги E2 (вузол **rms**) формується напруга, що чисельно дорівнює діючому значенню струму I :

$$E2 = \sqrt{V(p)} = V(rms). \quad (14)$$

Напруги (12) – (14) забезпечують проміжні результати, необхідні для формування у вузлі **I** результуючої керуючої напруги:

$$E3 = \text{sign}(u) \sqrt{\frac{2V(p) \text{Abs}(u)}{U_{sm} - \sqrt{2}V(rms)R_s}}. \quad (15)$$

Нарешті чисельне значення цієї напруги (15) присвоюється струму керованого генератора струму $G1=V(I)$, струм якого відповідає миттєвому струму ЛЛ. Такий поетапний алгоритм реалізації виразу (10) забезпечує високу швидкодію моделі.

В моделі (рис.3) люмінесцентної лампи типу Т8-32W використано параметри ЛЛ, визначені за динамічними ВАХ (рис.1), а саме: $U_{sm}=262$ В та $R_s=178$ Ом.

5. Результати моделювання

За допомогою розробленої моделі були одержані динамічні ВАХ моделі ЛЛ, які наведені на рис. 4. Порівняння динамічних ВАХ моделі з динамічними ВАХ ЛЛ (рис.1) показує високу ступінь адекватності моделі.

З метою перевірки роботоздатності моделі ЛЛ проведено її тестування.

Для оцінки реакції моделі на стрибкоподібну зміну режиму роботи ЛЛ на вхід моделі подавалась високочастотна напруга, частота якої стрибкоподібно змінювалась від 50 кГц до 25 КГц і назад. На рис. 5. наведено реакцію моделі на такі стрибкоподібні впливи. Модель адекватно відслідковує стрибкоподібні зміни частоти. При зменшенні частоти спостерігається швидке наростання струму моделі ЛЛ і відповідне зменшення струму при зростанні частоти. Зміни напруги в моделі ЛЛ мають протилежний характер, що відповідає поведінці ЛЛ. На рис.6 зображено реакцію моделі на ту ж стрибкоподібну зміну, але в збільшеному масштабі. Із рисунка видно зміну миттєвих значень напруги і струму після моменту зміни режиму роботи ЛЛ, що відповідає процесам релаксації, які мають місце в ЛЛ. Осцилограма демонструє також і нелінійні ефекти ЛЛ.

Для перевірки частотних властивостей моделі ЛЛ на її вхід подавалась ВЧ напруга з амплітудною модуляцією. Як модулюючий сигнал використано синусоїду. На рис. 7 зображені напруги і струми моделі при частоті модуляції 200 Гц, на рис.8 – при частоті модуляції 2 кГц, а на рис. 9 – при частоті модуляції 10 кГц. Із розгляду цих

результатів моделювання чітко видно, що при низькочастотній модуляції (200 Гц) напруги і струми моделі є практично протифазними, тобто модель на низьких частотах модуляції демонструє від’ємний диференціальний опір R_s , що відповідає реальній поведінці ЛЛ, коли часи релаксації є значно менші за півперіод зміни модулюючого впливу. На “середніх” частотах (2кГц) модулюючого впливу спостерігається зменшення кута зсуву фаз між огинаючими напруги і струму. А на “високих” частотах (10 кГц) модуляції, коли часи релаксації стають більшими за період зміни модулюючого впливу, кут зсуву фаз стає практично рівним нулю, тобто модель поводить себе як активний нелінійний опір. Із наведених результатів також видно, що модель показує індуктивний характер опору ЛЛ стосовно приростів, причому кут зсуву фаз між напругою і струмом змінюється в межах від мінус 180^0 (на низьких частотах) до 0^0 (на високих частотах).

Результати моделювання одержані за допомогою пропонованої моделі добре узгоджуються з результатами досліджень, виконаними Денгом і Куком [15].

На основі результатів моделювання можна визначити малосигнальні параметри моделі ЛЛ як об’єкта керування системи автоматичного регулювання.

Приклад використання моделі для моделювання ЕПРА наведено на рис.10. Модель ЛЛ T8-32W на даній схемі зображена у вигляді макромоделі FL1. Імпульсні генератори V2 і V3 моделюють драйвери високовольтних ключів (транзисторів VT1 і VT2 типу IRF840). Вони формують керуючі прямокутні протифазні імпульси, що не перекриваються.

Час затримки (“dead-time”) між імпульсами становить 1 мкс. Ланка C4, R11 виконує функцію демпфера. Результати моделювання поведінки ЛЛ з вихідним каскадом ЕПРА наведені на рис.11.

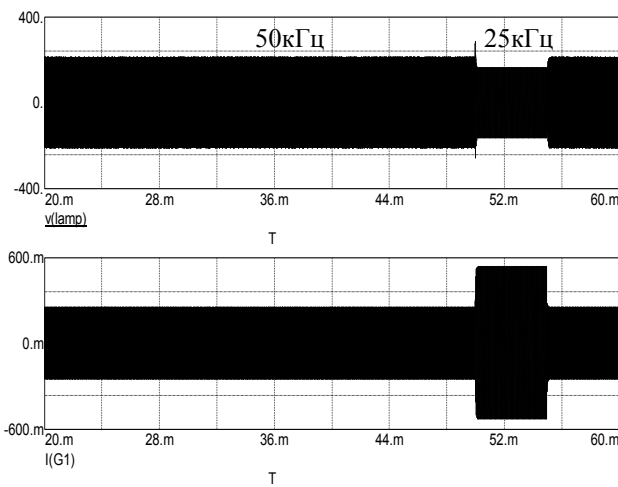


Рис.5. Реакція моделі ЛЛ на ступінчасту зміну частоти від 50 кГц до 25 кГц і назад; зверху – напруга ЛЛ, знизу – струм ЛЛ

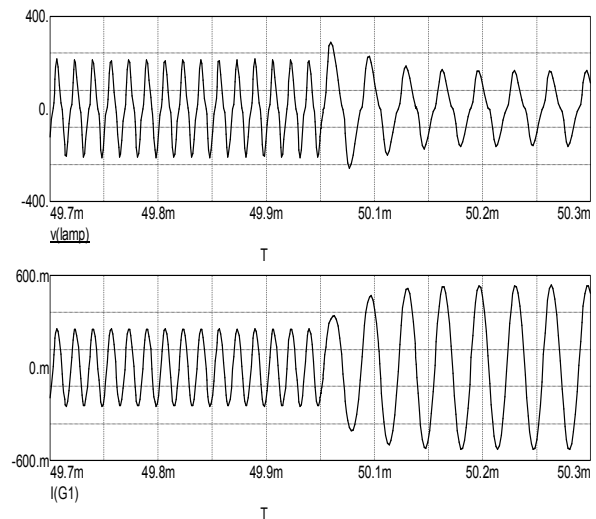


Рис.6. Реакція моделі ЛЛ на ступінчасту зміну частоти (в збільшеному масштабі)

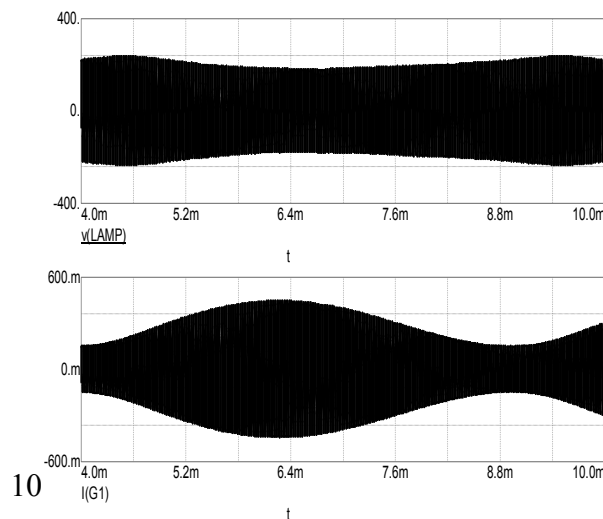


Рис.7. Реакція моделі ЛЛ на амплітудну модуляцію з частотою 200 Гц

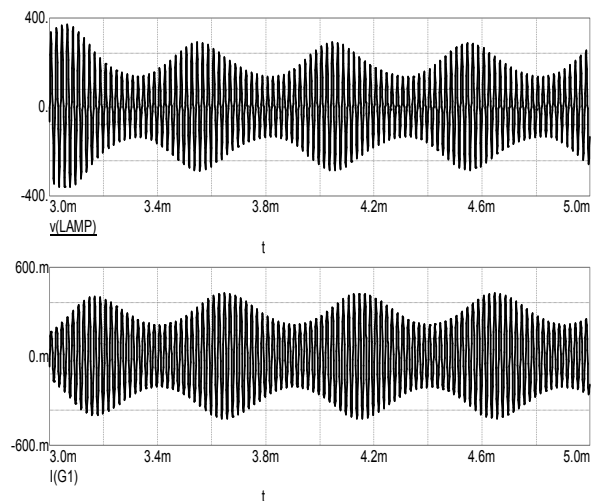


Рис.8. Реакція моделі ЛЛ на амплітудну модуляцію з частотою 2000 Гц

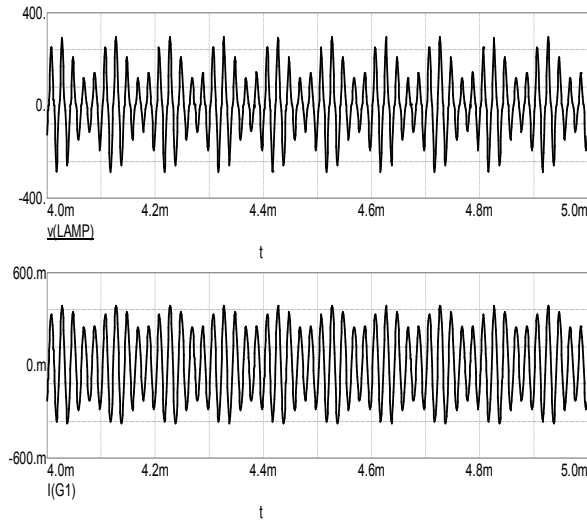


Рис.9. Реакція моделі ЛЛ на амплітудну модуляцію з

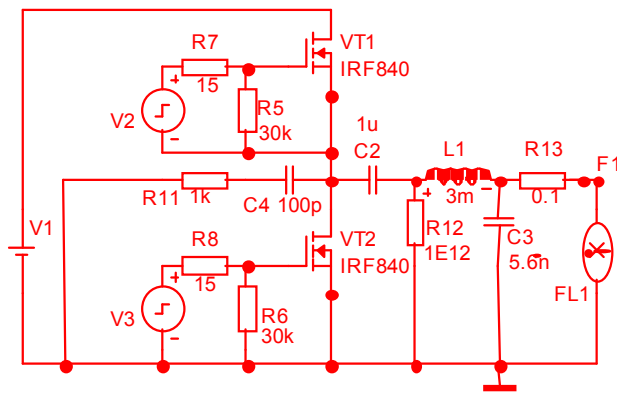


Рис. 10. Схема моделювання вихідного каскаду ЕПРА із використанням моделі ЛЛ

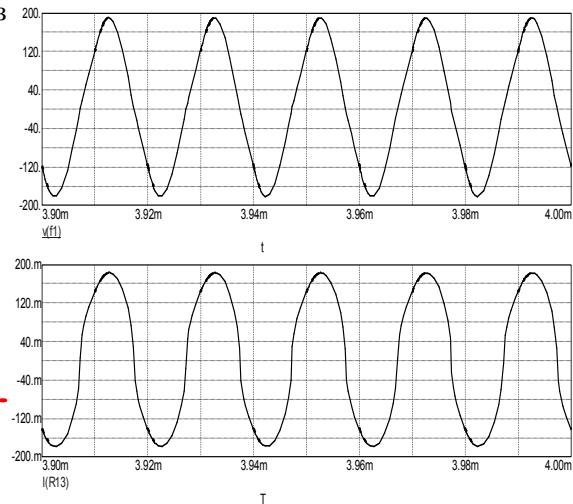


Рис. 11. Результати моделювання комплексу “вихідний каскад ЕПРА – ЛЛ”: зверху – напруга (В); внизу - струм (мА)

Висновки

На основі аналізу відомих моделей люмінесцентних ламп розроблено поведінкову PSpice-сумісну модель люмінесцентної лампи при її роботі на високих частотах.

В моделі застосовано нелінійну апроксимацію динамічної ВАХ в поєднанні із лінійною апроксимацією огинаючої сімейства ВАХ люмінесцентної лампи, в результаті чого отримано PSpice-сумісну модель, яка забезпечує як адекватність, так і високу швидкість моделювання.

Модель добре відтворює як нелінійні, так і динамічні властивості люмінесцентної лампи в досить широкому діапазоні зміни режиму її роботи. Перевагою моделі є простота визначення параметрів ЛЛ за динамічними ВАХ люмінесцентної лампи. Крім того, в даній моделі закладено можливість одержання аналітичного виразу частотної передаточної функції ЛЛ як об'єкта керування.

Тому дана модель може бути використана для розробки і дослідження ЕПРА з регулюванням світлового потоку люмінесцентної лампи.

The new high-frequency dynamic PSpice-compatible model of fluorescent lamp is proposed. The model is based on the combining of linear approximation of envelope of dynamic V-I characteristics of fluorescent lamp and parabolic approximation of its instantaneous voltages and currents. The model can be utilized for an electronic ballast with fluorescent lamp simulation with continuous and step dimming of fluorescent lamp. The simulation results demonstrate a good agreement with fluorescent lamp and high speed of simulation.

Література

1. F. Tao, F.C. Lee, N. Onishi. A Comparative Study of a Family of a Charge Pump Power Factor Correction Electronic Ballasts.//Conference Record of IEEE-APEC, 1999, pp. 739-745.
2. Краснопольский А.Е., Соколов В.Б., Троицкий А.М. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп.- М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
3. К.К.Намиатов, П.Л.Пахомов, С.Н.Харин. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме.- Алма-Ата: Наука, 1988. –208 с.
4. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 720 с.
5. T.Liu, K.J.Tseng, D.M.Vilathgamuwa. A PSpice Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps.//IEEE Power Electronics Specialists Conf., 1998, pp. 1749-1754.
6. М.Е.Клыков, А.Е. Краснопольский, В.Б. Соколов. Расчеты электрических цепей с разрядными лампами.// Светотехника - 2002 - №2, С.2-4.
7. M.Gulko, S. Ben-Yaakov. Current-Sourcing Push-Pull Parallel-Resonance Inverter (CS-PRPI): Theory and Application as Fluorescent Lamp Driver.//IEEE APEC'93, 1993, pp.411-417.
8. T.F.Wu, J.C.Hung, T.H.Yu. A PSpice Circuit Model for Low-Pressure Gaseous Discharge Lamps Operating at High Frequency. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no.3, 1997, pp.428-431.
9. M.Cervi, A.R.Seidel, F.B.Bisongo, P.N.Prado. Fluorescent Lamp Modeling Through Equivalent Resistance Variation.// XIV-Congresso Brasileiro de Automatica, 2002, pp.503÷506.
10. N.Onishi, T.Shiomi, A.Okude, T. Yamauchi. A Fluorescent Lamp Model for High Frequency Wide Range Dimming Electronic Ballast Simulation.// Conference Record of IEEE-APEC 1999, pp.1001÷1005.
11. T.J.Ribarich, J.J.Ribarich. A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model.// IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 1998.
12. U.Mader, P.Horn. A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescent lamps.// IEEE Industry Applications Soc. Conf. Rec., 1992 pp. 1928÷1934.
13. M.Sun, B.Hesterman. PSpice High-Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model.// IEEE Transactions on Power Electronics, vol.13, no.2, 1998 pp. 261÷272.
14. F.Tao, Q.Zhao, F.C.Lee, N.Onishi. A Dynamic PSpice Model for High-Frequency Fluorescent Lamp with Continuous Dimming Operation.// Conferense Record of CPES Annual Seminar, 2000, pp. 295÷300.
15. E.Deng, S.Cuk. Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps// in. Proc. IEEE Applied Power Electronic Conf. (APEC-97), 1997, vol. 2, pp.1050÷1056.

Одержано 13.11.2003 р.