ПОЧАТКИ АНАЛОГОВОЇ СХЕМОТЕХНІКИ

1. ВСТУП

У цьому важливому розділі навчальної дисципліни "Аналогова схемотехніка" (АС) формулюється її предмет, тобто окреслюється основне коло питань, що розглядаються і вивчаються в дисципліні, а також пояснюється та обґрунтовується актуальність цих питань для електроніки і споріднених з нею технічних галузей.

1.1. Приклади електронних пристроїв

Навчальна дисципліна АС є технічною теоретичною дисципліною, яка охоплює важливу область знань, на які спирається технічна галузь електроніка. Щоб сформулювати предмет дисципліни АС необхідно попередньо увести поняття процесу і системи. Самі слова "процес" і "система" часто вживаються у повсякденні. Наприклад говорять: навчальний процес, виробничий процес, або: система освіти, система річок та озер, система управління. Однак використовувані у побуті слова "процес" і "система" звичайно застосовуються для надзвичайно широкого кола об'єктів, які можуть мати суттєво різну природу. Між тим кожна технічна дисципліна вивчає властивості об'єктів переважно однієї природи і тому в технічних дисциплінах значення термінів процес і система повинні додатково конкретизуватися і уточнюватися. Для визначення смислу цих термінів стосовно дисципліни АС доцільно спочатку розглянути декілька простих прикладів електронних пристроїв, щодо розуміння яких достатньо загальноосвітніх знань.

1. Медичний лікувальний апарат для проведення внутрішнього розігріву ділянок тіла людини. Пристрій (рис.1.1) містить генератор електричного струму ультрависоких частот (УВЧ), УВЧ - перетворювач 2 і пристрій управління 3. Перетворювач 2 створюється у вигляді двох металевих ізольованих пластин, між якими розташовують потрібну ділянку тіла людини, Він перетворює коливання електричного струму, який виробляється генератором 1, в енергію електро-

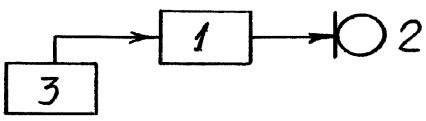

Рис. 1.1. Медичний лікувальний апарат для проведення внутрішнього розігріву ділянок тіла людини

магнітних хвиль, які розповсюджуються від однієї пластини до другої. На шляху розповсюдження енергія цих хвиль частково поглинається тілом між пластинами, за рахунок чого відбувається внутрішній розігрів ділянки тіла людини. Інтенсивність і тривалість коливань струму, тобто режим лікування, встановлюється за допомогою пристрою управління 3.

2. Пристрій звукопідсилення. Пристрій звукопідсилення, призначений для підсилення гучності промов доповідачів або концертних програм, у найпростішому варіанті зображений на рис.1.2. Пристрій містить мікрофон 1, електронний підсилювач 2 і гучномовець 3. Мікрофон є електроакустичним перетворювачем,

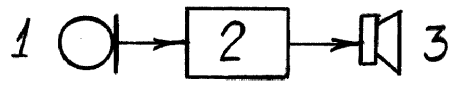

Рис. 1.2. Пристрій звукопідсилення

за допомогою якого звукові (акустичні) коливання повітря, що діють на мембрану мікрофона, перетворюються в коливання електричної напруги. Потужність цих коливань збільшується до потрібного рівня за допомогою електронного підсилювача 2. Гучномовець 3 є електроакустичним перетворювачем, за допомогою якого здійснюється зворотне перетворення підсилених електричних коливань в акустичні.

3. Радіолокатор. Це прилад спостереження за повітряним простором, призначений для виявлення перешкод руху літаків, і визначення відстаней до виявлених перешкод. Принцип дії радіолокатора схематично ілюструється на рис.1.4.

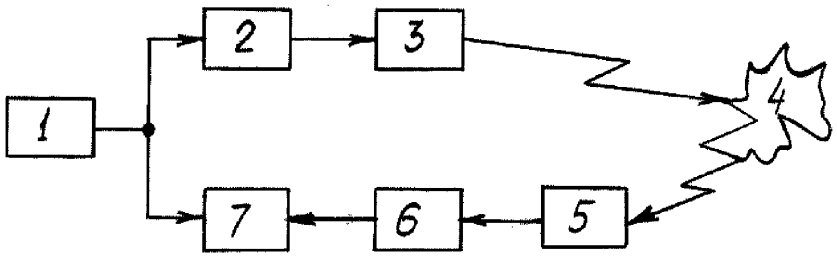

Рис. 1.4. Радіолокатор

Тактовний генератор (хронізатор) 1 одночасно запускає генератор струму високої частоти 2 і секундомір 7. В генераторі 2 виробляється короткий потужний імпульс струму, який збуджує випромінюючу антену 3. Антена перетворює енергію імпульсу струму в енергію електромагнітної хвилі що випромінюється і розповсюджується у повітряному просторі. Цю хвилю називають зондувальним імпульсом. Якщо на шляху розповсюдження зондувального імпульсу опиниться летючий об'єкт 4 або інша перешкода руху літака, то деяка

(звичайно незначна) частка енергії імпульсу відіб'ється від перешкоди, утворюючи відбитий (зворотний) імпульс, який розповсюджуватиметься у зворотному до зондувального імпульсу напрямку. Цей імпульс називають ехо-сигналом. Ехо-сигнал сприймається приймальною антеною 5, яка перетворює електромагнітні коливання в коливання електричної напруги, що подається до входу пристрою обробки 6. У пристрої 6 ця напруга підсилюється і перетворюється в імпульс, який зупиняє секундомір 7.

Якщо відстань від радіолокатора до перешкоди 4 дорівнює D, то час τ, виміряний секундоміром 7 від посилання зондувального імпульсу до приходу ехо-сигналу, дорівнюватиме: $\tau = 2D/c$, де c - швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль. Оскільки величина c є відомою, то відліковий пристрій секундоміра може бути розміченим (відградуйованим) не в одиницях часу, а безпосередньо в одиницях відстані.

Розглянуті приклади, звичайно, далеко не вичерпують усього незчисленного різноманіття існуючих електронних пристроїв. Такі широко розповсюджені об'єкти, як телевізор, мобільний телефон, комп'ютер і багато-багато інших є також електронними пристроями. Наведені ж приклади є типовими і з одного боку ілюструють різноманіття принципів побудови електронних пристроїв, а з другого - свідчать про широке застосування електронних пристроїв у найрізноманітніших, у тому числі і найважливіших, сферах людської діяльності. Однак у міру розвитку науки і техніки все нагальнішою стає потреба у створенні нових, ще більш досконалих електронних пристроїв.

1.2. Поняття процесу і системи

З розглянутих в п.1.1 прикладів видно, що усі електронні пристрої, не зважаючи на їх різноманіття, мають спільні ознаки, за сукупністю яких вони не відрізняються між собою, але відрізняються від інших існуючих об'єктів. Перш за все ці пристрої є матеріальними об'єктами, які не виникають самі по собі, а створюються штучним шляхом і мають цілком певне призначення. Домовимося всі штучні матеріальні об'єкти, створювані для виконання заздалегідь визначеного призначення, називати технічними системами. Природні чи не матеріальні

об'єкти не є технічними системами.

Усі електронні пристрої є технічними системами, але порівняно з останніми мають ще ряд додаткових ознак, які характеризують пристрої як завершені об'єкти. Такими ознаками є, наприклад, конструктивне виконання, дизайн, умови використання та ін. Однак при вивченні технічних систем ці ознаки є другорядними і для теоретичних технічних дисциплін не являють інтересу. Тому в подальшому поняття пристрою та технічної системи вважатимуться еквівалентними.

Поняття технічної системи є достатньо широким. Звертаючись до розглянутих в п.1.1 прикладів можна говорити про систему проведення внутрішнього розігріву ділянок тіла людини, систему звукопідсилення, систему радіолокації, тощо. Разом з тим окремі вузли цих систем, які мають визначене призначення, є також технічними системами. До таких систем відносяться, наприклад, генератори, підсилювачі, електромагнітні і електроакустичні перетворювачі та інші. Очевидно і самі ці вузли можуть вміщувати у собі окремі більш прості вузли, які матимуть певне призначення, і тому також є технічними системами.

Однак поняття технічної системи не дозволяє розрізняти між собою самі технічні системи. Тому для вивчення конкретних технічних систем їм надають додаткових ознак, які є суттєвими щодо систем, які підлягають вивченню. Однією з найважливіших таких ознак є спосіб надання системам здатності виконувати їх призначення. Система виконує своє призначення шляхом здійснення певної роботи, тобто лише за рахунок споживання деякої енергії. Теоретично не має принципового значення, яка саме енергія надаватиме дієздатності тій чи іншій системі. Але способи практичного створення технічних систем суттєво залежать від природи використовуваних енергій. Наприклад, механічні, сонячні, електронні, атомні та інших типів годинники є технічними системами з однаковим призначенням, але вони суттєво відрізняються одна від одної. Природа (або вид) енергії, використовуваної для надання системам дієздатності, є ознакою, за якою технічні системи відрізняються між собою і за якою походять назви самих технічних систем. Наприклад: механічна система, теплова система, електрична система і т.д. Таким же чином утворюються і назви дисциплін, в яких вивчаються технічні системи.

Споживання енергії під час роботи системи відбувається як правило нерівномірно, величина споживаної енергії змінюється з часом за законом, визначеним виконанням системою свого призначення. В подальшому усякі зміни у часі енергії, або взагалі будь-якої фізичної величини, домовимось називати фізичним процесом. Тоді технічна система є фізичним об'єктом, в якому відбуваються процеси фізичної природи. Саме за рахунок дії певних фізичних процесів системи виконують своє призначення, а споживана енергія використовується для підтримки цих процесів. Поняття процесу і системи нерозривно зв'язані між собою. Фізичні процеси можуть відбуватись лише в якійсь фізичній системі, а саме функціонування будь-якої системи, або її вузлів, є цілком визначеним фізичним процесом.

1.3. Електротехнічні та електронні системи

З розглянутих в п.1.1. прикладів електронних пристроїв видно, що в електронних системах відбуваються процеси електричної природи (електричні струми та напруги). Це означає, що електронні системи є системами електричними. Але електричними є не лише електронні системи. Надзвичайно широке застосування мають різного роду електротехнічні системи, дієздатність яких також, як і електронних, забезпечується за рахунок дії в них електричних процесів. Відомими прикладами електротехнічних систем є системи генерування та мережі постачання електричної енергії, електротранспорт, електропривід, побутові електроприлади та інші.

Між електротехнічними і електронними системами є багато спільного. Електротехнічні та електронні системи мають спільну теоретичну основу –теорію електричних кіл. Однак за призначенням і методами створення електротехнічні та електронні системи суттєво відрізняються одні від одних. Якщо електротехнічні системи призначаються переважно для перетворення електричної енергії у певну роботу або тепло, то призначенням електронних систем переважно є передача, прийом та перетворення інформації. Щоб підкреслити взаємну самостійність цих систем електротехнічні системи називають ще енергетичними (або силовими), а електронні – інформаційними системами. Об'єктами вивчення в дисципліні АС є електронні системи. Електротехнічні системи вивчаються в інших технічних дис-

циплінах.

1.4. Типові електронні системи

Оскільки електронні системи є системами електричними, то як фізичні об'єкти вони є певними електричними колами. Здавалося б, електронні системи можна було б вивчати за допомогою потужних методів теорії електричних кіл. Однак вивчати електронні системи як фізичні об'єкти, тобто на фізичному рівні, можливо лише тоді, коли вони є простими, тобто коли в них відбувається відносно невелика кількість електричних процесів. Здебільшого це характерно для електротехнічних систем. Сучасні ж електронні системи можуть бути настільки складними, що електричні процеси, які в них відбуваються, нерідко не вдається навіть перелічити.

Для спрощення вивчення складних систем їх звичайно структурують, тобто розбивають на більш прості системи, які називають підсистемами. Наприклад, розглянутий в п. 1. 1. радіолокатор (рис.1.4) може бути розбитим на такі підсистеми: підсистему випромінювання зондувального імпульсу, в яку входять генератор 2 і випромінювальна антена 3; підсистему прийому ехо-сигналу, в яку входять приймальна антена 5 і пристрій обробки 6, та підсистему вимірювання часу запізнювання ехо-сигналу, яка містить секундомір 7 і хронізатор 1.

Підчас структурування вважається, що система виконує своє призначення шляхом здійснення певних дій, які називають операціями. При цьому підсистеми здійснюють операції більш прості, ніж уся система в цілому. Утворювані підсистеми у свою чергу можуть розбиватися на ще більш прості підсистеми, поки рівень розбиття не опуститься до елементарних систем, які виконуватимуть лише одну операцію. Елементарні системи, що виконують лише одну операцію, яка не може бути розбитою на більш прості, називатимуться типовими системами. Прикладами типових систем є підсилювачі, генератори, електромагнітні та інші перетворювачі і т.п. Таким чином будь-яка електронна система може бути представленою сукупністю типових систем, які певним чином з'єднуються і взаємодіють між собою. Способи структурування електронних систем у значній мірі визначаються досвідом і кваліфікацією фахівців.

Подвійне відображення типових систем як операційних і фізичних об'єктів дозволяє значно спростити вивчення складних систем. Дійсно, принаймні до рівня типових систем електронні системи та їх підсистеми можна вивчати лише на операційному, або інакше - на системному рівні, зовсім не цікавлячись фізичними процесами, які відбуваються в системах. Суттєвим є лише те, які саме і в якій послідовності системи та їх підсистеми повинні здійснювати операції для виконання свого призначення. На фізичному ж рівні вивчаються лише типові системи, які окрім того, що в них відбувається відносно невелика кількість електричних процесів, мають ще такі важливі особливості:

- призначення типових систем є заздалегідь визначеним і воно не залежить від призначення тих систем, де типові системи використовуватимуться. Тобто типові системи з певним призначенням можуть використовуватись у складних системах будь-якого призначення;

- якість складних електронних систем суттєво визначається якісними показниками застосовуваних в них типових систем.

Завдяки відзначеним особливостям типові електронні системи є важливими самостійними об'єктами вивчення в дисципліні АС.

1.5. Предмет дисципліни АС

До типових систем, використовуваних для створення сучасних електронних систем, висуваються жорсткі вимоги щодо високої якості виконання ними заданих операцій. Для задоволення цим вимогам хід електричних процесів в системах повинен точно відповідати виконуваним операціям. Однак електричні процеси зовсім не залежать від призначення систем і хід цих процесів цілком визначається лише електричними властивостями систем. Щоб створювати типові системи, які задовольняли б вказаним вимогам, необхідно знати закономірності, які визначають операційні та електричні властивості систем і зв'язки між ними. Такі закономірності отримують методами наукових досліджень, про що йтиметься далі. За цим треба мати на увазі наступне.

Дослідження, на меті яких є отримання закономірностей, що відображають хід процесів в системах з певними властивостями, дістали назву аналізу систем.

Отримувані за результатами аналізу систем закономірності є також ґрунтом для досліджень зворотного характеру, результати яких мають давати відповіді на питання: чи можна, і якщо так, то як саме створити систему з потрібними властивостями? Такі дослідження дістали назву синтезу систем. Однак за великого різноманіття і всезростаючої складності сучасних електронних систем аналіз та синтез різних типових систем як правило не вдається проводити якимось одним універсальним методом. Не рідкими є випадки, коли метод, ефективний для аналізу однієї системи, стає зовсім непридатним для аналізу інших систем. Різноманітні методи аналізу і синтезу електронних систем самі є важливими об'єктами вивчення в дисципліні АС.

На підставі обговореного предметом дисципліни АС є вивчення принципу дії типових електронних систем і загальних закономірностей щодо процесів, які можуть відбуватися в цих системах, а також вивчення основних методів аналізу і синтезу типових електронних систем.

Результати і положення, отримувані в дисципліні АС, є основою для побудови методів створення реальних електронних систем. Отже дисципліна АС є фундаментальною теоретичною дисципліною для ряду спеціальних технічних дисциплін з питань проектування, конструювання та виготовлення електронних систем. Для опанування дисципліни АС корисно також поновити знання щодо найважливіших положень вищої математики, теорії електричних кіл та основ електроніки.

ЧАСТИНА 1. СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЧІВ СИГНАЛІВ

2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ

2.1. Особливості вивчення типових електронних систем

Вивчення технічних дисциплін і, зокрема, дисципліни АС здійснюється за допомогою методів наукових досліджень. За цими методами наукові положення в дисциплінах подаються не як безперечні факти, що потребують механічного завчання, а як достовірні результати наукових досліджень з обов'язковими доказами істинності цих результатів.

Загальна схема вивчення типових електронних систем наведена на рис.2.1. На рисунку досліджувана система ДС представлена у вигляді об'єкта, який має вхід для подавання вхідного процесу $x(t)$ і вихід для знімання вихідного процесу $y(t)$. Процес $x(t)$ формується джерелом вхідного процесу ДВП і називається впливом на систему. Процес $y(t)$, який є результатом перетворення системою процесу $x(t)$ і передається споживачу вихідного процесу СВП, далі називатиметься відгуком (або реакцією) системи на вплив $x(t)$. Оскільки різні системи (тобто системи з різними властивостями) дають на один і той же вплив різні відгуки, то у відгуку системи міститься інформація про її властивості.

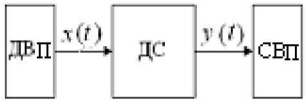

Рис.2.1.Загальна схема вивчення типових електронних систем

Для досягнення високої ефективності досліджень необхідно враховувати ряд особливостей щодо їх проведення. Основні особливості полягають в наступному.

1. В дійсності досліджувана система досліднику здебільшого не є доступною. Наприклад, коли ця система ще не існує, або є надмірно складною. Тому для вивчення електронних систем звичайно створюють допоміжні об'єкти, які за природою, конструкцією, дизайном та іншими показниками можуть суттєво відрізнятися від досліджуваних систем, але повинні з прийнятною точністю відтворювати властивості цих систем. Такі допоміжні об'єкти називають моделями досліджува-

них систем. Поняття моделі застосовується також і до процесів, що відбуваються в електронних системах.

Очевидно, що кожний об'єкт чи процес може відображатися безліччю різних моделей, але у межах кожного конкретного дослідження вибирається одна модель, яка повинна задовольняти двом взаємно суперечливим вимогам. Модель повинна бути адекватною реальним об'єктам, тобто в достатній мірі точно відображати властивості досліджуваних систем і процесів, що в них відбуваються. Однак модель повинна також бути достатньо простою для створення і використання. У зв'язку з цим необхідна вагома аргументація для обґрунтування компромісу при створені або виборі тієї чи іншої моделі.

2. Об'єкти ДВП і СВП на рис.2.1 не є елементами досліджуваної системи, але необхідні для її вивчення. Однак за рахунок приєднування до ДС цих, або ще якихось, об'єктів може траплятися так, що процеси в ДС ставатимуть залежними не лише від властивостей цієї системи, але й від властивостей ДВП, СВП та інших об'єктів. Це приводитиме до спотворень процесів в ДС а, отже, і інформації про її властивості. Для запобігання виникненню спотворень об'єкти ДВП, СВП та ін. необхідно вибирати або створювати так, щоб їх вплив на процеси в ДС практично був відсутнім.

2.2. Основні методи вивчення типових електронних систем

Реалізація (здійснення) загальної схеми вивчення типових електронних систем (рис.2.1) відбувається за допомогою методів наукових досліджень. У теперішній час до основних методів наукових досліджень відносять теоретичні, експериментальні дослідження, та методи моделювання на електронних обчислювальних машинах (ЕОМ).

Теоретичні дослідження, які часто називають ще математичним моделюванням, у загальному випадку виконуються у три етапи. На першому етапі створюється математична модель досліджуваного об'єкта. Стосовно електронних систем математична модель кількісно відображає взаємозв'язки між процесами в системі за допомогою математичних залежностей.

На другому етапі проводиться аналіз математичної моделі математичними методами і отримуються очікувані кількісні закономірності у формі математичних формул чи функцій.

На третьому етапі результати математичних досліджень підлягають фізичній інтерпретації. Оскільки математичні об'єкти мають не фізичну природу, то може траплятися так, що деякі результати досліджень, що не суперечать суті математичних об'єктів, виявляться суперечними суті фізичних об'єктів. Наприклад, результати математичних досліджень можуть приводити до уявних чи комплексних значень фізичних величин, які в дійсності можуть набувати лише дійсних значень. На стадії фізичної інтерпретації відбувається зворотний перехід від математичних об'єктів до фізичних і перевіряється відповідність отриманих математичних результатів реальним фізичним явищам.

Теоретичні методи є дуже ефективними, оскільки в математиці розроблені потужні методи перетворення та аналізу функцій і, окрім того, для проведення теоретичних досліджень не потребується дороге обладнання. Ці методи широко використовуються при вивченні теоретичної частини дисципліни АС .

Експериментальні дослідження проводять тоді, коли не можна домогтися бажаних результатів методами теоретичних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень попередньо виготовлюють макет, або, як говорять, фізичну модель досліджуваного об'єкта. До фізичної моделі, як і до математичної, висуваються взаємно суперечливі вимоги: фізичні властивості моделі повинні максимально наближатися до властивостей досліджуваного об'єкта, але при цьому макет об'єкта повинен бути якомога простим у виготовленні та використанні.

Для виконання експериментальних досліджень макет системи збуджують процесами зі заздалегідь відомими характеристиками. За допомогою контрольно-вимірювальних приладів спостерігають процеси у контрольованих ділянках фізичної моделі і в точно визначені моменти часу реєструють (вимірюють) значення цих процесів. Після обробки результатів вимірювань роблять висновки щодо властивостей і характеристик досліджуваного об'єкта.

Експериментальні дослідження, які ще називають фізичним моделюванням, є

менш економічними порівняно з теоретичними, оскільки для їх проведення часто необхідне дороге обладнання. Експериментальні і теоретичні дослідження мають тісний зв'язок. Так, для проведення складних експериментів часто потрібні глибокі теоретичні обґрунтування, а результати складних теоретичних досліджень неодмінно повинні перевірятися і підтверджуватися експериментально. Експериментальні методи досліджень широко використовуються при вивченні дисципліни АС в її лабораторній частині.

Методи моделювання на ЕОМ займають проміжне місце між теоретичними та експериментальними методами досліджень. Дослідження проводяться шляхом безпосередніх обчислень за допомогою ЕОМ (здебільшого - комп'ютерів) значень процесів у заданих ділянках досліджуваних систем, представлених математичними моделями. Збудження систем проводять процесами з відомими характеристиками, які також відображаються математичними моделями. Математичні моделі процесів і систем уводяться в ЕОМ у формі обчислювальних програм. У теперішній час в ЕОМ можуть уводитися не лише числові дані, але й електричні процеси, що можуть протікати в реальних електронних системах. Це означає, що сучасні ЕОМ можуть використовуватися не лише для теоретичних досліджень, як високопродуктивні обчислювальні засоби, а також для експериментальних досліджень. Тому моделювання на ЕОМ за останній час набуває значення не допоміжного, а одного з основних методів наукових досліджень.

2.3. Загальні математичні моделі електричних процесів в електронних системах

Вивчення типових електронних систем здійснюється через вивчення електричних процесів, які відбуваються в цих системах. При проведенні теоретичних досліджень електричні процеси відображають математичними моделями. Математичною моделлю електричного процесу є математична функція, незалежній змінній (аргументу) якої надається смисл часу, а самій функції - смисл фізичної величини (наприклад, електричного струму чи напруги).. В подальшому там, де не виникатиме непорозумінь, замість терміну математична модель електричного процесу заради стислості використовуватимуться більш коротші терміни: елект-

ричний процес або просто процес. Крім того в математичних моделях процесів значення незалежної змінної називатимуться також моментами часу, а значення залежної змінної – миттєвими значеннями процесу.

Усі електричні процеси, які можуть відбуватися в електронних системах, поділяються на дві великі групи: сталі процеси і змінні процеси. Загальна математична модель сталих процесів $x(t)$ має вигляд:

$$x(t) = X, \tag{2.1}$$

де X – стала величина. Як видно з (2.1), сталий процес має однакові миттєві значення для всіх $-\infty < t < \infty$. Це означає, що сталий процес є цілком відомим, якщо є відомим хоча б одне з його значень. Такі процеси не можуть використовуватися як носії інформації або для здійснення операцій над іншими процесами. Однак сталі процеси застосовуються в електронних системах як носії енергії, використовуваної для надання системам змоги виконувати їх призначення.

Загальна математична модель змінних процесів $x(t)$ має вигляд:

$$x(t) = f(t), \tag{2.2}$$

де $f(t)$ – символ закону, за яким змінюються, або розподілені у часі, миттєві значення процесу $x(t)$. З (2.2) видно, що на одміну від сталого процесу (2.1) для вичерпного визначення змінного процесу треба знати його миттєві значення в усі моменти часу. При цьому у різні моменти часу миттєві значення змінного процесу можуть мати або різні, або однакові знаки. У першому випадку процеси називають знакозмінними, або просто змінними, а у другому випадку – пульсуючими процесами.

Для наочного відображення електричних процесів їх математичні моделі представляють графічно, відкладаючи по осі абсцис значення моментів часу *t,* а по осі ординат - значення самого процесу $x(t)$. На рис.2.2 наведено графіки сталого, змінного (точніше – знакозмінного,) і пульсуючого процесів. З графіків видно, що сталі процеси (пряма 1), графічно представляються паралельними до осі часу прямими на відстані X від осі. Значення змінних (крива 2) і пульсуючих

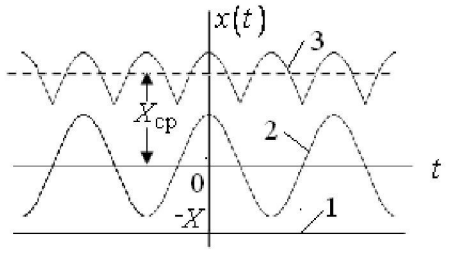

Рис.2.2 Графіки електричних процесів

(крива 3) процесів утворюють на графіках суцільні лінії, які називають формою процесів.

Значення змінних і пульсуючих процесів коливаються навколо їх середнього значення $X_{ср}$. Пряма $X_{ср}$ проводиться так, щоб площа коливань процесу над $X_{ср}$ дорівнювала б площі його коливань під $X_{ср}$. Середнє значення змінного процесу ще називають його постійною складовою, Постійна складова пульсуючого процесу завжди має такий же знак, як і всі його миттєві значення (штрихова пряма $X_{ср}$ на рис.2.2). Постійна складова змінного процесу може бути позитивною, негативною, або дорівнювати нулю. Коливання значень змінних і пульсуючих процесів навколо їх постійної складової називають також змінною складовою процесу. Таким чином пульсуючі процеси мають постійну та змінну складові, а у змінних процесів постійна складова може бути відсутньою (дорівнювати нулю).

2.4. Математичні моделі змінних процесів

Група використовуваних в електронних системах змінних електричних процесів є надзвичайно широкою, у наслідок чого не вдається відобразити ці процеси якоюсь однією загальною математичною моделлю, з якої моделі усіх змінних процесів отримувалися б як окремі випадки. Тому змінні процеси поділяють на окремі види, здебільшого за типом змінних, які відображають моменти часу та миттєві значення процесів. В електроніці основними видами змінних процесів вважаються неперервні, імпульсні, дискретизовані у часі, квантовані за рівнем і цифрові процеси.

Неперервними називають змінні процеси, значення яких утворюють на їх графіках суцільну лінію так, що нескінченно малим приростам часу відповідають нескінченно малі прирости процесу (процеси 2, 3 на рис.2.2). В математичних моделях неперервних процесів як моменти часу, так і миттєві значення процесів, відображаються неперервними величинами, тобто неперервні процеси є неперервними як у часі, так і за величиною.

Імпульсними називають змінні процеси, значення яких на одних інтервалах часу за модулем перевищують заздалегідь встановлений поріг X_0, а на інших інтервалах часу за модулем є меншими за цей поріг. Приклад графіка імпульсного процесу наведено на рис.2.3. Ділянки процесу, де його значення за модулем перевищують поріг X_0, називають імпульсом, а ширину цих ділянок на осі часу – тривалістю імпульсу $\tau_{\text{і}}$. Ділянки процесу, де його значення за модулем є меншими за поріг X_0, називають паузою, а ширину цих ділянок на осі часу – тривалістю паузи $\tau_{\text{п}}$. Якщо $X_0 = 0$, то паузами є інтервали часу, на яких значення імпульсного процесу тотожньо дорівнюють нулю. У моменти переходу від імпульсів до пауз і навпаки імпульсні процеси можуть потерпати розриви першого роду. В електроніці неперервні та імпульсні процеси здебільшого об'єднують в один вид **аналогових** процесів. Таким чином неперервні та імпульсні процеси є процесами аналоговими.

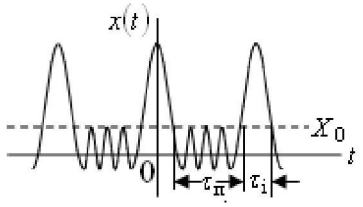

Рис.2.3. Імпульсний процес

Дискретизованими у часі називають змінні процеси, значення яких тотожньо дорівнюють нулю на усій осі часу $-\infty < t < \infty$ за винятком дискретних моментів часу $t_{\text{д}}$, які називають моментами дискретизації. Відстань між сусідніми моментами $t_{\text{д}}$ називають кроком дискретизації Δ_t процесу $x(t)$. Графік дискретизованого у часі процесу наведено на рис.2.4. Оскільки в моменти $t_{\text{д}}$ дискретизовані у часі процеси можуть набувати довільних значень, то ці процеси є дискретними у часі і неперервними за величиною.

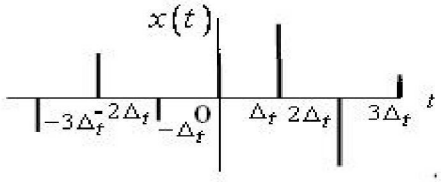

Рис.2.4. Дискретизований у часі процес

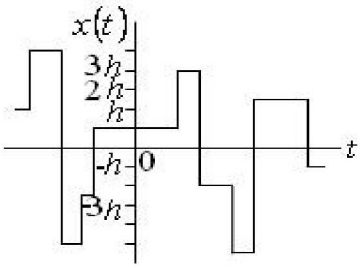

Рис.2.5. Квантований за рівнем процес

Квантованими за рівнем є змінні процеси, значення яких можуть дорівнювати лише цілому числу квантів, де квант h –найменше за модулем відмінне від нуля значення процесу $x(t)$. Якщо відоме також максимально можливе значення $x_{\max} = Nh$ процесу $x(t)$, де N – максима-

льне число його квантів, то відомими є усі можливі значення процесу, але тривалості цих значень можуть бути довільними. Отже квантовані за рівнем процеси є неперервними у часі і дискретними за величиною.

Цифрові процеси утворюються або шляхом квантування за рівнем дискретизованого у часі процесу, або дискретизацією у часі квантованого за рівнем процесу. Таким чином цифрові процеси є дискретними як за величиною, так і за часом. Така подвійна дискретизація здійснюється з кроком дискретизації у часі Δ_t і кроком квантування за рівнем Δ_x.

В електроніці з усіх згаданих видів процесів найширше використання мають аналогові і цифрові процеси. Важливою відзнакою цих процесів є те, що в їх математичних моделях моменти часу і миттєві значення процесів відображаються змінними одного типу: в аналогових моделях – неперервними змінними, в цифрових моделях – дискретними змінними. За назвами процесів називаються і типові системи, в яких ці процеси відбуваються. Очевидно, що в аналогових типових системах не можуть відбуватися цифрові процеси, а в цифрових типових системах – аналогові. Навчальна дисципліна АС присвячена, як зазначалося раніше (п.1.4), вивченню переважно аналогових типових електронних систем, в яких відбуваються аналогові електричні процеси.

2.5. Параметри аналогових процесів

Електричні процеси, що відбуваються в сучасних аналогових електронних системах, можуть бути доволі складними. Наприклад звукові та телевізійні сигнали, сигнали медичної діагностики та ін. Внаслідок цього складними виявлятимуться і математичні моделі таких процесів. Однак стосовно задач аналогової схемотехніки у багатьох практичних випадках можна не цікавитись тим, як саме змінюються процеси з плином часу. Суттєвим є лише те, у яких границях (діапазонах) можуть змінюватися їх значення і яким є розташування процесів відносно осей координат. У таких випадках процеси відображаються лише їх границями, тобто декількома сталими числами, які, проте, дають інформацію про процеси з достатньою для практичного використання повнотою. Ці числа називають пара-

метрами процесів. Найпростішими параметрами процесів є тривалість, рівень (масштаб) і затримка процесів (рис.2.6).

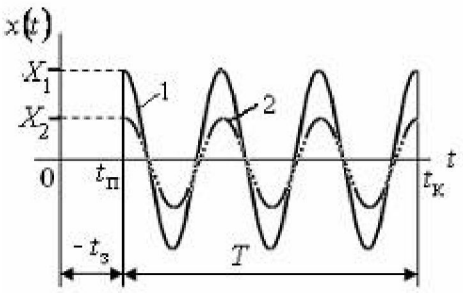

Рис.2.6. Графіки процесів з позначенням параметрів

Під тривалістю T (інакше – часом існування) процесу $x(t)$ розуміють інтервал часу, зовні якого значення процесу або тотожньо дорівнюють нулю, або не перевищують за модулем заздалегідь встановленого порогу X_0.

Під рівнем процесу $x(t)$ розуміють його максимальне $X_{\max}$ або ефективне (середньоквадратичне) $X_{\text{еф}}$ значення. В аналоговій схемотехніці для визначення рівня сигналів зручніше використовувати $X_{\max}$, хоча усі вимірювачі рівня градуюються у ефективних значеннях.

Під затримкою, або зсувом, $t_з$ процесу $x(t)$ розуміють координату вздовж осі часу певного (наприклад максимального, як на рис.2.6,) значення процесу.

На рис.2.6 наведено графіки двох процесів (криві 1,2), які мають однакову форму, але є різними, оскільки мають різні параметри (різні рівні X_1 і X_2). З рис.2.6 видно, що за значеннями параметрів видається можливим відрізняти один від одного процеси $x(t)$ з однаковою формою. Про інші можливі параметри процесів йтиметься далі.

З використанням параметрів загальна математична модель процесів (2.2) набуває вигляду:

$$x(t)=\begin{cases} X_{\max} f_1(t-t_з), & \text{якщо } t_п < t < t_к, \\ 0, & \text{для інших } t, \end{cases} \qquad (2.3)$$

де $t_п$ і $t_к$ - моменти початку і кінця процесу $x(t)$ (можуть бути і нескінченими), $f_1(t)=f(t)/X_{\max}$ - закон зміни миттєвих значень, або форма, процесу $x(t)$, $X_{\max}=\max|x(t)|$. В (2.3) сталі числа $T=t_к-t_п$ - тривалість, $X_{\max}$ - максимальне за модулем значення і $t_з$ - затримка (час запізнювання) є основними параметрами процесу $x(t)$.

2.6. Періодичні і гармонічні процеси

Найбільш простими і разом з тим широко вживаними в аналоговій електроніці є періодичні та їх важливі різновиди прямокутний і гармонічний процеси. Такі процеси здебільшого використовують як зразкові впливи для вивчення та оцінки якості типових електронних систем.

Періодичним є процес $x_T(t)$, значення якого повторюються через однакові відрізки часу, які називаються періодом процесу $x_T(t)$. Математична модель періодичного процесу має вигляд:

$$x_T(t) = x(t - nT), \tag{2.4}$$

де $n = 0, \pm1, \pm2,\ldots$, - цілі числа, T – період процесу $x_T(t)$. Згідно з (2.4) особливістю періодичного процесу є те, що для його визначення на всій нескінченній осі часу $-\infty < t < \infty$ достатньо знати процес лише на одному з його періодів, тобто на скінченому інтервалі часу. Ще однією особливістю періодичного процесу є його фізична нереалізовуваність (нездійсненність): строго періодичний процес (2.4) повинен бути нескінченно протяжним, але будь-які реальні (штучно створювані) фізичні процеси обов'язково мають початок і кінець. Тому на практиці можна створювати лише процеси, які є відрізками, або наближенням, теоретично періодичних процесів, причому ці наближення є тим точнішими, чим більше періодів процесу $x_T(t)$ вкладається на цих відрізках.

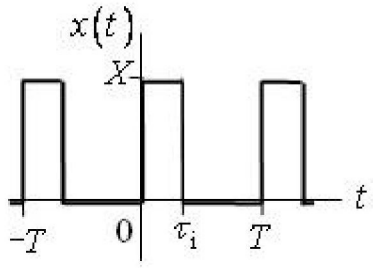

Рис.2.7. Графік періодичної послідовності прямокутних імпульсів

Як приклад на рис.2.7 наведено графік важливого різновиду періодичного процесу - періодичної послідовності прямокутних імпульсів, математична модель якої має вигляд:

$$x_T(t) = \begin{cases} X, \text{ якщо } nT < t < nT + \tau_i, \\ 0, \text{ якщо } nT + \tau_i < t < (n+1)T, \end{cases} \tag{2.5}$$

де $n = 0, \pm1, \pm2,\ldots$, - цілі числа, T – період, X – амплітуда імпульсів, яка відображає рівень процесу, τ_i і T-τ_i - тривалості імпульсів і пауз процесу $x_T(t)$. Для пе-

ріодичних імпульсних процесів характерним є ще один параметр – шпаруватість $q = T/\tau_i$. З рис.2.7 видно, що завжди $q > 1$, оскільки $\tau_i < T$.

Важливим і разом з тим найширше вживаним в аналоговій схемотехніці різновидом періодичного процесу є **гармонічний** процес

$$x(t) = X\cos(\omega t + \psi), \tag{2.6}$$

або

$$x(t) = X\cos(2\pi ft + \psi), \tag{2.7}$$

де X – амплітуда, ω - кругова, або кутова, частота, f - циклічна частота (дорівнює числу періодів процесу за одиницю часу) і ψ - початкова фаза – параметри процесу $x(t)$. Модель (2.6) використовують здебільшого для проведення аналітичних перетворювань, оскільки вона є простішою за (2.7), але у остаточних результатах теоретичних досліджень або розрахунків на практиці переходять від параметра ω до параметра f за формулою:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \tag{2.8}$$

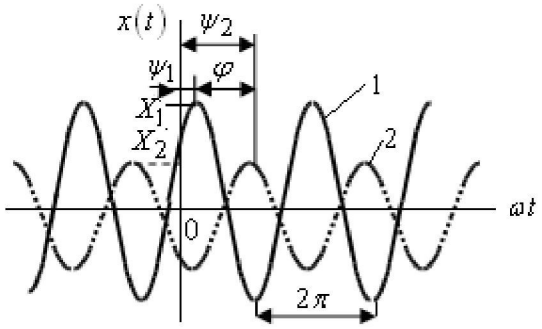

Рис.2.8. Графіки гармонічних процесів

В подальшому, враховуючи (2.8), параметр ω називатиметься просто частотою, як і параметр f.

На рис.2.8 наведено графіки двох гармонічних процесів (криві 1,2) з однаковими частотами, але з різними амплітудами X_1 і X_2 та початковими фазами ψ_1 і ψ_2. Розглядувані спільно два (або більше) гармонічні процеси з однаковими частотами мають взаємний параметр – різницю (початкових) фаз, або фазовий зсув:

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2. \tag{2.9}$$

Дійсна форма (2.6) є природною формою математичних моделей гармонічних процесів, параметри в таких моделях мають ясну фізичну інтерпретацію. Однак у дійсній формі гармонічні процеси відображаються тригонометричними функціями часу, математичні операції над якими можуть видаватися досить громіздкими

або складними, що утруднюватиме вивчення систем. Більш ефективними для теоретичних досліджень є математичні моделі гармонічних процесів у комплексній формі.

При переході до таких моделей вважають, що права частина виразу (2.6) є дійсною частиною комплексного процесу $\dot{x}(t)$:

$$\mathrm{Re}\{\dot{x}(t)\} = X\cos(\omega t + \psi). \tag{2.10}$$

В (2.10) крапка над символом процесу $\dot{x}(t)$ означає, що цей процес є гармонічним і комплексним. Уявну частину процесу $\dot{x}(t)$ утворюють від (2.10) за правилом:

$$j\,\mathrm{Im}\{\dot{x}(t)\} = jX\sin(\omega t + \psi), \tag{2.11}$$

де $j = \sqrt{-1}$ - уявна одиниця. З (2.10) і (2.11) отримується комплексний процес $\dot{x}(t)$ в алгебраїчній чи тригонометричній формі:

$$\dot{x}(t) = \mathrm{Re}\{\dot{x}(t)\} + j\,\mathrm{Im}\{\dot{x}(t)\} = X\cos(\omega t + \psi) + jX\sin(\omega t + \psi). \tag{2.12}$$

Алгебраїчна форма є зручною для сумування гармонічних процесів з однаковими частотами.

Комплексний процес (2.12) може також бути перетвореним до показової форми:

$$\dot{x}(t) = Xe^{j(\omega t+\psi)} = \dot{X}e^{j\omega t}, \tag{2.13}$$

де

$$\dot{X} = Xe^{j\psi} \text{ -} \tag{2.14}$$

комплексна амплітуда, яка стисло містить інформацію про дійсні амплітуду і початкову фазу гармонічного процесу $\dot{x}(t)$. Оскільки у дійсній і комплексній формах моделей гармонічного процесу його частота є одним і тим же числом ω, то між цими формами існує простий зв'язок:

$$X = |\dot{X}| = \sqrt{\mathrm{Re}^2\{\dot{x}(t)\} + \mathrm{Im}^2\{\dot{x}(t)\}}, \tag{2.15}$$

$$\psi = \arg\{\dot{X}\} = arctg\frac{\mathrm{Im}\{\dot{x}(t)\}}{\mathrm{Re}\{\dot{x}(t)\}}. \tag{2.16}$$

Математичні моделі гармонічних процесів у комплексній формі (2.14) і (2.12) не мають фізичного смислу, але вони не містять тригонометричних функцій, тобто є простішими від моделей у дійсній формі. Тому для проведення аналітичних перетворень доцільно переходити від дійсної до комплексної форми гармонічних процесів за формулами (2.14) і (2.12), а по закінченні перетворень повертатися за необхідності до дійсної форми за формулами (2.15), (2.16).

Слід також додати, що як і будь-які періодичні процеси, гармонічні процеси , є у строгому смислі фізично не реалізовуваними.

2.7. Розкладання періодичних процесів на елементарні гармонічні складові

В електронних системах можуть діяти не лише гармонічні процеси, але і багато інших значно складніших періодичних процесів. За великої кількості таких процесів є неперспективним будувати для кожного з них математичні моделі у вигляді певних періодичних функцій часу. Раціональним у цьому напрямку є метод розкладання довільних періодичних процесів на елементарні складові. За цим методом довільні процеси $x_T(t)$ представляються сумою елементарних процесів (елементарних складових) $x_k(t)$, які мають однакову форму і відрізняються між собою лише значеннями параметрів цих складових.

В аналоговій схемотехніці елементарними складовими для розкладання періодичних процесів прийнято гармонічні процеси з частотами $\Omega_k = k\Omega$, кратними основній частоті Ω процесу $x_T(t)$:

$$x_k(t) = X_k \cos(k\Omega t + \psi_k). \qquad (2.17)$$

Основна частота Ω просто виражається через період процесу T: $\Omega = 2\pi / T$. Тому, якщо період процесу $x_T(t)$ є відомим, то відомими є частоти усіх його гармонічних складових.

Від (2.17) отримується формула розкладання на гармонічні складові, або ряд Фур'є, періодичного процесу $x_T(t)$ у дійсній формі:

$$x_T(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k \cos(k\Omega t + \psi_k), \qquad (2.18)$$

де X_0 – постійна складова процесу $x_T(t)$ (її можна вважати гармонічною складовою, частота якої дорівнює нулю). З (2.18) видно, що для визначення періодичного процесу з періодом T достатньо визначити параметри його гармонічних складових X_0, X_k та ψ_k.

Для цілей аналізу та проведення розрахунків зручно переходити за допомогою формул (2.13), (2.14) від дійсної (2.18) до комплексної форми ряду Фур'є:

$$x_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{C}_k e^{jk\Omega t}, \tag{2.19}$$

де $\dot{C}_k = C_k e^{j\psi_k}$ - комплексні амплітуди гармонічних складових процесу $x_T(t)$, інакше їх називають коефіцієнтами ряду Фур'є. Особливістю комплексної форми ряду Фур'є (2.19) є те, що його члени $\dot{C}_k e^{jk\Omega t}$ існують як на позитивних $k\Omega$, так і на негативних $-k\Omega$ частотах. В дійсності ж складові з негативними частотами є лише формальними математичними об'єктами, які не мають фізичного смислу, але їх застосування сприяє подальшому спрощенню використання рядів Фур'є. Коефіцієнти $\dot{C}_k$ обчислюються за формулою:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{T}\int_T x_T(t) e^{-jk\Omega t} dt, \tag{2.20}$$

де наявність лише нижньої границі інтеграла означає, що інтегрування ведеться точно по періоду процесу $x_T(t)$.

Зворотний перехід від комплексної форми ряду Фур'є до дійсної в разі потреби здійснюється за формулами:

$$X_0 = C_0, \qquad X_k = 2\left|\dot{C}_k\right|, \qquad \psi_k = \arg\left\{\dot{C}_k\right\}, \qquad k > 0. \tag{2.21}$$

Наявність в формулі $X_k = 2\left|\dot{C}_k\right|$ коефіцієнта 2 зумовлена тим, що при переході від дійсної (2.18) до комплексної (2.19) форми ряду Фур'є число членів ряду подвоюється, але сам процес $x_T(t)$ при цьому не змінюється (винятком є лише постійна складова $X_0 = C_0$, яка існує на єдиній частоті $\Omega = 0$). Початкова фаза постійної складової ψ_0 немає смислу і часто її просто покладають такою, що

складової ψ_0 немає смислу і часто її просто покладають такою, що дорівнює нулю.

2.8. Спектри періодичних процесів

Якщо (2.19) представити у вигляді:

$$x_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \{\bullet\} e^{jk\Omega t}, \tag{2.22}$$

то з (2.19) і (2.22) випливає, що періодичний процес $x_T(t)$ є цілком відомим, якщо є відомим лише вміст фігурних дужок в (2.22) – послідовність, або розподіл за частотою, комплексних амплітуд гармонічних складових процесу. Розподіл за частотою комплексних амплітуд гармонічних складових

$$\dot{C}_k = \dot{C}(k\Omega),\ k = 0, \pm1, \pm2, \ldots, \pm\infty \tag{2.23}$$

називають спектром комплексних амплітуд, або комплексним спектром, періодичного процесу.

Таким чином комплексний спектр періодичного процесу містить вичерпну інформацію про цей процес. На цій підставі, враховуючи, що .згідно з (2.23) послідовність коефіцієнтів $\dot{C}_k$ є функцією частоти, комплексний спектр називають математичною моделлю періодичного процесу в частотній області. За цим модель $x_T(t)$ називають математичною моделлю періодичного процесу у часовій області.

Комплексні спектри є потужним інструментом аналізу (вивчення) періодичних процесів, але вони не мають фізичного змісту. Тому в остаточних результатах або при графічному відображенні за потреби переходять від комплексних спектрів до дійсних за допомогою формули (2.23):

$$\dot{C}(k\Omega) = C(k\Omega) e^{j\psi(k\Omega)}. \tag{2.24}$$

Згідно з (2.24) комплексний спектр періодичного процесу представляється парою дійсних функцій частоти: модулем

$$C(k\Omega) = \left|\dot{C}(k\Omega)\right| \tag{2.25}$$

і аргументом

$$\psi(k\Omega) = \arg\left\{\dot{C}(k\Omega)\right\}. \tag{2.26}$$

Розподіл за частотою модуля комплексного спектра (2.25) називають математичним спектром амплітуд, а розподіл за частотою аргументу комплексного спектра (2.26) називають математичним спектром фаз періодичного процесу $x_T(t)$. Математичні спектри амплітуд і фаз ще не є фізичними спектрами процесу $x_T(t)$, оскільки вони існують як на позитивних, так і на негативних

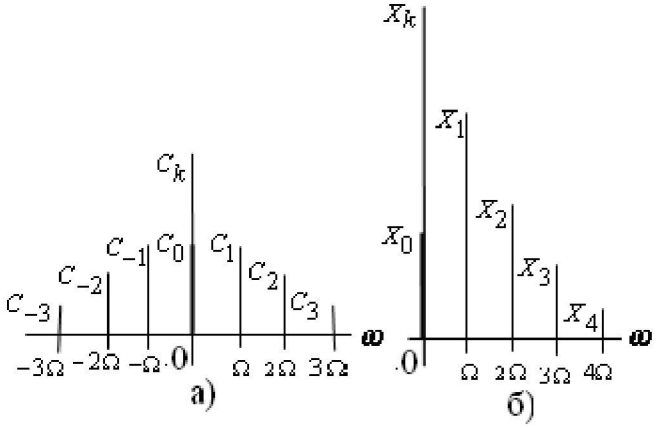

Рис.2.9. Математичний а) та фізичний б) спектри амплітуд періодичного процесу

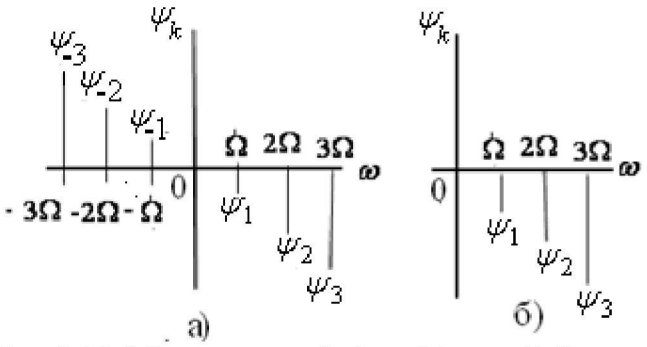

Рис.2.10. Математичний а) та фізичний б) спектри фаз періодичного процесу

частотах. Фізичні спектри існують, звичайно, лише на позитивних частотах. Перехід від математичних спектрів до фізичних здійснюється за допомогою формул (2.21).

На рис.2.9 для прикладу наведено ілюстративні графіки математичного і фізичного спектрів амплітуд, а на рис.2.10 – спектрів фаз періодичного процесу. Як видно з рисунків, спектри періодичних процесів відображаються вертикальними лініями на частотах гармонічних складових і їх ще називають дискретними або лінійчатими. З рисунків також видно, що фізичний спектр амплітуд отримується з математичного спектра шляхом відкидання гармонічних складових з негативними частотами і подвоєння (окрім постійної складової) амплітуд складових з позитивними частотами. Фізичний спектр фаз отримується з математичного шляхом простого ігнорування гармонічних складових з негативними частотами.

2.9. Перетворення Фур'є неперіодичних процесів

В аналоговій схемотехніці окрім періодичних широке застосування знаходять також неперіодичні процеси (наприклад, поодинокі імпульси), для вичерпного визначення яких необхідно знати їх миттєві значення на усій осі часу. Для пере-

воду неперіодичних процесів $x(t)$ в частотну область їх розглядають як періодичні процеси $x_T(t)$, період яких T прямує до нескінченості:

$$x(t) = \lim_{T \to \infty} x_T(t). \tag{2.27}$$

Після підставляння (2.27) у формули (2.19), (2.20) і нескладних перетворень отримуються формули переводу неперіодичних процесів з часової в частотну область і навпаки:

$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt, \tag{2.28}$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad . \tag{2.29}$$

(2.28) і (2.29) називають прямим та оберненим перетвореннями Фур'є і вони є формулами розкладання неперіодичних процесів на елементарні гармонічні складові. З порівняння (2.28) і (2.29) з (2.19) і (2.20) видно, що гармонічні складові неперіодичних процесів мають нескінченно близькі частоти і нескінченно малі амплітуди $d\dot{C} = \dot{S}(\omega) d\omega$. Однак нескінченно малі амплітуди є незручними для вживання і замість них на практиці використовують скінчену величину $\dot{S}(\omega) = dC / d\omega$, яку називають спектральною щільністю амплітуди або спектром неперіодичного процесу. Таким чином спектри неперіодичних процесів є суцільними, тобто вони є неперервними функціями частоти. У решті ж частотні властивості неперіодичних і періодичних процесів збігаються. Тому на практиці перевагу щодо застосування періодичних або неперіодичних моделей віддають виходячи з міркувань зручності їх використання.

2.10. Ширина спектра процесів

В частотній області важливим параметром аналогових процесів є ширина їх спектра. З (2.19) і (2.29) видно, що спектри як періодичних, так і неперіодичних аналогових процесів теоретично існують на всій осі частот, тобто є необмеженими за частотою. Але в дійсності спектри реальних процесів намагаються з різних причин максимально обмежити за частотою.

Стосовно до періодичних процесів в теорії рядів Фур'є доводиться рівність:

$$P = \frac{1}{T}\int_T x_T^2(t)dt = X_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{X_k^2}{2}, \qquad (2.30)$$

де T - період, $k \geq 0$ – номер гармонічної складової процесу $x_T(t)$. Якщо процесу $x_T(t)$ надати смислу електричного струму, то ліва частина (2.30) відображатиме активну потужність процесу P, яка розвивається на активному опорі 1 Ом, а права частина – розподіл за частотами $k\Omega$ потужностей P_k гармонічних складових цього процесу.

Оскільки потужність реальних процесів скінчена, то ряд в правій частині (2.30) завжди є збіжним. Оскільки всі члени цього ряду є позитивними, то для збіжності ряду повинно існувати таке число $k = N$, що члени ряду з номерами $k > N$ зі зростанням k повинні невпинно зменшуватися за величиною. Це означає, що гармонічні складові процесу з достатньо великими номерами уносять все менший вклад в потужність процесу. Практично для будь-якого реального періодичного процесу можна вказати такий номер гармоніки $k = N$, що загальна потужність всіх гармонічних складових з номерами $k > N$ складатиме незначну частку потужності процесу. З цього випливає виключно важливий факт, що теоретично не обмежені за частотою спектри реальних процесів практично займають скінчену смугу на осі частот.

Ширину смуги частот, усередині якої скупчена практично вся потужність процесу, називають шириною спектра процесу. Ширину спектра $\Delta\Omega = N\Omega$ процесу $x_T(t)$ кількісно визначають з умови $P_N = \alpha P$, де α - задане число, близьке до 1, P – потужність процесу $x_T(t)$, P_N - потужність суми перших N складових процесу $x_T(t)$. Гармонічну складову з номером N називають найвищою гармонікою процесу, а частоту $\omega_B = N\Omega$ - вищою частотою спектра процесу. Звичайно, ширина спектра процесу не може бути чітко визначеною, оскільки вона залежить від величини коефіцієнта α, який в залежності від конкретних практичних задач вибирають в межах $0{,}9 < \alpha < 0{,}999$. Однак важливою є сама можливість характеризувати реальні процеси скінченою шириною спектра.

Обмеження спектра процесів скінченою шириною означає заміну нескінченного ряду Фур'є скінченим числом його членів. Звичайно, це призводить до певних спотворень форми процесів. На рис. 2.11 для ілюстрації наведено графіки прямокутного періодичного процесу (2.5) і сум його перших гармонік. Як видно з рисунку, обмеження спектра процесу лише його першою гармонікою (крива $x_1(t)$) призводить до суттєвого спотворення форми процесу $x(t)$. Друга гармоніка в цьому процесі відсутня. З додаванням третьої гармоніки (крива $x_3(t)$) сума перших трьох гармонік дає вже процес, форма якого є достатньо близькою до форми процесу $x(t)$. На цій підставі ширина спектра періодичного процесу може бути також визначеною як смуга частот , обмеження якою теоретично необмеженого за частотою спектра процесу $x(t)$ призводить до допустимих спотворень форми процесу.

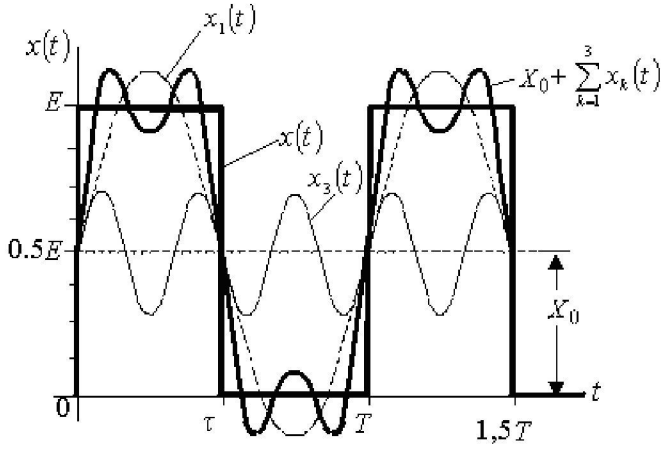

Рис.2.11. Процес $x(t)$ та його перші гармоніки

Очевидно, поняття ширини спектра може бути розповсюдженим на неперіодичні процеси, якщо замість спектра амплітуд скористатися спектральною щільністю.

На практиці, виходячи з потреб конкретних задач, спектри процесів намагаються обмежити якомога меншою шириною. Наприклад, середньостатистична ширина спектра звуку, що сприймається на слух, складає орієнтовно 18 кГц. Проте в радіомовленні вважають, що для високоякісного відтворення музичних програм достатньо обмежити ширину спектра звуку частотою 16 кГц. Для задовільного сприйняття радіомовних програм ширину спектрів обмежують частотою 4,5 кГц. В телефонії, де ставиться задача отримання лише чіткої розбірливості мови і щоб співбесідники могли впізнавати один одного за голосом, ширину спектра обмежують смугою частот 300...3300 Гц.

3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТИПОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

3.1. Типові електронні системи як операційні об'єкти

В п. 1.4 йшлося про те, що типові електронні системи мають подвійне відображення: як операційні об'єкти, які здатні виконувати певну операцію, і як фізичні об'єкти, в яких відбуваються процеси електромагнітної природи. Типові електронні системи здатні виконувати лише одну операцію і тому вони є найпростішими операційними об'єктами.

Математичні моделі таких об'єктів відтворюють зв'язок між впливом на систему $x(t)$ та відгуком системи $y(t)$ на цей вплив і в символьній (аналітичній) формі мають вигляд:

$$y(t) = \boldsymbol{L}\{x(t)\}, \tag{3.1}$$

де $\boldsymbol{L}$ – оператор системи. На рис. 3.1 модель (3.1) представлено у графічній формі. Оператор $\boldsymbol{L}$ відображає закон (правило), за яким система перетворює значення впливу $x(t)$ у значення відгуку $y(t)$. З (3.1) і рис. 3.1 видно, що оператор $\boldsymbol{L}$ вичерпно характеризує типову систему як операційний об'єкт: виконувана системою операція стає цілком визначеною, якщо стає відомим її оператор. На цій підставі типовим системам даються такі ж назви, які мають і виконувані цими системами операції (наприклад, підсилювач, генератор).

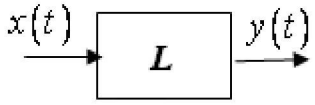

Рис.3.1. Графічне відображення типової електронної системи

Оператори типових систем отримуються, як говорилося в п.1.4, підчас структурування електронних систем. Далі оператори передаються до аналогової схемотехніки або як вихідні дані, або як еталони для створення та оцінки якості типових електронних систем.

3.2. Типові електронні системи як фізичні об'єкти

Оператор типової системи не є ще самою системою. Він лише показує, яку саме операцію повинна виконувати певна система для здійснювання свого призначення. Але при цьому, як видно з (3.1), оператор не містить ніякої інформації щодо реалізації системи. Для отримання такої інформації необхідно типові систе-

ми розглядати (вивчати) як фізичні об'єкти, де відбуваються електричні (точніше електромагнітні) процеси. Такими об'єктами є електричні кола. Отже типові системи як фізичні об'єкти є електричними колами.

Електричні кола створюються, як відомо з теорії електричних кіл, шляхом з'єднання між собою електричних двополюсників і чотириполюсників, які називають елементами електричних кіл. Елементи поділяються на активні, тобто джерела електричної енергії, і пасивні, які не є джерелами енергії. У свою чергу пасивні елементи поділяють на енергопоглинаючі та енергонакопичувальні. Способи з'єднання елементів в колах графічно відображають за допомогою схем електричних кіл.

Загальними математичними моделями електричних кіл, а,отже, і типових електронних систем є системи рівнянь Кірхгофа, які складають на підставі схем електричних кіл. Якщо коло не містить енергонакопичувальних елементів, то система рівнянь Кірхгофа є алгебраїчною, у протилежному випадку це система інтегро-диференціальних рівнянь.