# 

# Проблеми автоматизації схемотехничного проектування нелінійних вузлів радіоелектронної апаратури

**Вступ**

Розглянемо специфічні властивості, притаманні нелінійним вузлам радіоелектронної апаратури (РЕА). Введемо поняття «опрацьована схема», причетне до довільного вузла РЕА. Покажемо, як треба розширити це поняття стосовно нелінійного вузла з врахуванням його особливостей. Уявлення про опрацьовану схему дозволяє сформувати задачі, які необхідно вирішувати при схемотехнічному проектуванні, і дає можливість визначити проблеми, виникаючі при створенні системи автоматизованого проектування нелінійних вузлів.

1. Специфіка розгляду нелінійних вузлів

Насамперед відмітимо, що будемо казати про автоматизацію схемотехнічного проектування нелінійних вузлів, в яких робочим виявляється періодичний режим. До їх числа відносяться автогенератори, підсилювачі, помножувачі та дільники частоти, амплітудні детектори, деякі види частотних детекторів і т. і.

У перелічених вузлах є хоча б один нелінійний елемент (опір, ємність або індуктивність). Нагадаємо, що вольт-амперна характеристика нелінійного резистора, тобто залежність струма від напруги, або обернена функція, відрізняються від прямої лінії. Характеристики нелінійної емності (вольт-кулонова) і нелінійної індуктивності (ампер-веберна) ведуть себе однаково. Тому значення опору, ємності, індуктивності в цих елементах не залишаються постійними при зміні напруги, струму, заряду або магнітного потоку.

Присутність нелінійного елемента обумовлює особливість періодичного режиму в схемі: усі струми і напруги, будучи періодичними функціями часу, стають негармонічними.

Кажучи інакше, при розкладі у ряд Фур’є струмів (напруг) у нелінійній системі, в якій існує періодичний режим з періодом Т, отримаємо спектр, який має частоту f = 1/T та її гармоніки. В цій прояві одна із особливостей нелінійної схеми.

Інші специфічні риси виявляються при зміні параметрів нелінійної системи. В цьому випадку можуть спостерігатися такі явища: виникнення паразитних автоколивань; перехід до іншого періодичного режиму з іншою амплітудою та частотою; одночасне існування двох або більше коливань. Проілюструємо перелічені вияви прикладами.

Паразитні автоколивання часто утворюються в транзисторному підсилювачі потужності при відсутності сигналу на вході, якщо трохи збільшити напругу зміщення (або відкрити транзистор). При цьому вимикання вихідного навантаження або його замкнення, як правило, сприяє автоколиванням. Причина паразитного збудження – внутрішній зворотній зв’язок в транзисторі.

Нерідко в коливну систему вузлів входить нелінійна ємність (наприклад, ємність емітерного, або колекторного переходу біполярного транзистора). Тоді при зміні частоти зовнішнього сигналу можна спостерігати викиди напруги та гістерезис (рис. 1).

Як показали досліди, це викликано зміною середнього за період значення нелінійної ємності, що при деяких умовах супроводжується збудженням коливань на частоті зовнішнього сигналу і приводить до викиду амплітуди (частота f1 рис. 1), в результаті чого спостерігається гістерезіс.

В автогенераторі, працюючим з інерційним автозміщенням, може з’явитись самомодуляція.

Це явище можна інтерпретувати як збудження низькочастотного коливання, котре існує сумісно з корисним.

Паразитні коливання в приладах на біполярних транзисторах дуже різноманітні внаслідок появи параметричної нестійкості. Суть її складається у збудженні параметричних коливань за рахунок модуляції нелінійної ємності корисним коливанням на частоті f.

При цьому збудження трапляється на частотах f/2, f, f1 та f2, підлеглих вимогам: f1+f2=f і т. і. Параметричний механізм збудження може підтримуватися внутрішнім зворотнім зв’язком, існуючим в схемі.

Паразитне коливання в розробленому виробі недопустимі по двом причинам.

По-перше, з’являються перешкоди у вигляді паразитних спектральних складових.

По-друге, ці коливання можуть бути інтенсивними та приводити до виходу з ладу елементів схеми (пробій та вигорання транзистора, згорання опору і т. і.). Отже, при проектуванні нелінійних вузлів треба приймати заходи по запобіганню паразитного збудження.

2 Що означає «опрацювати» схему нелінійного вузла?

Серед розробників РЕА є термін «опрацьована» схема. Під цими словами будемо розуміти схему, яка має такі властивості:

1. При номінальних значеннях внутрішніх параметрів, нормальній температурі зовнішнього середовища, середньому значені зовнішніх параметрів (живлячих напруг, опора навантаження і т. і.) характеристики схеми знаходяться в межах допустимих значень, вказаних в ТЗ.

2. При зміні параметрів зовнішнього середовища, в тому числі зовнішньої температури, в межах, обумовлених ТЗ, характеристики схеми не виходять за межі, встановленні технічними вимогами.

3. Характеристики схеми при розкиді параметрів елементів не виходять за встановлений технічними вимогами кордон припустимий технічними умовами на ці елементи.

В силу специфіки нелінійних пристроїв вимагаємо від опрацьованої схеми ще одну умову:

4. При зміні живлячих напруг, навантаження, температури і параметрів схеми в допустимих межах повинен існувати робочий періодичний режим; в підсилювачах потужності і в подібних пристроях за відсутності корисного сигнала, а також при налагоджені та регулювані не повині генеруватися паразитні коливання.

Зупинимось на першій властивості опрацьованої схеми. Досвід проектування показує, що можна виконати умови 2 і 3, якщо досягтись виконання першої умови із запасом. Яким повинен бути запас, треба вирішати окремо в кожному конкретному випадку.

Що до третьої умови, то при її виконані можна гарантувати працездатність схеми, виготовленої на виробництві, коли параметри елементів приймають будь-які значення з поля допуску на них. Якщо іспити показують, що ця умова виконується із труднощами, або зовсім не виконується, то слід піти по дорозі обґрунтованого зменшення допусків на використовувані елементи.

3 Задачі, які треба вирішувати при опрацюванні нелінійної схеми

В ході опрацювання схеми треба домогтися здійснення сформульованих вище чотирьох умов. Обсудимо, які завдання треба вирішити при схемотехнічному проектуванні на ЕОМ. Для конкретності будемо мати на увазі транзисторний підсилювач потужності. Припустимо, що визначена структура підсилювача (рис. 2). Проектування проведемо поетапно, домагаючись на кожному етапі виконання вказаних вище умов.

1-й етап: опрацювання схеми при номінальних значеннях внутрішніх параметрів, нормальній температурі зовнішнього середовища та при середній величині зовнішніх параметрів.

На початку етапу потрібно вказувати змінні в ході опрацювання параметри схеми та визначити межі зміни їх. Ці межі звичайно визначаються конструктивними розмірами вузла та використаної елементної бази.

Проектування на цьому етапі можна зробити по такому алгоритму:

Крок 1: ввести початкове значення внутрішніх та зовнішніх параметрів, а також температури зовнішнього середовища.

Крок 2: розрахувати періодичний режим та характеристики схеми.

Крок 3: перевірити, чи задовольняються технічні вимоги; якщо так, то закінчити роботу опрацювання схеми; якщо ні, то перейти до кроку 4.

Крок 4:перевірити, чи вичерпані межі змін параметрів схеми; якщо так, то прийняти рішення для наступних дії; якщо ні, то перейти до кроку 5.

Крок 5: змінити параметри схеми та повернутися до кроку 2.

Описаний вище алгоритм подамо у вигляді системи параметричного синтезe (рис. 2), яка має вхід і два виходи

На її вхід надходять початкові дані для проектування: структура підсилювача, значення внутрішніх та зовнішніх параметрів, температура зовнішнього середовища, перелік змінюваних параметрів та межі їх змін.

Вихід 1 означає кінець опрацювання схеми, так як при цьому розраховані параметри знаходяться в межах допустимих значень, а характеристики схеми задовольняють технічним вимогам.

Вихід 2 показує, що в умовах прийнятих обмежень технічні вимоги не задовольняються. В цьому випадку розробник приймає рішення про те, як вести проектування далі. В залежності від результатів він може поширити межі змін внутрішніх параметрів, замінити структуру кіл узгодження, перейти до схеми із загальною базою, якщо до цього загальним електродом був емітер, і т. і.

Звернемо увагу на два моменти. По-перше, параметричний синтез виконується за допомогою ітерацій. Причина цього полягає в тому, що з першого раза не вдається підібрати внутрішні параметри так, щоб технічні вимоги задовольнялись.

По-друге, в проектуванні активно бере участь інженер: він вирішує, які параметри і в яких межах треба змінювати, якщо не виконується технічне завдання; він вирішує, що робити при негативному результаті проектування.

Не можна не відмітити ще одну обставину. В ході описаного способу проектування, як і при традиційному, фахівець накопичує досвід (вчиться), але тепер це трапляється з більшою ефективністю, ніж раніше: є можливість не тільки констатувати який-небудь факт і припустити, яка його причина, але й одразу перевірити припущення.

Викладений алгоритм показує, що на першому етапі важлива задача розрахунку періодичного режиму в нелінійної схемі та визначення характеристик, вказаних в технічних вимогах, причому ця задача, як правило, вирішується багаторазово.

Кілька слів про початкові значення параметрів схеми. На перший погляд здається, що заздалегідь потрібен розрахунок, хоч і приблизний, який показав би, при яких параметрах можна очікувати виконання технічних вимог. Однак цього можна не робити, якщо ввести в вигляді початкових параметрів довільні значення із області можливих значень.

Другий етап: опрацьовування схеми при зміні зовнішніх параметрів і температури зовнішнього середовища.

Проектування на цьому етапі можна провести за допомогою системи, яка використовувалась раніше, трохи розширивши її (рис. 3). Тепер алгоритм такий:

Крок 1: ввести нові значення параметра зовнішнього середовища або зовнішньої температури в систему параметричного синтезу; якщо відгук на виході 1, то перейти до кроку 2; якщо відгук на виході 2, то прийняти рішення про наступні дії.

Крок 2: перевірити, чи всі параметри зовнішнього середовища змінювалися і чи вичерпні межі варіації зовнішньої температури; якщо так, то закінчити опрацювання; якщо ні, то перейти до кроку 1.

На основі викладеного алгоритму можна зробити наступні висновки.

Знайдені на попередньому етапі внутрішні параметри можуть не забезпечити працездатність схеми при зміні того чи іншого параметра зовнішнього середовища або зовнішньої температури. Тоді треба повертатися до першого етапу і опрацьовувати внутрішні параметри заново.

Може статися, що в межах прийнятих обмежень технічні вимоги не виконуються. Тоді розробник повинен встановити, як діяти далі.

Нових задач, які треба вирішувати, цей етап не додає. Але розрахунок періодичного режиму при новому значенні зовнішньої температури неможливо зробити за один раз.

Діло в тому, що транзистор розігрівається із-за розсіювання на ньому потужності. Температура його переходів більше ніж температура зовнішнього середовища та залежить від двох факторів – зовнішньої температури та потужності розсіювання. На останню теж впливає температура середовища.

Робиться це від того, що змінюються параметри транзистора та його режими. Це змушує визначати періодичний режим послідовним зближенням: наприклад, припустити, що температура транзистора змінилась так, як і зовнішня температура, а потужність розсіювання зосталась однаковою; знайти нові параметри і режим транзистора, розрахувати потужність розсіювання і уточнити температуру на переходах транзистора; по знайденій температурі знову розрахувати параметри та режим транзистора, потужність розсіювання і температуру на переходах і т. і.

Ітерації повторюють до тих пір, поки різниця в температурі на переходах транзистора на сусідніх кроках не стане нижче заданої величині, визначаючої точність розрахунків.

В особливо відповідальних випадках домагаються працездатності схеми в найгіршому випадку, тобто при такому поєднанні зовнішніх параметрів та зовнішньої температури, при якому характеристики змінюються в найбільшій мірі.

Перевірити виконання цих вимог можна розрахунком періодичного режиму при кількох наборах зовнішніх параметрів та зовнішньої температури.

Третій етап: забезпечення працездатності схеми при розкиді її параметрів у межах допусків.

Цей етап зв’язаний с розрахунком чутливості характеристик схеми відносно її внутрішніх параметрів. Задача ускладнюється тим, що внутрішніх елементів в реальному випадку багато.

Тому її не можна вирішувати багаторазовим розрахунком періодичного режиму нелінійної схеми, по черзі змінюючи кожен із параметрів, оскільки це приводить до великих втрат машинного часу. З іншої сторони, чутливість – це похідна від відповідних показників схеми по параметру. Отож, є можливість спрощення при розрахунках.

Четвертий етап: попередити збудження паразитних коливань в проектованій схемі.

Тут треба проаналізувати стійкість як періодичного режиму, так і положення рівноваги (робочої точки).

Таким чином, використання ЕОМ в проектуванні схеми для класу нелінійних пристроїв, потребує вирішення ряду проблем.

Насамперед усього, необхідний метод розрахунку періодичного режиму нелінійної схеми, який би враховував усі фактори, практично впливаючи на її вихідні характеристики. Іншими словами, метод повинен бути досить точним, а це не допускає звичайних спрощень в обчислювальній процедурі та в моделі транзистора.

Далі необхідно аналізувати стійкість періодичного режиму та положення рівноваги в нелінійної схемі. Ці задачі також не входять до переліку вирішуємих ні в одній із описаних в літературі проблемно-орієнтованих програм.

Наступна проблема – чутливість характеристик нелінійної схеми до змін внутрішніх параметрів. Рішення цієї задачі отримано для двох випадків: перший – схема лінійна, другий – нелінійна схема, але резистивна, що орієнтує на розрахунок чутливості робочої точки в колах з транзисторами та іншими активними приладами. Засоби розрахунку чутливості в нелінійній інерційній схемі в літературі відсутні.

Нарешті, треба сказати про відсутність методики проектування за допомогою ЕОМ, в якій містились би рекомендації що до вибору внутрішніх параметрів, мали б вказівки про те, як зберегти працездатність схеми при зміні зовнішньої температури і зовнішніх параметрів, як знизити високу чутливість характеристик і т. і.

Що до систем автоматизованого схемотехнічного проектування, то її створення можливо лише після вирішення перелічених проблем. Більш того, додатково треба вирішити ще ряд запитань: як повинен працювати з системою користувач, як повинна функціонувати вона – в якій послідовності виконувати розрахунки, як взаємодіють програми; на якій ЕОМ розміщати таку систему і т. і.