

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.325.5

З.Домбровський

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОД ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

Проаналізовано напрямки побудови та розвитку системи керування енергоспоживанням з використанням радіоканалів для зв'язку і обґрунтовано необхідність підвищення достовірності ідентифікації її об'єктів. Показано, що для підвищення достовірності ідентифікації необхідно збільшити кількість тональних сигналів і відповідно звузити смугу частоти пропускання пристроїв їх виявлення. Запропоновано метод цифрового опрацювання тонального сигналу для підвищення стабільності і точності генерування його і звуження смуги частоти пропускання пристроїв їх виявлення при ідентифікації. Наведено структурну схему уніфікованого пристрою генерування та фільтрування тональних сигналів.

Умовні позначення

АЧХ — амплітудно-частотна характеристика;
ГТЧ — генератор тональної частоти;
ЕМФ — електро-механічні фільтри;
ЗП — пристрій запам'ятовування;
СК — система керування;
ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач;
ЦГ — цифровий генератор;
ЦОС — цифрове опрацювання сигналів;
ЦФ — цифровий фільтр.

Ефективне керування енергомережею з просторовим розподіленням у великих масштабах об'єктів енергопостачання і енергоспоживання забезпечують шляхом оперативної логістики споживання енергії. При неадекватному керуванні в динамічних ситуаціях стається аварія, тому, в розподілених енергосистемах, важливо достовірно та оперативно ідентифікувати їх об'єкти. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом застосування пристроїв обчислювальної техніки [1]. На сьогодні біля вісімдесяти компаній (США, Канади, Великобританії, Данії, Швейцарії та ін.) виробляють таке обладнання для побудови систем керування (СК) різного рівня та ієрархії. При цьому застосовують типові елементи, вузли та блоки обчислювальної техніки, комп'ютери, які виготовляються різними компаніями (Motorola, Intel) [2].

СК енергоспоживанням, що пропонуються для корпоративних користувачів, базуються на концепції відкритих інформаційних мереж чи їх частинних випадках. Якщо на території розгортання СК відсутня інформаційна мережа з виділеними або високоякісними комутованими провідними чи волоконно-оптичними каналами зв'язку, то при необхідності оперативного керування застосовують радіоканали [3]. Застосування радіоканалів ускладнює ідентифікацію об'єктів СК. Для забезпечення достовірної ідентифікації об'єкта в СК застосовують спеціальні методи, забезпечуючи потрібні завадостійкість, електромагнітну сумісність, надійність, захист від несанкціонованого доступу тощо. Проте при зростанні кількості об'єктів мережі СК з використанням радіоканалу виникає проблема ідентифікації, яка не вирішується

шляхом збільшення числа радіоканалів пропорційно кількості об'єктів мережі, оскільки для потреб відомчого зв'язку в Україні виділяють обмежену їх кількість (1-3 канали в діапазоні радіочастот 146-174 МГц). Тому актуальним є підвищення стабільності, точності й уніфікації пристроїв ідентифікації.

У цій роботі проаналізовано напрямки побудови та розвитку СК енергоспоживанням з використанням радіоканалів для зв'язку і обґрунтовано необхідність підвищення достовірності ідентифікації її об'єктів. Показано, що для підвищення достовірності ідентифікації необхідно збільшити кількість тональних сигналів і відповідно звужити смугу частоти пропускання пристроїв їх виявлення. Запропоновано методи цифрового генерування тональних сигналів для підвищення їх стабільності і точності та їх опрацювання для звуження смуги пропускання пристроїв їх виявлення і побудовано уніфікований пристрій генерування та фільтрування тональних сигналів.

В [4] при побудові СК, що мають топологію “радіоізернет” типу “зірка” (point-to-multipoint) для 100 об'єктів, застосовано два радіоканали. Для ідентифікації об'єктів застосовано тональні сигнали обмеженої тривалості. Їх передають через радіосигнал — високочастотними електромагнітними коливаннями шляхом їх модуляції. Для виявлення тональних сигналів застосовують спеціальні пристрої. В [2] наведено дані про один з них - приймач G-7606C FSK Receiver (Da-Tel Research Co. — Montrose, Colorado, USA), а тональний сигнал ідентифікації складається з послідовних в часі частотних посилок з діапазону частот (420-2000) Гц. Інформаційним (для керування) є присутність певної тональної частоти. Частота тону — означає (ідентифікує) відповідний об'єкт енергоспоживання. Отже, в енергомережі, з одного боку, за оперативною ситуацією об'єктом енергоспоживання генерується гармонічне коливання і передається радіоканалом, а з другого боку, СК виробляє керуючий сигнал, виявивши присутність тонального сигналу з частотою, назначеною даному об'єкту (адресу). Генерування гармонічного сигналу (тону) виконується за різними схемами, а факт його присутності визначається порівнянням напруги на виході фільтра приймача з деяким пороговим значенням. Структурна схема ідентифікації об'єктів в СК зображена на рис. 1

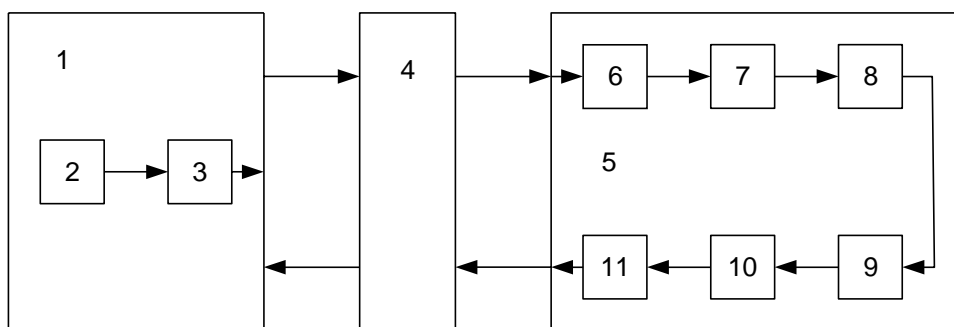


Рисунок 1 - Структурна схема ідентифікації об'єкта СК (1 — енергоспоживач, 2 — генератор тональних частот, 3 — передавач, 4 — канал зв'язку, 5 — центр контролю, 6 — приймач, 7 — фільтр тональної частоти, 8 — інтегратор, 9 — пристрій порівняння, 10 — фіксатор сигналу ідентифікації, 11 — передавач керуючого сигналу)

Для побудови методу підвищення достовірності розглянемо СК формальним чином. У відомих системах для ідентифікації застосовують тональний сигнал фіксованої частоти Ω_i , із Q можливих, який діє протягом часу T_i , $\Omega_i \in (1000 - 2000)$ Гц, фільтрування виконується смуговими електро-механічними фільтрами (ЕМФ) з смугою пропускання 34 Гц [4]. При застосуванні обмеженої кількості радіоканалів для зв'язку з метою підвищення достовірності ідентифікації її

об'єктів необхідно сформулювати та розв'язати важливе технічне завдання. Задача ідентифікації об'єктів у системі керування з радіоканалом підпадає під формулювання задачі вибору рішення про наявність або відсутність у каналі сигналу ідентифікації $s(t)$ певної тональної частоти у суміші із завадами (іншими тональними сигналами, випадковими шумами) $n(t)$, які виникають при передачі, вважаючи структуру сигналу відомою. Рішення вибирається за результатами аналізу електричної величини

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

де

$$s(t) = S_0 \sin(2\pi\Omega_i t), \quad (2)$$

а

$$n(t) = \sum_{\forall k \neq i} \int_{t_0}^{t_0+T_i} h_i(t-\tau) S_{0k} \sin(2\pi\tau\Omega_k) d\tau + \xi(t), \quad k = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Тут M — кількість об'єктів; h — імпульсна характеристика селективного фільтра; ξ — випадковий шум в каналі зв'язку СК енергоспоживанням. (При цьому значення всіх тональних частот Ω_i , $i = \overline{1, M}$ відомі, а в каналі кожен ідентифікаційний сигнал присутній з імовірністю, яка не залежить від присутності інших сигналів). Для прийняття рішення про присутність тональної частоти Ω_i в оглянутих СК енергоспоживанням за критерій застосуємо перевищення заданого порогу ν , середньоквадратичним значенням відфільтрованого фільтром h_i сигналу $s(t)$:

$$\frac{1}{T_i} \int_{t_0}^{t_0+T_i} \left| \int_{t_0}^{t_0+T_i} h_i(t-\tau) x(\tau) d\tau \right|^2 dt \geq \nu. \quad (4)$$

Оскільки у відомих СК застосування цього методу є задовільним, то такий критерій на сьогодні залишається практично прийнятним для невеликої кількості об'єктів й надалі. Визначення значень порогу, достовірності та імовірності помилки виявлення здійсненне за даними експлуатації енергомереж. Прогнозуючи зростання кількості об'єктів в енергомережі, випадковість появи ідентифікаційних сигналів, враховуючи шуми каналу передачі, завади тощо, побудуємо формальні вирази оптимального критерію вибору порогу оцінки достовірності та помилки ідентифікації. З врахуванням викладеного задачу виявлення ідентифікаційного сигналу $s(t)$ на фоні завад $n(t)$ сформулюємо у термінах статистичної теорії вибору рішення. Позначимо відсутність сподіваного ідентифікаційного сигналу гіпотезою

$$H_{(0)} : x(t) = n(t), \quad (5)$$

а присутність сигналу — гіпотезою

$$H_{(1)} : x(t) = n(t) \oplus s(t). \quad (6)$$

Символом \oplus позначимо комбінацію сигналу і шуму. При цьому, знаючи відповідні імовірності їх появи, синтез методу виявлення зводиться до розробки правила прийняття рішення про наявність сигналу ідентифікації на користь гіпотези H_1 . Тоді, для оптимального виявлення змістовним є критерій Неймана–Пірсона [5]. За методикою цього критерію, ймовірність помилки задають, значення порогу виявлення визначають, а при виявленні ймовірність пропуску сигналу буде мінімальною, при чому знання апріорних ймовірностей наявності і відсутності сигналу, а також матриці втрат не вимагається. Виявлення сигналу ідентифікації у суміші із завадою реалізується через частотний аналіз. Пристрій порівняння визначає момент перевищення сигналу

ідентифікації вибраного фіксованого значення з врахуванням рівня присутніх завад. Функція розподілу імовірностей знаходиться з евристичних міркувань чи експериментально. Зокрема, для нормального розподілу імовірностей поріг v визначається за формулою

$$v = \sqrt{V_0} \Phi^{-1}(P_f) + M_0, \quad (7)$$

де $\Phi(\bullet)$ — інтеграл імовірності, P_f — імовірність помилки, V_0 — дисперсія енергії завади, M_0 — математичне сподівання енергії завади. Достовірність ідентифікації тоді визначається виразом

$$P_d = 1 - \Phi\left(\frac{v - M_d}{V_d}\right), \quad (8)$$

де M_d та V_d - математичне сподівання та дисперсія відношення енергій сигналу та завади відповідно.

Аналіз даних виразів показує, що застосування ЕМФ в СК енергоспоживанням не забезпечує таку смугу пропускання частоти, що достовірність ідентифікації при зростанні кількості об'єктів буде задовільною.

При застосуванні активних фільтрів (замість ЕМФ) їх точність і стабільність (особливо це відноситься до смугових фільтрів) визначається в основному якістю пасивних елементів. Практично пасивні елементи дають можливість використання лише фільтрів 1-го і 2-го порядків невисокої добротності. Знову ж таки звуження смуги пропускання визначає потребу в фільтрах високодобротних, що задає високі вимоги щодо часової і температурної стабільності, які забезпечують високоточні (допуск не більше 1%) металоплівкові резистори й операційні інтегральні підсилювачі. Фільтри на реальних операційних підсилювачах мають типові недоліки аналогових пристроїв - значну чутливість до відхилення параметрів радіоелементів.

Застосування аналогових генераторів синусоїдальних сигналів, характеристичні рівняння яких виражаються через рівняння 2-го порядку з постійними коефіцієнтами, економічно і навіть, можливо, технічно також не вигідно.

Власне недосконалість існуючих пристроїв формування і виявлення, що проявляється у недостатній стабільності і точності частоти тональних посилок, низькій роздільній здатності, добротності фільтрів і нестабільності параметрів не забезпечує потрібної достовірності ідентифікації навіть при застосуванні двох частотних посилок різної частоти Ω_1 і Ω_2 . Тому актуальним є удосконалення методів селекції та генерації тональних частот і пристроїв їх реалізації у широкому діапазоні зміни частоти з метою підвищення точності генерування сітки тональних частот і звуження смуги фільтрації частоти до долей Гц, для збільшення кількості тональних посилок різної частоти в заданому діапазоні частот ідентифікації. Це дозволить підвищити достовірність, завадостійкість, електромагнітну сумісність, надійність та захист від несанкціонованого доступу до об'єктів енергоспоживання мережі радіоізернет при зростанні їх кількості.

Задані вимоги щодо удосконалення характеристик пристроїв генерації і селекції сигналів ідентифікації потенційно досяжні засобами обчислювальної техніки, за допомогою яких можна успішно вирішити проблеми ідентифікації, шляхом ЦОС, у смугі частот 1000 -2000 Гц [6]. При цьому ЦОС, які відрізняються одиницями Гц, для ідентифікації у заданій смугі частот повинно забезпечуватись протягом короткого інтервалу часу, що є необхідним для швидкого доступу при високій завадостійкості. Використання ЦОС удосконалив ідентифікацію і забезпечить захист від несанкціонованого доступу шляхом збільшення довжини ключа - кількості тональних посилок різної частоти. ЦОС при виявленні тональної частоти ідентифікації є подібною до задачі частотного аналізу близьких частот. Частотний аналіз близьких частот, заданих тональними посилками, вирішують різними способами [7]: гармонічним; спектральним; крос – спектральним і фільтровим. Одним із придатних способів аналізу

сигналів при коротких послідовностях з метою виявлення в реальному часі близьких частот є фільтровий. Фільтр повинен розрізняти близькі частоти протягом фіксованого інтервалу. Для побудови такого фільтру потрібен метод який враховує апіорну інформацію для підвищення роздільної здатності аналізу за частотою.

Завдання полягає в тому, щоб маючи малий відрізок функціональної залежності досліджуваного процесу, продовжити її за межі цього відрізка, опираючись на апіорні дані на вході. Тому обрано метод реалізації, що базується на рекурентних співвідношеннях, який дозволяє кореляційну функцію продовжити за межі інтервалу спостереження. Обраний метод інтерпретує узагальнену модель знаходження авторегресивного ковзного середнього значення в дискретні моменти часу. Така модель поєднує комбінацію двох підсистем прямої і рекурсивної дії. Найбільш важливими властивостями вибраної моделі є здатність розрізняти близькі частоти, малі затрати ресурсів. Зв'язок між даними на вході і результатом на виході визначається розв'язком лінійного різницевого рівняння [8].

$$Y(nT_d) = \sum_{\mu=1}^p a_{\mu} Y(nT_d - T_d) + \sum_{\mu=1}^q b_{\mu} Y(nT_d - T_d) + V(nT_d), \quad (9)$$

де: $V(nT_d)$ — вхідна величина; $Y(nT_d)$ — результат на виході ЦФ, ЦГ; a_i, b_i — постійні коефіцієнти, що визначають їх характеристики; T_d — період дискретизації. Програмно апаратну реалізацію рішення різницевого рівняння (9) будемо називати рекурсивною цифровою структурою (РЦС), якщо $b_i \leq 1$, то реалізується фільтр, а якщо $b_i = 1$, то генератор відповідної тональної частоти.

Побудова генератора тональних частот (ГТЧ) при застосуванні цифрової структури (9) має ряд переваг перед їх функціональними аналогами. Сучасні досягнення в технології створення цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), пристроїв, що запам'ятовують (ЗП), і мікропроцесорів розширюють області застосування ГТЧ в тих випадках, в яких традиційно домінували аналогові пристрої. ЦАП підключені до виходу цифрового генератора частоти дозволяє одержати сигнал в аналоговій формі. Оскільки в цифровому ГТЧ вихідний сигнал є дискретним, то на нього поширюється положення теореми Найквіста. Для подання в дискретній формі гармонічного сигналу потрібно здійснити, як мінімум, дві його вибірки за період, тому значення робочої частоти ЦСЧ не повинно перевищувати половини частоти надходження тактових імпульсів. Однак на практиці максимальна частота гармонічного сигналу звичайно обмежується 40% значення тактової частоти. Це та її межа, при якій фільтр нижніх частот на виході цифрового ГТЧ забезпечує необхідний рівень зменшення шумових складових (в спектрі дискретизованого сигналу). Стабільність частоти цифрового генератора визначається стабільністю частоти надходження тактових імпульсів. Пристрої з цифровим синтезом частоти відрізняються нормованим часом встановлення процесів і рівнем фазових шумів і, крім того, забезпечують роздільну здатність за частотою в одиницю герц і швидкість перемикавання в одиницях наносекунд. Цифрові ГТЧ здійснюють перемикавання частот із збереженням безперервної фази. Ці властивості роблять їх задовільними для застосування в системі ідентифікації за тональним сигналом в широкій частотній смузі. При передачі сигналів ідентифікації в режимі частотної модуляції цифрові ГТЧ здатні забезпечити ширину смуги, еквівалентну ширині смуги налагодження без втрати роздільної здатності за частотою і встановлення величини кроку її зміни, які визначаються довжиною цифрового слова. Виділення тональних сигналів ідентифікації здійснюють смуговою фільтрацією набором фільтрів, наявність потрібної частоти на виході яких виявляють за допомогою амплітудного аналізатора. Смугові фільтри у наборі повинні забезпечувати однакову ширину смуги пропускання потрібної частоти і пригнічувати усі інші у заданому діапазоні.

При синтезі ЦФ застосовують методи, які забезпечують можливість обчислення коефіцієнтів фільтра при заданих параметрах (смуги пропускання, крутизни частотної характеристики в перехідній області, нерівномірності характеристики в смугі пропускання і затримки). Синтез структур для смугової фільтрації полягає у знаходженні мінімального порядку функції передачі заданої в частотній області, яка найкраще відтворює функцію передачі. Практична реалізація фільтрів, перш за все, пов'язана із точністю, що має вплив на вимоги до АЧХ, які визначають порядок фільтра. Тому фільтри високого порядку реалізують окремими ланками 2-го порядку, які з'єднують паралельно чи послідовно [6]. При цьому задані характеристики фільтра для ідентифікації можна оптимально реалізувати цифровим резонатором, структурну схему якого наведено на рис.2.

Рекурентне відношення (9) визначає сукупність арифметичних операцій множення і додавання чисел, а також запам'ятовування значень вхідної і вихідної величин на проміжку часу, кратному періоду дискретності сигналу T_d . Частота дискретизації вхідного сигналу повинна бути, як мінімум, в 2 рази більше, ніж гранична частота вхідного сигналу. Проте відношення даних частот не повинно бути значно більше 2, так як кількість необхідних типових обчислювальних операцій залежить від нормованої крутизни характеристики в перехідній області і обернено пропорційне часу опрацювання окремої вибірки.

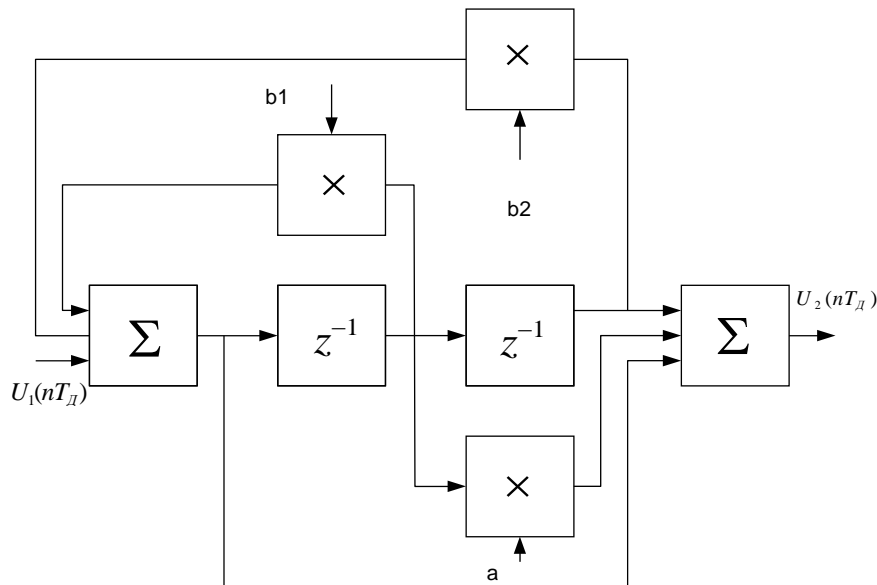


Рисунок 2 - Структурна схема рекурсивної ланки

Відліки вхідного сигналу $U_1(nT_d)$ додаються у першому суматорі до результатів відліків з виходів елементів затримки, помножені на постійні коефіцієнти b_1 , b_2 . Результат сумування додається до відліків з виходів елементів затримки, помножених на коефіцієнт a в другому суматорі, вихід якого формує вихідний сигнал $U_2(nT_d)$. Для резонатора коефіцієнт $a=1$, а коефіцієнти b_1 , b_2 розраховують у відповідності із частотою резонансу і добротністю. За прототип завжди обирається стійкий аналоговий фільтр, параметри якого шляхом білінійного перетворення слугують умовою розрахунку ЦФ. Після перетворень з кожної пари спряжених полюсів фільтра – прототипу отримуємо: із дійсного полюса пару нулів і пару спряжених полюсів. Кожен полюс фільтра-прототипу у цифровому смуговому фільтрі реалізується окремими ланками [9]. Процедура синтезу визначається і масштабування сигналу для попередження переповнення. Класична теорія фільтрів заснована на принципах, які можна застосовувати як до аналогових, так і до цифрових фільтрів, проте це не гарантує їх апаратну реалізацію. Квантування даних і дискретність подання чисел в

цифровому фільтрі забезпечує реальну амплітудно-частотну характеристику, яка відрізняється від розрахункової.

Ефектом квантування є похибки і нестійка робота рекурсивного ЦФ. За умовою стійкості, одним з прийнятних критеріїв є: при обмеженій послідовності на вході вихідна послідовність також повинна бути обмежена. При цьому, якщо послідовність імпульсної характеристики теоретично має нескінченну тривалість, все-таки прямує до нуля на нескінченному інтервалі. При практичній реалізації ЦФ застосовують єдиний пристрій множення, накопичувач і ЗП для реалізації затримки. Генератори і ЦФ різної частоти можуть бути частиною спільного арифметичного пристрою, при цьому, як показано в [6], переваги зростають при реалізації набору фільтрів.

Таким чином, на базі статичної теорії вибору рішення обґрунтовано необхідність підвищення стабільності і точності формування тональних частот і звуження смуги пропускання пристроїв їх виявлення для збільшення кількості тональних частот у вузькому діапазоні. При цьому: кількість тональних посилок визначається практично за даними попиту і пропозиції енергопостачальників і енергоспоживачів; достовірність ідентифікації об'єктів в енергомережі та імовірність помилок визначаються з статистик практики діяльності СК енергоспоживанням; значення смуги пропускання фільтрів, частоти ідентифікації та їх характеристики точності визначаються за величиною потрібного для збереження даних імовірності помилки та достовірності виявлення відношення енергії сигналу до енергії завад (значень) з (7, 8); значення енергії сигналу та завади визначається з (1-3); статистики виявлення будуються за виразом (4).

Висновки

При розв'язанні задач удосконалення синтезу і аналізу близьких тональних частот протягом короткого відрізка часу доцільно використовувати цифрові структури. Оптимальною реалізацією цифрових структур для побудови "требінки" (набору) фільтрів за критерієм уніфікованість в широкій смузі є рекурсивні цифрові ланки другого порядку — цифрові резонатори. Критерієм їх оптимальності є мінімальний порядок і регулярність структури цифрового резонатора, яка забезпечує повторюваність базової структури при апаратній реалізації пристроїв ідентифікації генерації і фільтрації. Розглянуті формальні поняття та сутність цифрової техніки показали переваги її застосування: значно зменшуються витрати на апаратну реалізацію генераторів сітки і набору фільтрів різної частоти; спрощується виробництво: виготовлення великої кількості різноманітних генераторів і смугових фільтрів, які реалізуються одним пристроєм шляхом зміни лише програми, забезпечується потрібна часова і температурна стабільність параметрів генерації і фільтрації сигналів; забезпечується ідентифікація і висока міра захищеності від несанкціонованого доступу (удосконалюється шифр доступу) при збільшенні кількості об'єктів мережі з використанням радіоканалу.

Directions of design and development of the control system for the energy consumption with the use of radio channels for communication and grounded necessity of increasing of authentication of its objects are analyzed. It is shown that for increases of authentication confidence it is necessary to multiply a quantity of tonal frequencies and accordingly narrow a band pass frequencies of devices of their detection. A method of the digital processing of radio channel signal and tone-signal generation for the increases of stability and exactness of tonal frequencies of authentication and narrowing the band pass frequencies of devices of their detection is offered.

Література

1. Д. Дж.Гошел. Дистанционное управление и сбор данных// ТИИЭР. -Т.75, №12, декабрь 1987.- С.112-128.
2. Дж. Т. Робинсон. Линии и сети связи энергосистем// ТИИЭР.-Т.75, №12, декабрь 1987.- С.141-152.
3. <http://www.electricnet.com>.
4. Домбровський З.І. та інші. Система программного управления удаленными объектами. Патент Республики Казахстан № 16344, 1996 год.

5. ФренксД. Теория сигналов.- М.: Сов.радио, 1974.- 344 с.
6. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978.
7. Devices refine the art of frequency synthesis. "Lallaut J.A. END", 1989, 34, №23, 95, 97 98, 102, 104.
8. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Пер. с англ. Под редакцией В.А. Лексаченко. — М.: Мир. 1989.-С.48-51.
9. Яворский В.И., Домбровский З.И. Расчет цифровых полосовых фильтров типа Чебышева. // Радиотехника. - 1981. - Т. 36, № 10. - С. 79 – 81.

Одержано 25.12.2005 р.