

УДК 621.391

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.060308

В. Є. ДМІТРИЄВ, ст. викладач;

А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, здобувач;

Н. С. ЧУМАК, ст. викладач,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ІНВАРІАНТНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В СУЧАСНІЙ ТЕХНІЦІ ЗВ'ЯЗКУ

Подано результати дослідження та шляхи розв'язання одного з основних завдань у техніці зв'язку — боротьби із завадами, послаблення їх впливу. Як науково-технічне підґрунтя проблеми — теорія електровзв'язку.

Здійснено порівняльний аналіз особливості проблематики інваріантної системи в теорії автоматичного керування і в техніці зв'язку. Досліджено елементи теорії інваріантних систем зв'язку. Проаналізовано інваріантні системи керування (СК) різних класів та окреслено їх можливості. Визначено умови забезпечення інваріантності СК, оптимальну абсолютну інваріантну СК та кількісну характеристику завадостійкості, наведено відповідні математичні залежності. Запропоновано застосування досліджених методів для досягнення абсолютної або відносної інваріантності СК.

Ключові слова: інваріантність; адитивна завада; сигнал; система керування; характеристика завадостійкості; теорема Шеннона; розрахунок.

Вступ

Поняття інваріантності часто використовується в технічних науках для визначення властивості стійкості, нечутливості технічних систем до випадкових змін їх параметрів і до різних діянь (впливів). Терміни «інваріант», «інваріантний» означають «незмінний». В математиці інваріантом вважається величина (вираз, формула), що характеризує деякий математичний чи фізичний об'єкт і не змінюється за певних його перетворень. Наприклад, дисперсія $D(\xi)$ випадкової величини ξ не змінюється від додання до останньої довільної сталої величини a , тобто величина $D(\xi)$ є інваріантом перетворення виду $\xi + a$:

$$D(\xi) = \text{in var}(\xi + a) \quad (1)$$

або

$$D(\xi) = \text{in var } a, \quad (2)$$

$D(\xi)$ є інваріантом перетворення $\xi + a$ або $D(\xi)$ інваріантна до впливу a .

У сучасній теорії автоматичного керування питання, пов'язані з інваріантністю, посідають одне з центральних місць [1]. Під інваріантністю вважається здатність системи автоматичного регулювання (САР) протистояти діям (впливам). У ролі інваріанта виступає величина керуючого діяння (впливу) за однією з координат (чи просто керування). Якщо керування за деякою координатою не залежить від діяння, то САР — інваріантна. Розрізняють кілька форм інваріантності в САР, які відрізняються умовами і методами досягнення інваріантності.

Перша форма припускає існування двох каналів передавання впливу, до того ж діяння по другому штучно введеному каналу компенсує вплив на перший канал. Умовою досягнення першої форми інваріантності є (крім існування двох каналів) можливість одержання сумарного коефіцієнта передавання впливу, що дорівнює нулю, від точки прикладання діяння до регульованої координати.

Друга форма інваріантності пов'язана з використанням негативного зворотного зв'язку. Якщо величина керуючого сигналу за деякою координатою відома, то відхилення від неї, спричинені збурюванням, можна компенсувати за допомогою спеціального ланцюга зворотного зв'язку. У разі значного коефіцієнта підсилення в ланцюзі будь-які відхилення практично цілком компенсуються [1; 5].

Третя форма інваріантності в САР досягається під час одноканального передавання збурювання до точки керування через створення ланцюга з передатною функцією для збурювання, яка дорівнює нулю. Створення подібного ланцюга можливо тільки за апріорно відомою формою збурювального впливу.

Поряд з інваріантними САР функціонують інваріантні системи керування (СК) в техніці зв'язку, які є предметом представленого дослідження.

Доцільно зазначити, що термін «інваріантна система» потребує додаткового визначення, а саме: необхідно вказати, яка числова характеристика системи є інваріантом і відносно яких перетворень або впливів. У разі, коли в СК збурювальними діями виступають завади, характеристикою системи є її завадостійкість, виражена кількісно через імовірність помилки, якщо йдеться про канали передавання керуючої інформації. СК, кількісна характеристика завадостійкості якої є інваріантом певного класу

завад, вважається інваріантною стосовно цих завад. Це визначення інваріантної СК можна подати в математичній формі, аналогічно (1) або (2). Якщо позначити через P деяку кількісну характеристику завадостійкості зв'язку (ймовірність помилки), а через Ξ — множину реалізацій розглянутої завади, то в системі, інваріантної до завади Ξ ,

$$P = \text{in var } \Xi. \quad (3)$$

У лівій частині рівності (3) завжди стоїть числова характеристика завадостійкості даної СК, а праворуч — позначення завади, стосовно якої ця характеристика є інваріантом.

Проаналізуємо відмінності в проблематиці зв'язку інваріантних СК порівняно з інваріантними САР. Впливи і керуючі сигнали в САР зазвичай просторово розділені (у будь-кому разі у рамках вивчених у теорії інваріантності ситуацій). Це дає змогу вимірювати вплив (навіть якщо він є випадковим) і застосовувати всілякі компенсаційні методи реалізації інваріантності (перша і друга форми інваріантності).

У СК корисний сигнал і завада діють в одній і тій самій точці (наприклад, на вході приймача) і, як правило, принципово не можуть бути цілком розділені. У СК завжди є суміш сигналу з завадою (зокрема, адитивна). Внаслідок цього в СК неможливо або важко використовувати компенсаційні методи підгнічення завад і проблема досягнення інваріантності вирішується іншими способами, не характерними для САР. Інша особливість проблематики інваріантності СК полягає в тому, що в ролі інваріанта виступає не миттєве значення вихідної величини, а деяка статистична характеристика, зокрема математичне сподівання. Прикладом може бути ймовірність помилки, що є математичним сподіванням періодичності помилок.

Основна частина

Розглянемо роль і значення інваріантних систем керування в сучасній техніці зв'язку [2; 4]. До сучасних СК висувуються досить жорстокі вимоги до завадостійкості. СК, побудована на базі ТМН, призначена для керування різномірною телекомунікаційною мережею, тому найбільш важливою задачею є забезпечення збору даних про стан параметрів контрольованих об'єктів. Для передавання керувальної інформації в СК доцільно використовувати канали зв'язку різного типу, які є основою, зокрема місцевих мереж зв'язку. Тобто на другому рівні ТМН необхідно реалізувати надійну систему передавання даних.

Проаналізуємо методи досягнення цієї мети. У каналі зв'язку з постійними характеристиками ймовірність помилки є сталою величиною, отже, можна заздалегідь спроектувати систему так, щоб її завадостійкість задовольняла задані вимоги.

У каналах зв'язку зі змінними характеристиками ймовірність помилки є змінною величиною (неоднорідний канал зв'язку). У цьому разі, якщо навіть вдасться забезпечити середнє значення ймовірності помилки нижче заданої допустимої величини, в окремі інтервали часу ймовірність помилки набуває більше допустимого значення. У нестационарному каналі зв'язку, на відміну від стаціонарного зменшення середньої ймовірності помилки не свідчить однозначно про поліпшення якості функціонування системи. Якщо, наприклад, поряд зі зменшенням середньої ймовірності помилки збільшився відсоток випадків, коли ймовірність помилки більше припустимої, то вважається, що завадостійкість системи не збільшилася, а зменшилася.

Отже, для забезпечення прийнятної якості роботи реальної системи передавання дискретної інформації в каналі зі змінними характеристиками потрібно підтримувати ймовірність помилки на рівні, що не перевищує деякої заданої припустимої величини. Ця задача вважається виконаною, якщо:

- ймовірність помилки менше за задану і залишається незмінною, незважаючи на наявність завад, що спричиняють нестационарність каналу зв'язку;
- ймовірність помилки під впливом завад, що зумовлюють нестационарність каналу, змінюється довільно в околі значень, менших заданого, і не перевершує цього значення ні за яких змін характеристик каналу зв'язку.

В обох випадках задана якість функціонування системи досягається завдяки незмінності ймовірності помилки, її незалежності (повної в першому випадку і часткової в другому). Для позначення цієї властивості доречно використовувати термін «інваріантність». Таким чином, потреба в інваріантних СК — це необхідність забезпечення заданої якості передавання інформації каналом зі змінними характеристиками.

Зміни характеристик каналу зв'язку породжуються дуже різноманітними за своєю природою завадами — адитивними і неадитивними. Адитивна завада складається з корисним сигналом і на вхід приймача надходить спотворений сигнал. Параметри адитивної завади безпосередньо визначають завадостійкість СК, і якщо вона є нестационарним випадковим процесом, то ймовірність передавання інформації змінюється. Наприклад, якщо потужність завади збільшується з часом, то збільшується й ймовірність помилки під час приймання одного елемента повідомлення [2; 5].

Неадитивні завади (заперечення властивості адитивності) призводять до зміни окремих параметрів сигналу і каналу. Наприклад, під впливом неадитивних завад може змінюватися частота сигналу або коефіцієнт передавання каналу. Зазвичай зміну параметрів каналу можна виразити через зміни параметрів сигналу. Неадитивні завади непрямим чином впливають на завадостійкість: при зміні параметрів сигналу умови приймання поліпшуються чи погіршуються, отже, за інших рівних умов змінюється й імовірність помилки [2; 3].

Позначимо через $n = n(t)$ і $\xi = \xi(t)$ випадкові реалізації, що належать двом множинам завад відповідно N і Ξ . Довільну кількісну характеристику завадостійкості позначимо P , а ймовірність помилки — p . У загальному випадку характеристика завадостійкості є функцією обох завад:

$$P = P(N, \xi). \quad (4)$$

Характеристика завадостійкості P є результат усереднення реалізацій n завади N , тобто функцією параметрів множини N і реалізації ξ з множини Ξ [2; 5].

Уважаємо систему зв'язку абсолютно інваріантною стосовно завади Ξ , якщо для всіх $\xi \in \Xi$ виконується рівність

$$P(N, \xi) = P(N, 0) = P(N). \quad (5)$$

Еквівалентним даному значенню:

$$P = in \text{ var } \Xi. \quad (6)$$

За відсутності завади N з умови інваріантності (5) випливає, що $P(N, \xi) = P(0, 0) = P(0)$. Якщо, наприклад, характеристикою завадостійкості є ймовірність помилки p , то $p = 0$. При цьому, звичайно, немає сенсу розглядати такі тривіальні випадки, як, наприклад обрив у приймальній антені, у разі якого ймовірність помилки дорівнює $1/2$ за будь-якої завади (зокрема і за її відсутності), тоді формально слід вважати систему інваріантною до завади. Для того щоб не зараховувати до інваріантних систем подібні, явно безглузді випадки, слід умову інваріантності (6) для ймовірності помилки подати у вигляді

$$p_{\text{доп}} \geq p = in \text{ var } \Xi, \quad (7)$$

де $p_{\text{доп}}$ — максимально допустиме значення ймовірності помилки в даній системі.

Надалі (7) вважатимемо умовою інваріантності. Якщо завадостійкість системи хоча і залежить від ξ , але відрізняється від значення $P(N, 0)$ при всіх $\xi \in \Xi$ на малу величину $\delta(N, \xi)$, так що $P(N, \xi) = P(N, 0) + \delta(N, \xi)$, то система є відносно інваріантною до завади Ξ або інваріантною до ε , де ε — задана відстань між $P(N, \xi)$ і $P(N, 0)$. Залежно від прийнятої метрики величина ε може визначатися як максимум $|\delta(N, \xi)|$, середньо-рівномірне чи середньоквадратичне від $\delta(N, \xi)$ за всіма $\xi \in \Xi$. Відповідні визначення величини ε мають вигляд

$$\varepsilon = \max |P(N, \xi) - P(N, 0)|; \quad (8)$$

$$\varepsilon = \overline{|P(N, \xi) - P(N, 0)|};$$

$$\varepsilon = \overline{[P(N, \xi) - P(N, 0)]^2}, \quad (9)$$

де рискою позначено усереднення за реалізаціями $\xi \in \Xi$.

Для позначення інваріантних до ε систем можна використати такий запис: $P_\varepsilon \approx in \text{ var } \Xi$.

Серед відносно інваріантних до даної завади систем існує найкраща, *оптимальна відносна інваріантна система*, в якій величина ε мінімальна. Якщо, наприклад, для визначення ε використовується метрика (8), то в оптимальній відносній інваріантній системі

$$\varepsilon = \max_{\xi \in \Xi} |P(N, \xi) - P(N, 0)| = \min. \quad (10)$$

Величина ε показує, наскільки ймовірність помилки (чи інша характеристика завадостійкості) у цій системі більша від ймовірності помилки в тій самій системі за відсутності завади Ξ , тобто вона є критерієм якості реалізації властивості інваріантності стосовно Ξ у даній системі. Цей критерій, однак, не визначає, чи досягнутий у даній системі найкращий можливий результат. Якщо, наприклад, $\varepsilon = 0$, тобто здійснена абсолютно інваріантна система, проте це ще не означає, що не існує інша абсолютно інваріантна або навіть відносно інваріантна система з меншою ймовірністю помилки.

Інакше кажучи, величина ε характеризує ступінь наближення в даному класі відносно інваріантних систем до деякої абсолютно інваріантної (можливо гіпотетичної) системи того самого класу. Ця абсолютно інваріантна система, будучи граничною (пороговою) для відносно інваріантних систем даного класу, може уступати щодо завадостійкості абсолютно інваріантній системі чи навіть відносно інваріантній системі іншого класу.

Тому справедливе поняття оптимальної абсолютно інваріантної СК, яка забезпечує найбільшу завадостійкість стосовно завади N серед систем даного класу, абсолютно інваріантних до завади Ξ .

Наведені визначення належать до оптимальності всередині обмеженого класу інваріантних систем. Такий підхід взагалі характерний для технічних задач, оскільки в техніці, як правило, становлять інтерес системи, що реалізують максимум цільової функції за певних обмежень на параметри системи. Проте не виключається інтерес до граничних, потенційних можливостей систем передавання інформації. У зв'язку з цим введемо поняття *ідеальної* інваріантної системи, визначивши її як абсолютно інваріантну до завади Ξ систему з максимально можливою в даному каналі зв'язку за відсутності завади Ξ завадостійкістю. Зазначимо, що за відсутності завади N будь-яка абсолютно інваріантна до завади Ξ система є ідеальною інваріантною, оскільки в цьому разі ймовірність помилки дорівнює нулю.

Розглянемо проблему інваріантності в СК різних класів, оскільки вони мають неоднакові можливості з погляду досягнення інваріантності до тих чи інших завад. Доцільно виокремити такі три класи СК [2].

1. Системи з постійними параметрами (або зі стаціонарними алгоритмами): передавання та приймання сигналів здійснюються за допомогою незмінних у часі і незалежних від зовнішніх умов перетворень.

2. Системи з адаптивним приймачем: алгоритм оброблення сигналу на передавальному боці — постійний, а алгоритм приймання сигналів може змінюватися залежно від зовнішніх умов і за внутрішньою програмою.

3. Адаптивні системи: алгоритми передавання та приймання сигналів можуть узгоджено змінюватися залежно від зовнішніх умов і за внутрішньою програмою; реалізація адаптивних систем потребує зазвичай зворотного каналу зв'язку.

Системи другого і третього класів — це системи зі змінними параметрами. Можливості зазначених класів систем щодо підвищення завадостійкості, природно, різні. Наприклад, у системах із постійними алгоритмами, як правило, не можна реалізувати когерентне приймання, тоді як у системах з адаптивним приймачем його можна реалізувати практично завжди. У класі адаптивних систем, на відміну від перших двох класів, можна змінювати методи модуляції і кодування сигналу.

Водночас вибір того чи іншого класу систем визначається не їх потенційними можливостями, а чисто технічними або тактичними причинами, наприклад неможливістю організації зворотного каналу тощо. Тому, як правило, є зміст розглядати не безумовну оптимальність системи, а оптимальність у визначеному класі систем. Це повністю стосується інваріантних систем.

Нехай, наприклад, за відсутності завади Ξ когерентне приймання в даному каналі зв'язку реалізовано системою зі сталими параметрами, а в разі дії завади Ξ — тільки системою з адаптивним приймачем. Очевидно, що в класі систем зі сталими параметрами стосовно даної завади не можна побудувати ідеальну інваріантну систему, оскільки вона потребує виконання когерентного приймання, і розглядаємо тільки як систему, оптимальну в даному класі.

Задачу побудови інваріантної СК можна вирішувати в усіх трьох зазначених класах. У системах з постійними параметрами інваріантність стосовно завади Ξ досягається завдяки вибору відповідних фіксованих сигналу S (оператор передавача) й алгоритму його оброблення Φ (оператор приймача). У системах з адаптивним приймачем сигнал S вибирається, а алгоритм Φ змінюється залежно від характеристик Ξ у такий спосіб, щоб виконувались умови інваріантності. В адаптивних системах із метою досягнення інваріантності змінюються залежно від умови зв'язку як оператор приймача, так і оператор передавача.

Окреслимо можливості інваріантних систем різних класів.

1. У класі адаптивних СК можна побудувати систему, інваріантну до будь-якої випадкової завади. Справедливість цього твердження впливає із загальних положень теорії Шеннона оптимального кодування [2], відповідно до якої ймовірність помилки за допомогою належного кодування (перетворення повідомлення в сигнал у передавачі) і відповідного декодування (перетворення суміші сигналу із завадою в повідомлення в приймачі) можна зробити як завгодно малою, якщо швидкість роботи I джерела інформації менша за пропускну здатність каналу C .

Дійсно, в адаптивній системі зв'язку можлива погоджена зміна операторів передавача і приймача залежно від характеристик завади. Отже, які б не були ці характеристики, можна забезпечити (за допомогою належного кодування) ймовірність помилки, меншу за задану допустиму, тобто побудувати інваріантну систему, якщо тільки $I < C$. Якщо ж під впливом зміни характеристик завади пропускну здатність однакова або менша від швидкості роботи джерела, то в адаптивній системі можна зменшити швидкість так, щоб як і раніше виконувалася нерівність $I < C$, тобто перейти до попереднього випадку.

Наведений доказ не є конструктивним, а твердження про необмежені можливості адаптивних систем із погляду досягнення інваріантності має характер теореми, аналогічну другій теоремі Шеннона про кодування в каналі з шумом [2].

У розглянутій гіпотетичній адаптивній системі зв'язку передбачається використання коду, що виправляє помилки і забезпечує завадостійкість не нижчу від заданої при деяких фіксованих характеристиках завади. Якщо характеристики завади змінилися так, що завадостійкість системи зменшилась до неприпустимо низького значення, варто застосувати код із великою надмірністю або з великою довжиною. Для формування команд про зміну способу кодування сигналу приймач повинен мати пристрій вимірювання тотожності (вірності) передавання інформації або пристрій вимірювання характеристик завади, які визначають пропускну здатність каналу зв'язку.

2. У системах зі сталими параметрами характеристика завадостійкості може бути інваріантом обмеженого класу завад. Оскільки в системах зі сталими параметрами способи передавання та приймання сигналів фіксовані, і швидкість роботи джерела не регулюється, у них при значному зменшенні пропускну здатності каналу неминуче зростає ймовірність помилки, що свідчить про неможливість побудови в даному класі систем, інваріантних до будь-якої випадкової завади.

СК з адаптивним приймачем постають проміжне місце за своїми можливостями між адаптивними системами і системами з постійними параметрами. З одного боку, клас завад, стосовно яких у цих системах може бути досягнута інваріантність, обмежений так само, як і в системах зі сталими параметрами. Але, з другого боку, оскільки в адаптивному приймачі можливе самонастроювання з оптимізацією приймання за характеристиками завади і параметрами сигналу, у відповідних системах можна здобути більш високу «якість інваріантності». Тобто меншу, ніж у системах із постійними параметрами, ймовірність помилки стосовно завади N при збереженні інваріантності ймовірності помилки до завади Ξ .

Доцільно зазначити, що можливість здійснення інваріантності в системах зі змінними параметрами багато в чому залежить від швидкості зміни параметрів завади і сигналу. Якщо адаптивні пристрої встигають відслідковувати ці параметри без зниження завадостійкості приймання, відповідні системи можна вважати інваріантними до діяння завад; якщо ж ні, то іноді доводиться використовувати інваріантні системи зі сталими параметрами, свідомо допускаючи зниження середньої вірогідності інформації.

Проведені дослідження інваріантних СК стали основою розроблення методики розрахунку потенційної завадозахищеності інваріантної системи зв'язку, яка дає змогу синтезувати канали керувальної інформації на базі систем, інваріантних до адитивних та неадитивних завад.

Висновки

Представлено результати дослідження інваріантних систем керування в сучасній техніці зв'язку та шляхи вирішення однієї з актуальних задач — боротьби з завадами.

Проведено аналіз інваріантних СК різних класів та визначено їх можливості. Окреслено побудову інваріантної системи зв'язку, коли передавання інформації здійснюється каналами зі змінними параметрами або з нестационарними завадами. Проаналізовано засоби досягнення інваріантності до завад і випадкових змін параметрів каналів: застосування спеціальних методів модуляції і демодуляції сигналу (системи з постійними параметрами); зміна алгоритму демодуляції сигналу відповідно до зміни характеристик завади (системи з адаптивним приймачем); погоджена зміна алгоритмів перетворення сигналу на передавальному і приймальному боці відповідно до змін характеристик завади (адаптивні системи). Запропоновано конкретне застосування кожного з цих методів для досягнення абсолютної або відносної інваріантності.

Досліджено побудову інваріантних систем зі сталими параметрами, які реалізують властивість інваріантності найбільш простими засобами. Установлено, якщо адитивна завада є квазідетермінованою, або неадитивна завада призводить до спотворення неенергетичних параметрів сигналу, то інваріантність характеристик завадостійкості може бути досягнута в класі систем із постійними параметрами завдяки застосуванню відповідних методів модуляції і демодуляції сигналу та вибору оптимальної форми сигналу.

Список використаної літератури

1. Зайцев Г. Ф., Стеклов В. К., Бріцький О. І. *Теорія автоматичного керування*. Київ: Техніка, 2002. 688 с.
2. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. *Теорія електричного зв'язку*. Київ: Техніка, 2006. 552 с.
3. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Чулак О. І. *Особливості вибору методу обробки сигналів керування мережами зв'язку // Зв'язок. 2002. №2(34). С. 16–20.*
4. Фазорізничева модуляція високих порядків для забезпечення визначеної завадозахищеності каналів передавання інформації / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, Є. П. Гороховський // *Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017. №1(54). С. 5–10.*

5. Порівняльна характеристика завадостійкості систем при використанні N -вимірних багатопозиційних сигналів / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. І. Отрох [та ін.] // Наукові записки УНДІЗ. 2017. №2(46). С. 5–11.

V. Ye. Dmitriyev, A. G. Zakharzhevskiy, N. S. Chumak

INVARIANT CONTROL SYSTEMS IN MODERN COMMUNICATION TECHNOLOGY

The article presents the results of research and ways to solve one of the main tasks in communication technology — combating interference, weakening the influence of interference. The theory of electrical communication is the scientific and technical basis of the problem. A comparative analysis of the peculiarities of the problem of the invariant system in the theory of automatic control and in communication technology was carried out. The elements of the theory of invariant communication systems were studied. Invariant control systems (CS) of different classes are analyzed and their capabilities are outlined. The conditions for ensuring the invariance of the CS, the optimal absolute invariant CS and the quantitative characteristic of noise immunity are determined, and the corresponding mathematical dependencies are given. The application of the researched methods to achieve absolute or relative invariance is proposed.

Keywords: invariance; additive disturbance; signal; invariant control system; characteristic of immunity; Shannon's theorem; calculation.

