

И. М. Мыщенко, Д. Д. Халамейда

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЕТЕРОДИНА ПРИЕМНИКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С МАГНЕТРОННЫМ ПЕРЕДАТЧИКОМ

Предмет и цель работы. В настоящее время импульсные магнетроны являются лидерами по применению в передатчиках радиолокационных станций (РЛС), что связано с необходимостью генерирования мощных высокочастотных колебаний и обеспечения заданной дальности действия. К недостаткам магнетронов следует отнести значительный уровень шумов и трудности реализации перестройки частоты. По этой причине при применении автоматической подстройки частоты (АПЧ) возникают проблемы в управлении непосредственно частотой импульсного магнетрона. В силу этого обстоятельства чаще всего применяется АПЧ гетеродина приемника, а не магнетрона. Частота гетеродина поддерживается такой, что приемник все время оказывается настроенным на частоту принимаемого сигнала. Целью данной работы является анализ существующих методов подстройки частоты гетеродина импульсных приемников РЛС с магнетронным передатчиком, разработка концепции построения функциональной схемы и ее практической реализации.

Результаты работы. В статье приведено описание разработанной функциональной схемы системы автоматической подстройки частоты гетеродина приемника РЛС с магнетронным передатчиком. В системе автоматической подстройки частоты используется частотный различитель, который сочетает достоинства одноконтурной схемы (простоту конструкции и настройки) и двухконтурной (выходное напряжение, равное нулю при заданной частоте магнетрона, а также компенсацию изменений амплитуды входного напряжения и помех). Практическая реализация разработанной системы показана на примере РЛС миллиметрового диапазона (40 ГГц), где в качестве гетеродина приемника используется генератор, созданный на базе диода Ганна с варакторной перестройкой частоты. В работе приведены электрическая принципиальная схема нового частотного различителя и его амплитудно-частотная характеристика.

Методы и методология работы. Для разработки электрической принципиальной схемы применялся интуитивный метод. Анализ разработанной схемы производился с помощью метода математического моделирования.

Заключение. Сделаны выводы о новизне предложенной концепции построения систем АПЧ гетеродинов приемников РЛС с магнетронным передатчиком и ее достоинствах по сравнению с известными решениями. Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: РЛС, магнетронный передатчик, автоматическая подстройка частоты, дискриминатор.

В настоящее время импульсные магнетроны являются лидерами по применению в передатчиках радиотехнических систем, что связано с необходимостью генерирования мощных высокочастотных колебаний и обеспечения необходимой дальности действия. К недостаткам магнетронов следует отнести значительный уровень шумов и сложность реализации перестройки частоты. По этим причинам при стабилизации частоты и применении автоматической ее подстройки возникают трудности в управлении непосредственно частотой импульсного магнетрона.

Магнетрон – это генератор с самовозбуждением, который работает непосредственно на нагрузку. По этим причинам разделить функции обеспечения высокой стабильности частоты и получения максимально большой

выходной мощности невозможно. Как известно [1, 2], основными причинами, вызывающими изменение частоты магнетрона, являются непостоянство внешней нагрузки, нестабильность электрического режима, изменение температуры анодного блока.

Изменения частоты импульсных радиолокационных станций (РЛС) могут быть разделены на два вида:

1) медленные изменения (долговременная стабильность), при которых для РЛС с высокой скважностью уход частоты заметен в интервале между импульсами, а во время действия импульса с малой длительностью частота практически остается неизменной;

2) быстрые изменения (кратковременная стабильность), при которых уже нельзя пренебречь изменением частоты за время генерации импульса.

Нестабильность частоты первого вида наблюдается при вращении антенной системы, изменении напряжения источников питания, температуры окружающей среды и электрического режима магнетрона. Медленные изменения частоты не приводят к искажению спектра генерируемого импульса.

Быстрые изменения частоты обусловлены электронным смещением частоты, скачкообразным переходом магнетрона на другой вид колебаний, многократным отражением от несогласованной нагрузки.

Медленные изменения ухода частоты магнетрона можно значительно уменьшить с помощью системы автоматической подстройки частоты (АПЧ). Быстрые изменения частоты приводят к расширению частотного спектра импульса. В этом случае применяется стабилизирующий резонатор с высокой добротностью, включенный в передающую линию вблизи магнетрона. Недостатком такого метода является то, что часть энергии накапливается в стабилизирующем резонаторе и уменьшает выходную мощность. Кроме этого, полоса изменений частоты магнетрона, в которой возможна стабилизация, ограничена.

Одной из наиболее сложных задач при проектировании систем АПЧ является сочетание достаточно широкой полосы схватывания с предельно малой остаточной расстройкой. В импульсных радиотехнических системах чаще всего применяется автоподстройка частоты гетеродина приемника, а не магнетрона. Эта АПЧ поддерживает частоту гетеродина такой, что приемник все время настроен на частоту принимаемого сигнала. Однако в тех случаях, когда передатчик и приемник находятся в разных местах (например, маяки-ответчики или бистатические радиотехнические системы), требуется подстройка частоты магнетрона.

Наиболее важным элементом АПЧ является частотный различитель (демодулятор), который вырабатывает напряжение ошибки, пропорциональное величине ухода частоты магнетрона от заданного значения. Известно применение одноконтурного демодулятора, когда можно установить уход частоты магнетрона от частоты настройки резонатора [1]. Однако такой простейший различитель не позволяет определить, в каком направлении изменилась частота магнетрона – увеличи-

лась или уменьшилась. Поэтому использование его в системах АПЧ ограничено.

Другим частотным различителем является двухконтурная схема, свободная от этого недостатка. При полной симметрии схемы напряжение частотного различителя будет равно нулю. При уходе частоты магнетрона от заданного значения частоты выходное значение, в зависимости от знака расстройки, будет той или иной полярности. Недостатком частотного различителя этого типа является необходимость иметь два высокодобротных резонатора. Кроме этого, необходимо осуществлять сложное симметрирование схемы. Не лишены недостатков и известные частотные различители, в которых используется только один высокодобротный резонатор – волноводный частотный разделитель, который состоит из отрезка волновода с двумя диодными детекторами, расположенными на определенном расстоянии, и частотный различитель с модулируемым резонатором (первый имеет достаточно сложную конструкцию и настройку, а во втором – ухудшается стабильность резонатора за счет применения в его конструкции управляемой реактивности).

Другим вариантом, позволяющим не ухудшить стабильность эталонного резонатора, является система стабилизации частоты, описанная в работе [6], в которой рассмотрен способ, использующий амплитудную модуляцию части сигнала стабилизируемого генератора. Однако он наиболее пригоден для генераторов непрерывного излучения.

Целью данной работы является анализ существующих методов подстройки частоты гетеродина импульсных приемников РЛС с магнетронным передатчиком, разработка концепции построения функциональной схемы и ее практическая реализация. Улучшение кратковременной стабильности частоты самого магнетрона в данной работе не рассматривается.

1. Концепция построения системы автоматической подстройки частоты гетеродина. В результате анализа существующих методов подстройки частоты стало ясно, что известные методы могут решить поставленную задачу, но они не позволяют создать малогабаритную конструкцию с применением современной элементной базы и нетрудоемкую в настройке. Поэтому концепцией построения функциональной схемы и ее прак-

тической реализации было применение наиболее простого одноконтурного дискриминатора частоты и разработка оригинального метода устранения его недостатков – неоднозначности ухода частоты (в сторону увеличения или уменьшения) и влияния амплитуды входного сигнала и помех на работу дискриминатора.

Это дало возможность решить задачу создания малогабаритного устройства на новой элементной базе, которое обладает простотой в настройке. Параметры такой одноконтурной схемы не хуже, чем у сложного в настройке двухконтурного дискриминатора, благодаря применению частотно-независимого параллельного канала. При этом линейность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) лучше, так как нет необходимости в симметрировании схемы.

На рис. 1 представлена предлагаемая функциональная схема системы автоматической подстройки частоты гетеродина приемника РЛС с магнетронным передатчиком, в которой оригинальным узлом является частотный дискриминатор.

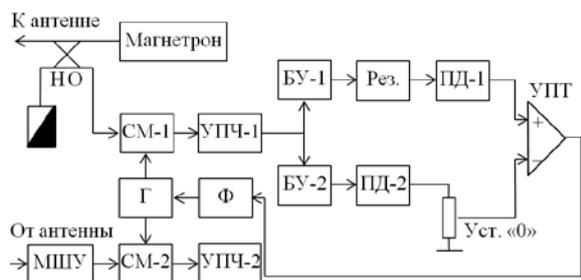


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматической подстройки частоты: НО – направленный ответвитель; СМ-1, СМ-2 – смесители; МШУ – малошумящий усилитель; УПЧ-1, УПЧ-2 – усилители промежуточной частоты; Г – гетеродин; Ф – фильтр; БУ-1, БУ-2 – буферные усилители; Рез. – полосковый резонатор; ПД-1, ПД-2 – пиковые детекторы; УПТ – операционный усилитель; Уст. «0» – резистор

Схема работает следующим образом. Сигнал от импульсного магнетрона передатчика через направленный ответвитель (НО) поступает на вход смесителя СМ-1, на другой вход которого подают сигнал от гетеродина приемника (генератор Ганна с варакторной перестройкой частоты). Выходной сигнал СМ-1 с разностной частотой $f_{пч} = f_M - f_G$ (где f_M – частота магнетрона, f_G – частота гетеродина, $f_{пч}$ – промежуточная частота) усиленный усилителем промежуточной частоты

УПЧ-1, поступает на вход частотного дискриминатора. Частотный дискриминатор состоит из буферных усилителей БУ-1 и БУ-2, которые имеют одинаковые параметры, полоскового резонатора, пиковых детекторов ПД-1 и ПД-2, а также операционного усилителя УПТ.

Как известно [4], простейшим является дискриминатор, работающий на спаде резонансной кривой (рис. 2).

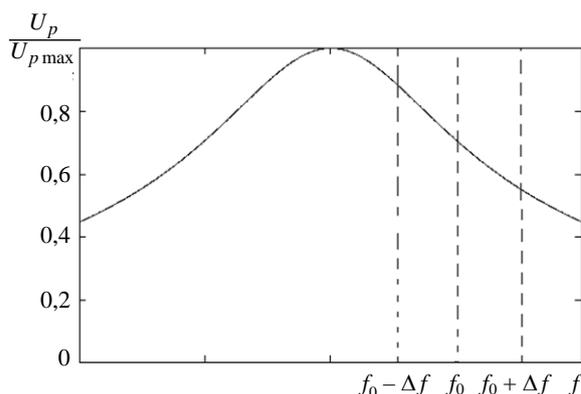


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика резонатора

Эталонный резонатор с шириной полосы пропускания $2\Delta f$ (по уровню 0,7 дБ) расстроен относительно средней частоты $f_{пч}$, и на спаде его АЧХ изменение частоты преобразуется в изменение амплитуды. Большим недостатком этого простого демодулятора является его высокая чувствительность к изменениям амплитуды входного сигнала.

Частотный дискриминатор работает следующим образом. Сигнал, равный разнице частоты магнетрона f_M и частоты гетеродина f_G , с помощью буферного усилителя БУ-1 подается на полосковый резонатор. Добротность резонатора выбирается таким образом, чтобы линейный участок АЧХ соответствовал необходимой полосе регулирования, а на середине линейного участка находилась точка, соответствующая необходимому значению частоты ($f_0 = f_{пч}$).

В предлагаемой схеме частотного дискриминатора используется одноконтурная схема, в которой для исключения влияния амплитуды входного сигнала добавлен параллельный канал БУ-2, пиковый детектор ПД-2. Сигнал с выхода пикового детектора ПД-2 подается на инвертирующий вход операционного усилителя УПТ и служит для компен-

сации не только изменений амплитуды входного сигнала, но и импульсных помех. Для этого с помощью резистора «Уст. 0» устанавливается нуль амплитудно-частотной характеристики, когда частота соответствует необходимому значению.

Таким образом, изменение амплитуды входного сигнала влияет на выходное напряжение как основного канала дискриминатора (БУ-1, Рез., ПД-1), так и вспомогательного (БУ-2, ПД-2). Так как основной и дополнительный каналы поочередно подключены к неинвертирующему и инвертирующему входам операционного усилителя УПТ, это изменение вычитается и не влияет на выходной сигнал УПТ дискриминатора. Далее сигнал рассогласования АПЧ с выхода УПТ через фильтр Ф, который определяет постоянную времени системы автоподстройки, поступает на вход управления частотой гетеродина Г и подстраивает его частоту до значения, когда $f_{ПЧ} = f_M - f_G$.

2. Практическая реализация частотно-го дискриминатора показана на примере

РЛС миллиметрового диапазона (40 ГГц) (рис. 1), где в качестве гетеродина используется генератор, созданный на базе диода Ганна с варакторной подстройкой частоты. В работе [5] описаны функциональные схемы, где в качестве гетеродинов применяются автогенераторы на транзисторах с дальнейшим умножением частоты сигнала. Такие схемы можно применять в тех случаях, когда не требуется получение максимально возможной чувствительности приемника РЛС. Это связано с тем, что при умножении частоты уменьшается не только мощность каждой последующей гармоники, но и ее соотношение сигнал/шум. По этим причинам в предложенной схеме применен гетеродин с хорошим соотношением сигнал/шум и возможностью перестройки частоты в широких пределах. На рис. 3 показана схема электрическая принципиальная частотно-го дискриминатора АПЧ (рис. 1), буферные усилители БУ-1 и БУ-2 собраны на транзисторах VT-1 и VT-2, пиковые детекторы ПД-1 и ПД-2 – на диодах VD-1 и VD-2.

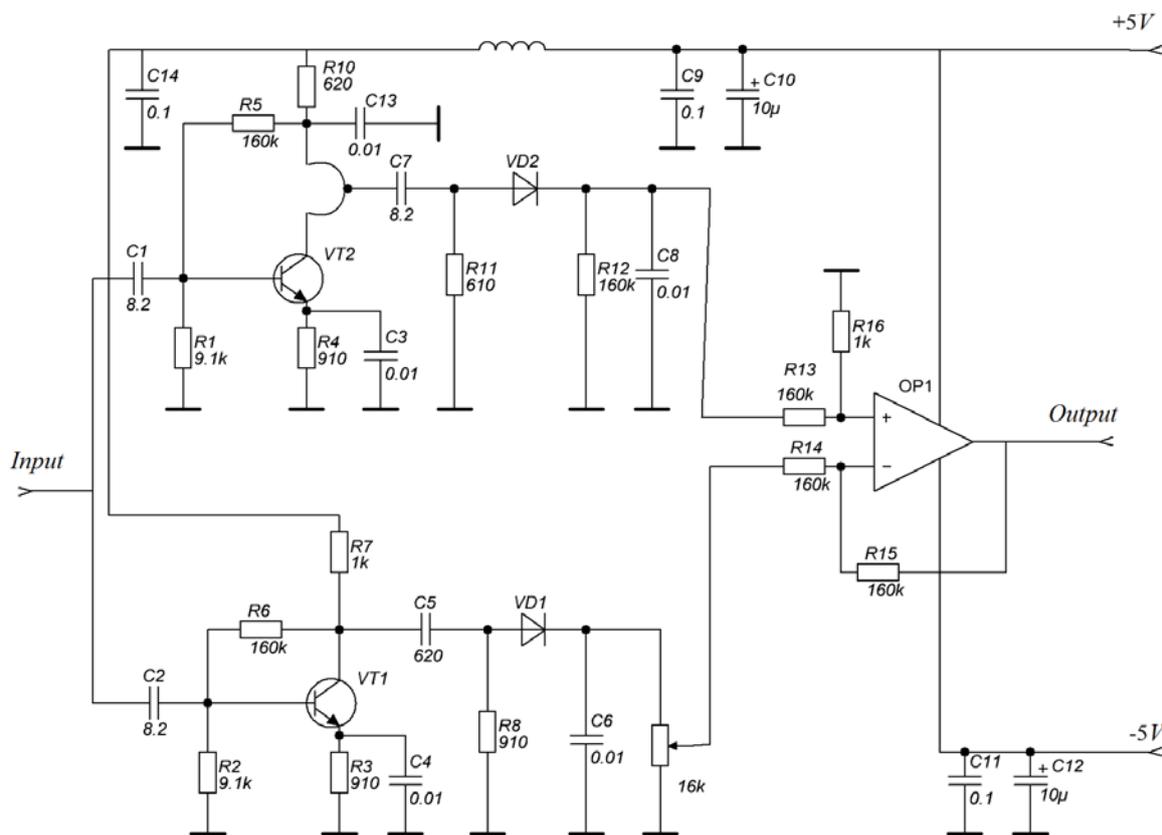


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная частотно-го дискриминатора АПЧ

Разработанная система АПЧ является статической следящей системой, в которой имеет место остаточная ошибка $\Delta f_{\text{ост}}$ [3]:

$$\Delta f_{\text{ост}} = \Delta f_{\text{max}} / (K_0 + 1),$$

где Δf_{max} – максимальное отклонение входной частоты; K_0 – коэффициент передачи обратной связи. В нашем случае Δf_{max} будет определяться стабильностью частоты магнетрона $\Delta f/f_0 \approx 10^{-4}$ или $\Delta f \approx 3,7$ МГц. При $K_0 \approx 100$ остаточная ошибка $\Delta f_{\text{ост}}$ будет составлять 37 кГц, что позволяет удерживать сигнал промышленной частоты 2 ГГц в заданной полосе.

Выводы. Таким образом, разработанная система автоматической подстройки частоты гетеродина приемника РЛС с магнетронным передатчиком обладает малыми габаритами и всеми необходимыми параметрами, позволяющими применять ее в малогабаритных радиотехнических устройствах специального назначения. Она технологична и проста в настройке, имеет параметры не хуже двухтактной схемы и превосходит ее в линейности АЧХ.

Дальнейшие исследования этой системы необходимо проводить в более высокочастотных диапазонах, где применение известных методов вызывает трудности. В настоящее время авторы работают в этом направлении, а результаты будут опубликованы в следующих работах.

Библиографический список

1. Бычков С. И. *Магнетронные передатчики*. Москва: Военное издательство министерства обороны СССР, 1955. 216 с.
2. Дзюба В. П., Ерёмка В. Д., Зыков А. Ф., Милиневский Л. П., Мыценко И. М., Прокопенко О. И., Роевко А. Н., Роскошный Д. В. *Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства*. Под ред. В. М. Яковенко. Севастополь: Вебер, 2012. 196 с.
3. Гуткин Л. С., Лебедев В. Л., Сифоров В. И. *Радиоприемные устройства*. Часть 2. Москва: Советское радио, 1963. 349 с.
4. Мейнке Х., Гундлах Ф. *Радиотехнический справочник*. Т. 2. Пер. с нем. Москва: Госэнергоиздат, 1962. 576 с.
5. Ерёмка В. Д., Кабанов В. А., Логвинов Ю. Ф., Мыценко И. М., Разсказовский В. Б., Роевко А. Н. *Нетрадиционные методы и средства радиолокации*. Харьков: Полиграфический центр «В лавке», 2015. 315 с.
6. Безгина И. П., Ерёмка В. Д., Макулина Т. А., Мыценко И. М. Бестоковая перестройка и стабилизация частоты автоколебаний клинотрона терагерце-

вого диапазона. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2015. Т. 23, № 6. С. 47–60.

REFERENCES

1. Bychkov, S. I., 1955. *Magnetron transmitters*. Moscow: Military Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR (in Russian).
2. Yakovenko, V. M. ed., Dzyuba, V. P., Erjomka, V. D., Zykov, A. F., Milinevskiy, L. P., Mytsenko, I. M., Prokopenko, O. I., Roenko, A. N., Roskoshnyy, D. V., 2012. *Physical background and radio-electronic facility for coastguard and monitoring of navigation*. Sevastopol: Weber Publ. (in Russian).
3. Gutkin, L. S., Lebedev, V. L., Siforov, V. I., 1963. *Radio receivers*. Part 2. Moscow: Sovetskoye radio Publ. (in Russian).
4. Meynke, H., Gundlah, F., 1962. *Radio engineering*. Vol. 2. Transl. from German. Moscow: Gosenergoizdat Publ. (in Russian).
5. Erjomka, V. D., Kabanov, V. A., Logvinov, Yu. F., Mytsenko, I. M., Razskazovskiy, V. B., Roenko, A. N., 2015. *Nontraditional methods and means of radar*. Kharkov: «V lavke» Publ. (in Russian).
6. Besgina, I. P., Erjomka, V. D., Makulina, T. A., Mytsenko, I. M., 2015. The free-current rearrangement and stabilization of the frequency of self-oscillations of the klyotron of the terahertz band. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Prikladnaya Nelineinaya Dinamika*, **23**(6), pp. 47–60 (in Russian).

Рукопись поступила 12.03.2018.

I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda

SYSTEM OF AUTOMATIC FREQUENCY CONTROL OF HETERODYNE OF RADAR RECEIVER WITH MAGNETRON TRANSMITTER

Subject and purpose. At present, pulsed magnetrons are leaders in the use in the transmitters of radar stations which is caused by the need to generate powerful high-frequency oscillations and to provide a given range of radar.

The disadvantages of magnetrons include a significant level of noise and difficulties in implementing frequency control. For this reason, when using automatic frequency control (AFC), problems arise in controlling the frequency of the pulsed magnetron. That is why AFC of heterodyne of the receiver rather than the one of the magnetron is most often used. The heterodyne frequency is maintained such that the receiver is always tuned to the frequency of the received signal. The purpose of this paper is to analyze the existing methods for tuning the heterodyne frequency of pulsed radars with a magnetron transmitter, to develop a concept for constructing a functional scheme and its practical implementation.

Results. The functional scheme of the automatic frequency tuning system of heterodyne in radar receiver with a magnetron transmitter is developed. A frequency discriminator is used in AFC. The frequency discriminator combines the advantages of a single-cycle circuit (simplicity of

design and tuning) and a two-cycle circuit (an output voltage equal to zero for a given magnetron frequency, as well as compensation of variations in the amplitude of the input voltage and interference). The practical implementation of the developed system is shown by the example of millimeter-wave band radar (40 GHz), where a generator based on a Gunn diode with varactor frequency tuning is used as the receiver heterodyne. In this paper, the electric scheme of a new frequency discriminator and its amplitude-frequency characteristic are shown.

Methods and methodology. An intuitive method was used to develop an electrical schematic diagram. The analysis of the developed scheme was carried out using the method of mathematical modeling.

Conclusions are made about the novelty of the proposed concept of constructing the AFC of heterodyne radar receivers with a magnetron transmitter and its advantages in comparison with known solutions.

Key words: radar, magnetron transmitter, automatic frequency control, discriminator.

И. М. Миценко, Д. Д. Халамейда

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО ПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ГЕТЕРОДИНА ПРИЙМАЧА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ З МАГНЕТРОННИМ ПЕРЕДАВАЧЕМ

Предмет і мета роботи. На цей час імпульсні магнетрони є лідерами щодо застосування в передавачах радіолокаційних станцій (РЛС), що пов'язано з необхідністю генерування потужних високочастотних коливань і забезпечення заданої дальності дії. До недоліків магнетронів слід віднести значний рівень шумів і труднощі реалізації перебудови частоти. З цієї причини при застосуванні автоматичного підстроювання частоти

(АПЧ) виникають проблеми в керуванні частотою імпульсного магнетрона. Через це найчастіше застосовується АПЧ гетеродина приймача, а не магнетрона. Частота гетеродина підтримується такою, що приймач весь час виявляється налаштованим на частоту сигналу, що приймається. Метою даної роботи є аналіз існуючих методів підстроювання частоти гетеродина імпульсних приймачів РЛС з магнетронним передавачем, розроблення концепції побудови функціональної схеми і її практичної реалізації.

Результати роботи. У статті наведено опис розробленої функціональної схеми системи автоматичного підстроювання частоти гетеродина приймача РЛС з магнетронним передавачем. У системі автоматичного підстроювання частоти використовується частотний розрізнявач, який поєднує переваги одноктакної схеми (простоту конструкції і налаштування) і двотактної схеми (вихідну напругу, що дорівнює нулю при заданій частоті магнетрона, а також компенсацію змін амплітуди вхідної напруги і завад). Практична реалізація розробленої системи показана на прикладі РЛС міліметрового діапазону (40 ГГц), де в якості гетеродина приймача використовується генератор, створений на базі діода Ганна з варакторною перебудовою частоти. У роботі наведено електричну принципову схему нового частотного розрізнявача і його амплітудно-частотну характеристику.

Методи і методологія роботи. Для розробки електричної принципової схеми застосовувався інтуїтивний метод. Аналіз розробленої схеми проводився за допомогою методу математичного моделювання.

Висновок. Зроблено висновки про новизну запропонованої концепції побудови систем АПЧ гетеродинів приймачів РЛС з магнетронним передавачем і її переваги в порівнянні з відомими рішеннями.

Ключові слова: РЛС, магнетронний передавач, автоматичне підстроювання частоти, дискримінатор.