

УДК 621.391

О.А. Малишев, А.С. Остафійчук, Ю.Д. Новіков

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИБІР СХЕМИ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМІНАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АПЧ ОГЛЯДОВИХ РЛС «СТАРОГО» ПАРКУ

В оглядових РЛС «старого» парку в системах АПЧ застосовуються частотні дискримінатори, які виконані на ламповій елементній базі. Вони характеризуються нестабільністю параметрів, і, відповідно, помилками у визначенні частотної розстройки. Пропонується виконати частотні дискримінатори на цифрових пристроях, зокрема, з використанням перетворювача «частота-код». Проведено аналіз похибок роботи цифрового частотного дискримінатора.

Ключові слова: радіолокаційна станція, автоматичне підстроювання частоти, частотний дискримінатор, перетворювач «частота-код».

Вступ

Постановка проблеми. Супергетеродинні схеми приймачів в оглядових радіолокаційних станціях (РЛС) «старого» парку передбачають наявність двох генераторних пристроїв: генератора НВЧ та гетеродину. Ці пристрої мають певну нестабільність, що призводить до часткової або повної втрати сигналів в узгоджених фільтрах (і відповідно до «пропуску» цілей [1]). Для усунення такого явища застосовуються системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) [2].

В зазначених РЛС система АПЧ являє собою двоканальну електромеханічну систему, в якій при підстроюванні частоти задіяні, як передавач так і гетеродин. В цих пристроях частотні параметри змінюються шляхом механічного впливу на їх окремі елементи (змінні конденсатори, короткозамикаючі плунжери тощо). Тому при модернізації системи АПЧ повністю відмовитись від механічної складової неможливо, і удосконалення системи може бути спрямовано на її електричну частину. В цій частині окремо виділяється частотний дискримінатор (ЧД), від якості роботи якого залежить точність відпрацювання системи АПЧ в цілому [2].

З огляду на те, що в оглядових РЛС «старого» парку частотні дискримінатори виконані на лампах, доцільно розглянути можливість їх заміни на пристрої, основу яких складатимуть цифрові елементи.

Аналіз літератури. Питання покращення роботи систем АПЧ в останній час в більшій мірі спрямовані на застосування в них фазового принципу підстроювання частоти [3–4]. Але внаслідок обмеження їх використання при великих частотних розстройках доцільно в існуючих системах АПЧ залишати дискримінатори, що базуються на аналізі відхилень частоти сигналів, і розглядати модернізацію саме цієї ланки. Відповідні роботи в цьому напрямку наведені в [5–6], але конкретних пропозицій щодо їх удосконалення не надано. Тому доцільно роз-

глянути можливість застосування в РЛС «старого» парку частотних дискримінаторів, виконаних на сучасній елементній базі.

Метою статті є вибір схеми частотного дискримінатора, виконаного на цифровій елементній базі, для систем АПЧ оглядових РЛС «старого» парку.

Виклад основного матеріалу

Системи АПЧ оглядових РЛС «старого» парку побудовані за схемою автоматичної слідкуючої системи за положенням [2]. Відповідна спрощена функціональна схема системи автоматичного керування частотою коливань генератора наведена на рис. 1.

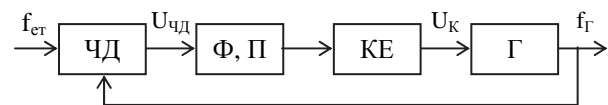


Рис. 1. Спрощена схема системи автоматичного керування частотою

ЧД виконує функцію порівняльного пристрою і формує постійну напругу $U_{чд}$, величина і полярність якої залежить від величини та напрямку частотної розстройки коливань генератора Γ від еталонного значення частоти $f_{ет}$. Фільтр Φ і підсилювач Π забезпечують необхідні показники якості системи (стійкість, точність, швидкодія). Під впливом цієї напруги керуючий елемент $КЕ$ змінює частоту коливань генератора $f_{Г}$ у бік зменшення частотної розстройки [2].

Реалізовані в оглядових РЛС «старого» парку системи АПЧ мають певні особливості, основними з яких є [7–8]:

1. На вхід ЧД надходять радіоімпульси на проміжній частоті, яка є різницевою між частотами сигналів, які формуються в генераторі НВЧ та гетеродині.

2. Система АПЧ є двоканальною і містить грубий та точний канали. Ці канали відповідно підстроюють гетеродин приймача та генератор НВЧ, які виконані на базі лампових електровакуумних приладів.

3. Керуючими елементами є електромеханічні пристрої (серводвигуни), на які надходять керуючі сигнали у вигляді змінної напруги. Результатом роботи серводвигуна є обертальний момент вала, який передається через редуктор на відповідний об'єкт регулювання.

4. Частотні дискримінатори в грубому та точному каналах виконані за схемами дискримінаторів відповідно на розстроєних контурах та із зв'язаними контурами.

5. Оскільки напруга розузгодження на виході частотних дискримінаторів є постійною, а серводвигуни працюють на змінному струмі, підсилювач повинен додатково виконувати функцію перетворювача (з постійної напруги на змінну).

Серед якісних показників такої системи можна виділити точність її відпрацювання, оскільки цей фактор в кінцевому результаті визначає ступінь втрат корисних сигналів в узгодженому фільтрі.

Суттєвий внесок у точність відпрацювання системи надає частотний дискримінатор, який повинен мати високу стабільність параметрів.

Оскільки дискримінатор виконаний на ламповій елементній базі, то вже він стає додатковим джерелом помилок внаслідок нестабільності його параметрів.

В таких дискримінаторах протягом певного часу відбувається розбалансування плечей і, відповідно, на його виході з'являється «хибний нуль»: наявність напруги розузгодження при відсутності у вхідних сигналів частотної розстройки.

Цей фактор потребує настроювання ЧД, яке в РЛС здійснюється в два етапи.

Перший етап передбачає забезпечення «статичного нуля»: при відсутності аналізуємих сигналів на вході ЧД (генератор НВЧ вимкнений) на його виході напруга має дорівнювати нулю.

На другому етапі вмикається передавальний пристрій, і в ЧД безпосередньо аналізується частотна розстройка вхідних сигналів на проміжній частоті $f_{пр}$. При $f_{пр} = f_{ет}$ на виході дискримінатора напруга має бути відсутня. Але внаслідок розбалансування плечей ЧД навіть при $f_{пр} = f_{ет}$ на його виході буде наявна певна напруга, яка викличе підстроювання генераторних пристроїв за відсутністю такої потреби. Тому на другому етапі здійснюється урівноваження плечей ЧД.

Одним із шляхів стабілізації параметрів ЧД, і, як наслідок, усунення зазначених складних його настроювань, є виконання цих дискримінаторів на цифровій елементній базі.

Можливим варіантом такого кроку може бути застосування цифрового частотного дискримінатора (ЦЧД), який би являв собою уніфікований пристрій. Як показав аналіз відповідних джерел, такі пристрої, настроєні на номінальну проміжну частоту приймачів оглядових РЛС "старого" парку, не виготовляються.

Іншим варіантом створення цифрового частотного дискримінатора може бути використання мікропроцесорів. Але відомі мікросхеми провідних виробників [9–10] мають дещо низькі значення частот, ніж потрібні в зазначених РЛС.

В статті пропонується варіант створення ЦЧД на базі перетворювача «частота-код» (ПЧК) [11]. Спрощена структурна схема такого дискримінатора наведена на рис. 2.

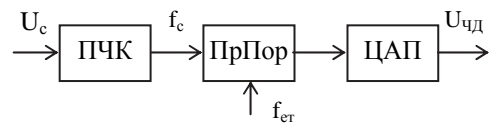


Рис. 2. Спрощена схема ЧД з використанням ПЧК

Порядок роботи пристрою наступний. Вхідний синусоїдальний сигнал U_c надходить на ПЧК, який перетворює його з аналогового вигляду у двійковий код. Значення останнього відповідає поточній частоті вхідного сигналу f_c . Сформований код надходить на пристрій порівняння ПрПор, на опорний вхід якого подається еталонний код, що відповідає номінальній частоті $f_{ет}$. На виході ПрПор формується значення (код розузгодження), яке відповідає величині та напрямку частотної розстройки сигналу, що аналізується. Далі код розузгодження перетворюється в аналоговий вигляд у ЦАП, і отримана напруга $U_{чд}$ подається на подальші пристрої системи АПЧ (фільтр, підсилювач і т.д.).

Запропонована схема частотного дискримінатора, має похибки, обумовлені перетворенням сигналів з аналогової форми в цифрову, і зворотньо, а також безпосереднім визначенням частоти в ПЧК (саме ці похибки найбільш вагомими).

Величина похибок ПЧК залежить від обраних типів схем, серед яких виділяються низькочастотні (НЧ) та високочастотні (ВЧ) ПЧК [11]. Сутність їх роботи коротко можна описати наступним чином.

В НЧ перетворювачах "частота-код" формується прямокутний імпульс тривалістю, яка дорівнює періоду вхідних коливань. Протягом цього часу на лічильник надходять еталонні імпульси з певною частотою (з періодом надходження $T_{ет}$). Кількість підрахованих лічильником імпульсів відповідає значенню частоти вхідного сигналу f_x .

У ВЧ перетворювачах «частота-код» формується послідовність імпульсів з періодом, який дорівнює періоду вхідних коливань. Ці імпульси надхо-

дять на лічильник протягом дії еталонного прямокутного імпульсу тривалістю T_e . Кількість підрахованих імпульсів також відповідає значенню частоти вхідного сигналу f_x .

В НЧ перетворювачах «частота-код» виникають методичні похибки (похибки квантування), обумовлені відсутністю синхронізації фронту та спаду сформованого прямокутного імпульсу з еталонними імпульсами. Ці похибки підпорядковуються рівномірному закону розподілу в інтервалі $T_{ет}$, а їх композиція відповідає трикутному закону розподілу (розподілу Сімпсона). При цьому середньоквадратична похибка складає $\sigma_{ікв} = \frac{T_e}{\sqrt{6}}$.

Зменшити ці похибки можна шляхом синхронізації фронту прямокутного імпульсу з еталонними імпульсами (похибка зменшується в $\sqrt{2}$ разів) та підвищенням частоти надходження еталонних імпульсів. В останньому випадку настає обмеження, обумовлене граничною частотою роботи лічильника. В цих випадках застосовують багатоканальні НЧ перетворювачі «частота-код», в яких похибка зменшується ще в n разів (n – кількість каналів) і відповідно складає $\sigma_{ікв} = \frac{T_e}{n\sqrt{6}}$.

У ВЧ перетворювачах «частота-код» абсолютна похибка перетворення не перевищує значення $\Delta f_x = \pm \frac{1}{T_e}$, а відносна похибка складатиме $\delta f_x = \pm \frac{1}{T_e f_x}$. Остання буде мати максимальне значення $\delta f_{x\max} = \pm \frac{1}{T_e f_{x\min}}$.

Отже, в НЧ перетворювачах «частота-код» похибка визначається в межах одного періоду коливань.

У ВЧ перетворювачах «частота-код» для зменшення похибок потрібно досить ретельно підбирати співвідношення тривалості еталонного імпульсу та частоти вхідного сигналу.

Це обумовлено тим, що при малих значеннях f_x часовий інтервал T_e , необхідний для забезпечення заданої точності, може виявитися неприпустимо великим. При цьому збільшується час перетворення і виникають складності формування таких інтервалів із заданою точністю.

Помилки, обумовлені роботою цифро-аналогового перетворювача, є інструментальними, і після формування коду частотного розузгодження суттєвого внеску в загальну помилку дискримінатора не надають. В той же час для їх зменшення необхідно вибирати цифро-аналогові перетворювачі з

параметрами, що відповідають системі АПЧ певного зразку РЛС [11].

В якості прикладу розглядалась можливість використання перетворювачів «частота-код» в РЛС типу 5Н84А [7] та П-18 [8].

Вихідними умовами для аналізу були вибрані наступні.

Значення проміжних частот $f_{пр}$ приймачів в РЛС: для П-18 $f_{пр} = 24,6$ МГц; для 5Н84А $f_{пр} = 10$ МГц). Лічильники зі складу ПЧК вибиралась чотирьохрозрядними. Для НЧ перетворювачів «частота-код» оцінювалась похибка квантування $\sigma_{ікв}$, а для ВЧ перетворювачів «частота-код» – відносна похибка δf_x .

Основні результати розрахунків зазначених похибок наведені в табл. 1

Таблиця 1

Похибки визначення частотної розстройки в ПЧК при їх застосуванні в РЛС «старого» парку

Тип РЛС		5Н84А		П-18	
		Параметр		Параметр	
Номінальне значення проміжної частоти, МГц		10		24,6	
НЧ ПЧК	Тривалість сформованого імпульсу, мкс	0,1		0,04	
	Мінімальний період надходження еталонних імпульсів, мкс	0,0063		0,0025	
	Середньоквадратична похибка квантування, мкс	0,0025		0,001	
ВЧ ПЧК	Період надходження імпульсів, мкс	0,1		0,04	
	Тривалість еталонного імпульсу, мкс	1,6		0,64	
	Відносна похибка вимірювань	0,063		0,064	

Аналіз даних, наведених, в табл. 1, показує наступне.

1. При використанні НЧ ПЧК в оглядових РЛС «старого» парку більш кращі точнісні показники будуть мати дискримінатори в РЛС П-18. В той же час внаслідок більшого значення проміжної частоти сигналів в цих РЛС більш критичними стають обмеження граничної частоти роботи лічильника.

2. При використанні ВЧ ПЧК в цих РЛС відносна похибка δf_x для обох станцій приблизно однакова. Але при цьому в РЛС П-18 вимоги щодо часу перетворення синусоїдальних коливань у тактові імпульси є більш жорсткими.

З огляду на можливості сучасних цифрових пристроїв на сьогодні практична реалізація ПЧК в оглядових РЛС «старого» парку є більш реальною в РЛС 5Н84А.

Висновки

Частотні дискримінатори систем АПЧ в оглядових РЛС «старого» парку виконані на ламповій елементній базі, що тягне за собою відносно часте їх підстроювання.

Для удосконалення ЧД доцільно виконати їх на цифровій елементній базі. Запропонована схема ЦЧД виконана на основі перетворювачів «частота-код». Порівняльний аналіз існуючих схем ПЧК (НЧ ПЧК та ВЧ ПЧК) при їх застосуванні в оглядових РЛС «старого» парку (типу 5Н84А та П-18) показує, що їх практична реалізація більш реальна в РЛС 5Н84А внаслідок меншого значення проміжної частоти.

В подальшому доцільно дослідити конкретні значення похибок вимірювань частоти в запропонованих схемах за умов їх реалізації на існуючих цифрових мікросхемах.

Список літератури

1. Аналіз радіолокаційних систем виявлення малорозмірних повітряних об'єктів / В.А. Чепурний, В.Й. Альберт, О.В. Сердюк, Г.В. Худов // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 1 (138). – С. 53-57.
2. Системи керування. Ч.1. Типові системи автоматичного керування: навч. посіб. / А.О. Ковальчук, І.І. Сачук, О.О. Сосунов та ін.; за заг. ред. О.О. Сосунова. – Х.: ХУПС, 2013. – 316 с.
3. Curtin M. Phase-Locked Loops for High-frequency Receivers and Transmitters. Part 1 / M. Curtin, P. O'Brien // Analog Dialogue, 1999. – Vol. 33. – No 3. – P. 28-34.
4. Келин Т. Характеристики цифровой системы ФАПЧ / Т. Келин, Д. Супонников // Радио, 2002. – № 9. – С. 45-46.

5. Малишев О.А. Simulink-модель безошибочной системы АПЧ для дослідження впливу нестабільностей параметрів ЧД на показники якості підстроювання частоти / О.А. Малишев, О.О. Сосунов, С.В. Яхніс // Наука і техніка ПС ЗСУ. – 2010. – Вип. 2 (4). – С. 103-106.

6. Малишев О.А. Дослідження впливу нестабільностей параметрів частотного дискримінатора на розстроєних контурах на показники якості роботи системи АПЧ оглядових РЛС за допомогою Simulink-моделі / О.А. Малишев, О.О. Сосунов, С.В. Яхніс // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – Вип. 1 (25). – С. 35-38.

7. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. Радіолокаційна станція 5Н84А: навч. посіб. / В.Й. Климченко, О.А. Малишев, Ю.Г. Ульянов, Ю.І. Рафальський; за заг. ред. В.Й. Климченка. – Х.: ХУПС, 2005. – 328 с.

8. Рисаков М.Д. Військова техніка ближньої радіолокаційної групи. Вип. 1. Оглядова РЛС 1РЛ131Р: навч. посіб. / М.Д. Рисаков, Д.Ю. Дукін, В.І. Хохлюк. – Х.: ХІВПС, 2003. – 150 с.

9. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров / Ю.А. Шпак. – К.: МК-Пресс, М.: Додэка-XXI, 2007. – 400 с.

10. Оцінка параметрів радіоелектронної апаратури оглядових РЛС «старого» парку із застосуванням мобільних відеотерміналів / О.А. Малишев, В.В. Сидоров, І.М. Невмержицький, А.А. Гризо // Наука і техніка ПС ЗСУ. – 2016. – Вип. 4 (25). – С. 79-82.

11. Садовий К.В. Цифрові пристрої: курс лекцій / К.В. Садовий. – Х.: ХУПС, 2014. – 376 с.

Надійшла до редколегії 23.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ВЫБОР СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМИНАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АПЧ ОБЗОРНЫХ РЛС «СТАРОГО» ПАРКА

А.А. Малышев, А.С. Остафийчук, Ю.Д. Новиков

В обзорных РЛС «старого» парка в системах АПЧ используются частотные дискриминаторы, которые выполнены на ламповой элементной базе. Они характеризуются нестабильностью параметров, и, соответственно, ошибками в определении частотной расстройки. Предлагается выполнить частотные дискриминаторы на цифровых устройствах, в частности, с использованием преобразователя «частота-код». Проведен анализ ошибок работы цифрового частотного дискриминатора.

Ключевые слова: радиолокационная станция, автоматическая подстройка частоты, частотный дискриминатор, преобразователь «частота-код».

CHOICE OF THE DIGITAL FREQUENCY DISCRIMINATOR SCHEME FOR THE SYSTEMS AFT IN SURVEILLANCE RADAR OF THE «OLD» PARKS

A. Malyshev, A. Ostafiichuk, U. Novikov

In surveillance radars of the «old» park in the systems AFT frequency discriminators are used, which are designed on a lamp element base. They are characterized by instability of parameters, and, accordingly, mistakes in determining the frequency detuning. It is proposed to design frequency discriminators on digital devices, in particular, using the frequency-code converter. The analysis of the errors in the digital frequency discriminator is carried out.

Keywords: radar station, automatic frequency trim, frequency discriminator, frequency-code converter.