



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-70-78>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.372.512

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С НЕСТАБИЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕЩЕСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

И.А. ДУБОВИК, П.В. БОЙКАЧЕВ

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью работы является разработка метода синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических систем с изменяющимся импедансом в различных условиях их эксплуатации. Для достижения поставленной цели предложен критерий (комплексный критерий) минимизации значения модуля инварианта чувствительности функции коэффициента отражения к изменению импеданса нагрузки с ограничениями на квадрат отклонения коэффициента передачи мощности от заданного уровня. Предложено использовать сочетание методов вещественных частот совместно с показанным комплексным критерием, что позволило реализовать эффективный подход к синтезу согласующих устройств для широкополосных радиотехнических систем с нестабильным импедансом нагрузки. Для верификации подхода было синтезировано согласующее устройство, которое позволило уменьшить потери уровня коэффициента передачи мощности передаваемого в антенну UHF/VHF диапазона AD-44 / CW-TA-30-512 при расположении ее в различных условиях эксплуатации не менее чем на 50 % по отношению к потерям, полученным со штатным согласующим устройством.

Ключевые слова: согласование, метод, чувствительность, нагрузка, инвариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дубовик И.А., Бойкачев П.В. Методика синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки на основе метода вещественных частот. Доклады БГУИР. 2021; 19(5): 70-78.

METHOD FOR SYNTHESIS OF MATCHING DEVICES FOR BROADBAND RADIO ENGINEERING SYSTEMS WITH UNSTABLE LOAD IMPEDANCE BASED ON THE METHOD OF REAL FREQUENCIES

ILYA A. DUBOVIK, PAVEL V. BOYKACHEV

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work is to develop a method for the synthesis of matching devices for broadband radio engineering systems with varying impedance in different operating conditions. To achieve this goal, a criterion (complex criterion) is proposed for minimizing the value of the modulus of the sensitivity invariant of the reflection coefficient function to a change in the load impedance with restrictions on the square of the deviation of the power transmission ratio from a given level. It is proposed to use a combination of methods of real frequencies together with the shown complex criterion, which made it possible to implement an effective approach to the synthesis of matching devices for broadband radio engineering systems with an unstable load impedance. To verify the approach, a matching device was synthesized, which made it possible to reduce the loss of the power transmission factor level transmitted to the UHF/VHF antenna of the AD-44 / CW-TA-30-512 range when it is located in various operating conditions by at least 50 % in relation to losses obtained with a standard matching device.

Keywords: coordination, method, sensitivity, load, invariant.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Dubovik I.A., Boykachev P.V. Method for synthesis of matching devices for broadband radio engineering systems with unstable load impedance based on the method of real frequencies. Doklady BGUIR. 2021; 19(5): 70-78.

Введение

Радиотехнические устройства (РТУ) широко используются практически во всех сферах жизнедеятельности. Так, в системах коммуникации для связи между абонентами используются радиостанции VHF/UHF диапазонов, функционирующие в широком диапазоне частот (30–300 МГц) [1, с. 5–8] в различных условиях эксплуатации. Для того чтобы радиостанция обеспечивала максимальную дальность связи в различных условиях эксплуатации, необходимо, чтобы антенное устройство (АУ), обладающее своим комплексным сопротивлением, было согласовано с выходным (входным) трактом. Для выполнения данной операции используют согласующие устройства (СУ), методы синтеза которых не всегда учитывают непостоянство импеданса нагрузки, вызванное изменением условий эксплуатации [2].

В [3], где в качестве АУ использовались АУ AD-44/CW-TA-30-512 (P-180) [4] и AD-25/CW-3512 (P-181) [5], было установлено, что изменение условий эксплуатации приводит к изменению импеданса АУ (реальная часть 20–57, мнимая часть –10–25 Ом) во всем рабочем диапазоне частот. Наличие штатного согласующего устройства в АУ радиостанции P-180 (P-181) не способно обеспечить требуемый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации, что приводит к уменьшению дальности связи на 16–22 %. Вследствие этого возникает необходимость в разработке методики синтеза согласующего устройства, обеспечивающего требуемый уровень передачи мощности в условиях изменяющегося импеданса нагрузки.

Методика синтеза согласующих устройств в условиях изменяющегося импеданса нагрузки

Для синтеза СУ, позволяющего обеспечить уровень коэффициента передачи по мощности (КПМ) не хуже требуемого, при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо оценить степень влияния вариации импеданса нагрузки на уровень КПМ. Для описания влияния малых отклонений используется выражение [6, с. 16]

$$\Delta D = \sum_{i=1}^N S_{x_i}^D \Delta x_i, \quad (1)$$

где $S_{x_i}^D = S\{D(x_i), x_i\} = \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}$ – чувствительность функции $D(x)$ к изменению параметров x_i ,

N – количество параметров x_i , ΔD – отклонение функции, Δx_i – отклонение x_i .

Особый интерес в данном выражении представляет чувствительность характеристики СУ (групповое время задержки, уровень передачи мощности и т. д.) к изменению параметров (нагрузки, согласующей цепи), так как уменьшение значения данного параметра приводит к уменьшению отклонения характеристики СУ.

В [7] было установлено, что для обеспечения требуемого уровня КПМ при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо, чтобы синтезируемое СУ обладало свойством минимальной чувствительности [6, с. 51] функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки. Для определения функции сопротивления согласующей цепи необходимо решить выражение

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{f_B}^{f_H} \left(K_{\text{треб}} - \left(1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}})|^2 \right) \right)^2 df \leq \varepsilon \\ \int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \left\{ S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}}) \right\} \right\} \right|^2 df \leq \min \end{array} \right. , \quad (2)$$

где $K_{\text{треб}}$ – требуемый уровень КПМ; $Z_H(f)$ – комплексное сопротивление нагрузки;

$R\{S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}})\} = \frac{2 \operatorname{Re}\{Z_{\text{Ц}}(f)\} Z_H(f)}{(Z_H(f) + Z_{\text{Ц}}(f))(Z_H(f) - Z_{\text{Ц}}(-f))}$ – инвариант чувствительности

функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки,

$S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}}) = \frac{Z_H(f) - Z_{\text{Ц}}(-f)}{Z_H(f) + Z_{\text{Ц}}(f)}$ – функция коэффициента отражения (коэффициент

рассогласования), ε – допустимое отклонение уровня КПМ в рабочем диапазоне частот, $Z_{\text{Ц}}(f)$ – комплексное сопротивление согласующей цепи.

Выражение (2) представляет значение модуля инварианта чувствительности в заданном диапазоне, которое необходимо минимизировать с ограничениями на квадрат отклонения КПМ от заданного уровня.

Основываясь на [7, с. 53], для определения минимально-допустимого значения инварианта чувствительности предлагается использовать следующее выражение:

$$\delta = \int_{f_B}^{f_H} \frac{\Delta |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}})|}{|S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}})|} \left| \frac{Z_H}{(\Delta \operatorname{Re}\{Z_H\} + i \Delta \operatorname{Im}\{Z_H\})} \right| df, \quad (3)$$

где $\Delta |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{Ц}})|$ – допустимое отклонение модуля функции коэффициента отражения, $\Delta \operatorname{Re}\{Z_H\}$, $\Delta \operatorname{Im}\{Z_H\}$ – допустимое отклонение реальной, мнимой части функции коэффициента отражения.

Таким образом, система уравнения (2) преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{f_B}^{f_H} \left(K_{\text{треб}} - \left(1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{сц}})|^2 \right) \right)^2 df \leq \varepsilon \\ \int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \left\{ S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{сц}}) \right\} \right\} \right|^2 df \leq \delta \end{array} \right. , \quad (4)$$

где в качестве исходных данных задается: $\Delta |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{сц}})|$, $\Delta \operatorname{Re}\{Z_H\}$ и $\Delta \operatorname{Im}\{Z_H\}$ в рабочем диапазоне частот. Решение системы уравнений позволит синтезировать широкополосные согласующие устройства, обеспечивающие требуемый уровень передачи мощности, с допустимым отклонением комплексного сопротивления нагрузки.

Систему уравнений можно использовать в качестве комплексного критерия в сочетании с одним из существующих численных методов синтеза широкополосных согласующих устройств. В качестве метода синтеза, которые подробно были рассмотрены в [2], предлагается использовать метод вещественных частот [8]. Основное его преимущество состоит в том, что он не требует аппроксимации импеданса нагрузки, а функция КПМ представляется в виде аналитического выражения. Согласующее устройство синтезируется с помощью итеративных подходов поиска вещественной составляющей функции сопротивления согласующей цепи. Для упрощения поиска вида вещественной составляющей функции сопротивления согласующей цепи предлагается использовать относительную чувствительность функции коэффициента передачи по мощности при изменении импеданса согласующей цепи [6, с.118–119].

Сочетание метода вещественных частот с комплексным критерием синтеза позволило разработать методику синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических устройств с изменяющимся импедансом нагрузки (рис. 1).

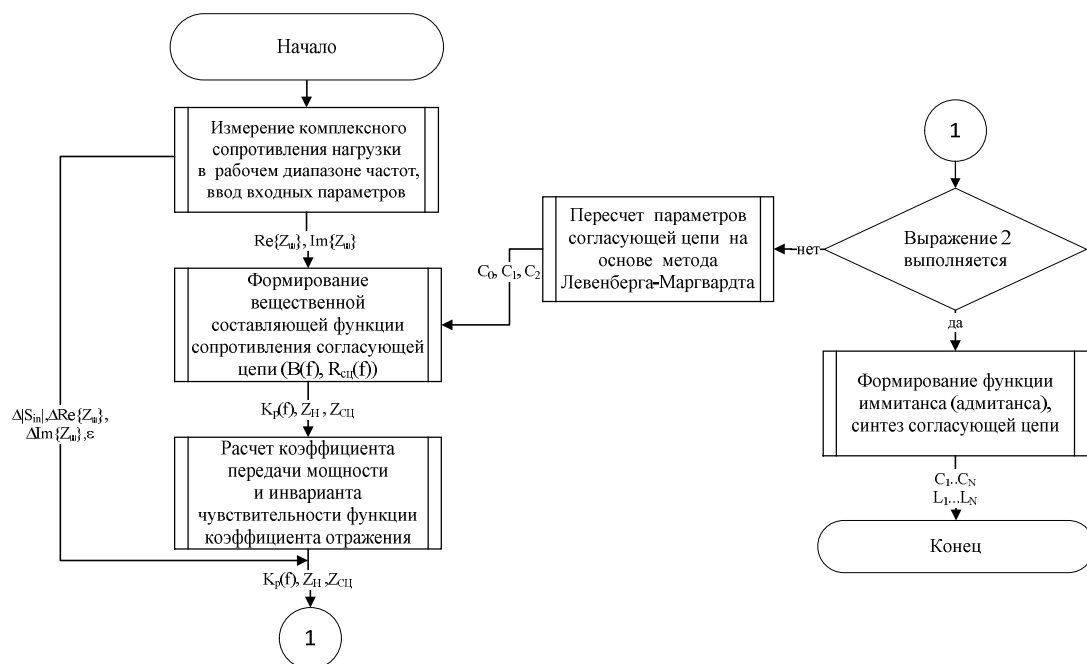


Рис. 1. Структура методики синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических устройств с изменяющимся импедансом нагрузки на основе метода вещественных частот

Fig. 1. Structure method of synthesis of matching devices for broadband radio engineering systems with varying load impedance based on the method of real frequencies

Суть методики заключается в нахождении вещественной составляющей функции сопротивления согласующей цепи, комплексная функция сопротивления которого обеспечивает выполнение комплексного критерия (выражение (2)) исходя из заданных $\Delta |S_{in}(f, Z_H, Z_{\text{сц}})|$, $\Delta \operatorname{Re}\{Z_H\}$ и $\Delta \operatorname{Im}\{Z_H\}$. Достоинство данного подхода заключается в отсутствии дифференцирования функции коэффициента отражения для поиска значения чувствительности и синтеза согласующих цепей, в которых учитывается отклонение импеданса нагрузки.

Синтез согласующего устройства для АУ AD-44/CW-TA-30-512 радиостанции Р-180

Для проверки работоспособности методики было синтезировано СУ, обеспечивающее минимальное значение инварианта чувствительности с допустимым отклонением уровня КПМ $\varepsilon = 0,01$ (10 % от максимального значения функции КПМ = 1) в различных условиях эксплуатации (в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой), для АУ AD-44 / CW-TA-30-512 (P-180) в рабочей полосе частот ($\Delta f = 108\text{--}146$ МГц). Моделирование было проведено в AWR Microwave Studio 14 [9]. Схема СУ представлена на рис. 2, элементы которого приведены под ряд номиналов E24.

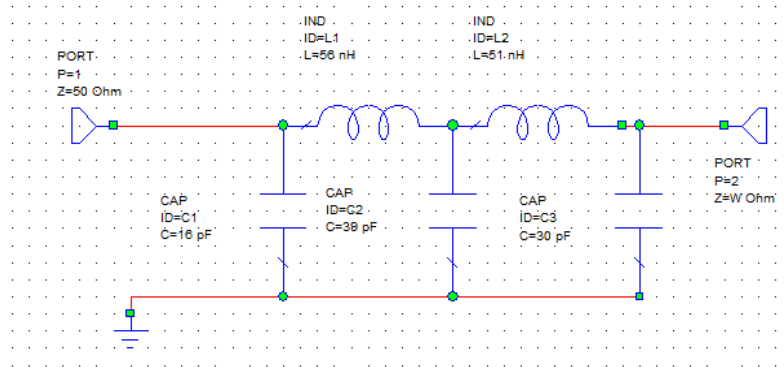


Рис. 2. Схема согласующего устройства для антенного устройства AD-44 / CW-TA-30-512 (P-180)
Fig. 2. Diagram of a matching device for an antenna device AD-44 / CW-TA-30-512 (P-180)

Итоговая зависимость КПМ от частоты для различных условий обстановки представлена на рис. 3. На данном рисунке прерывистыми линиями показаны КПМ АУ с синтезированным согласующим устройством, а сплошными линиями – со штатным согласующим устройством в различных условиях обстановки.

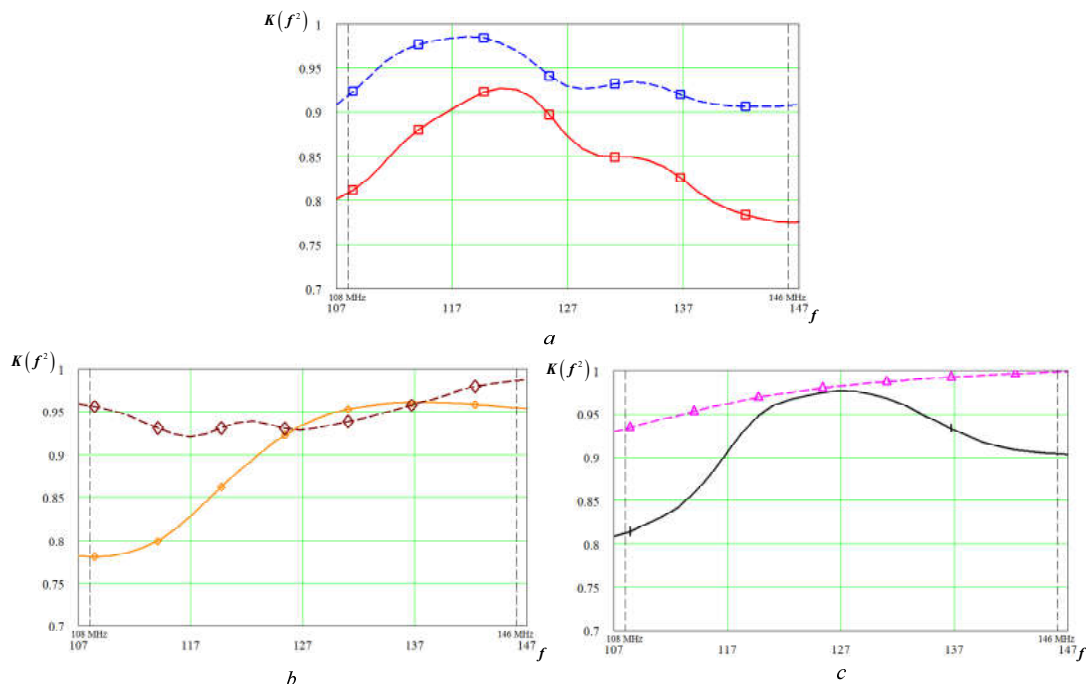


Рис. 3. Зависимость функции КПМ от частоты АУ AD-44/CW-TA-30-512 (P-180):
а – в помещении; б – в непосредственной близости с техникой; с – в лесном массиве
Fig. 3. Dependence of the power transmission coefficient (PTC) function on the frequency of the AD-44 / CW-TA-30-512 (P-180): a – indoors; b – in close proximity to equipment; c – in a forest

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что синтезированное с помощью разработанной методики СУ обеспечивает более высокое значение уровня КПМ АУ при нахождении его в различных условиях обстановки. На рис. 4 представлены потери уровня

КПМ при нахождении АУ в различных условиях эксплуатации [3]. Исходя из полученных результатов, можно убедиться в том, что отклонение во всем рабочем диапазоне частот составляют не более 10 % от максимального значения уровня КПМ.

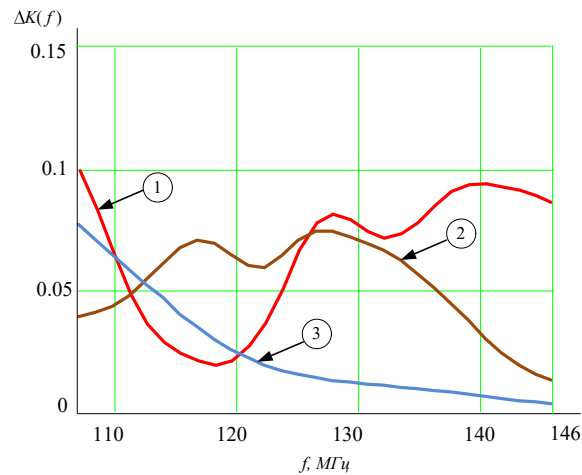


Рис. 4. Потери уровня КПМ при расположении АУ: 1 – в помещении; 2 – в непосредственной близости с техникой; 3 – в лесном массиве

Fig. 4. Losses of the level of the PTC when the AD is located: 1 – indoors; 2 – in close proximity to equipment; 3 – in a forest

Так, потери в уровне КПМ АУ совместно с синтезированной СУ при расположении АУ в помещении составляют 6 % (14,9 % со штатным СУ), в лесном массиве – 4 % (11,1 % со штатным СУ), в непосредственной близости с техникой – 5,6 % (9,2 % со штатным СУ).

На основе рассчитанного согласующего устройства изготовлен макет, представленный на рис. 5. Рассчитанная схема согласующего устройства была реализована с помощью SMD элементов из ряда стандартных номиналов E 24 фирмы «Murata Manufacturing»¹ [10] с типоразмерами: C1 – 15 пФ, L1 – 55 нГн, C2 – 39 пФ, L2 – 50 нГн, C3 – 30 пФ.

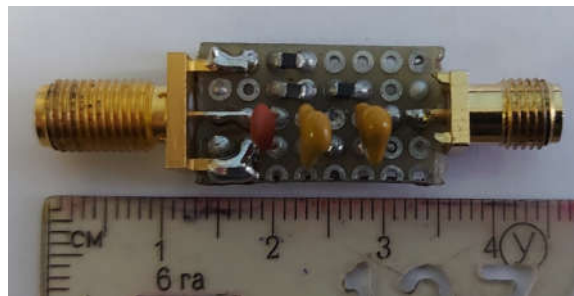


Рис. 5. Снимок синтезированного согласующего устройства
Fig. 5. Snapshot of the synthesized matching device

Для проверки полученных результатов были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых выполнены измерения коэффициента стоячей волны АУ AD-44/CW-TA-30-512 в лесном массиве, в помещении и в непосредственной близости с техникой. Измерения выполнялись с помощью векторного сетевого анализатора NanoVNA V2². В качестве примера на рис. 6 представлены снимки экспериментальных исследований, выполненных в лесном массиве. Полученные результаты представлены на рис. 7, где сплошной линией отображается зависимость функции КПМ АУ AD-44/CW-TA-30-512 совместно с синтезированным согласующим устройством, а штрихпунктирной линией – со штатным.

¹ Chip inductors (chip coils) [Electronic resource]. *Murata manufacturing*. 2019. Access mode: <http://www.murata.com/products/catalog/pdf/o05e.pdf>. Date of access: 28.02.2021.

² Дубов Д. Обзор векторного анализатора цепей NanoVNA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://radiochief.ru/radio/obzor-vektornogo-analizatora-tsepej-nanovna>. (Дата обращения 28.02.2020).

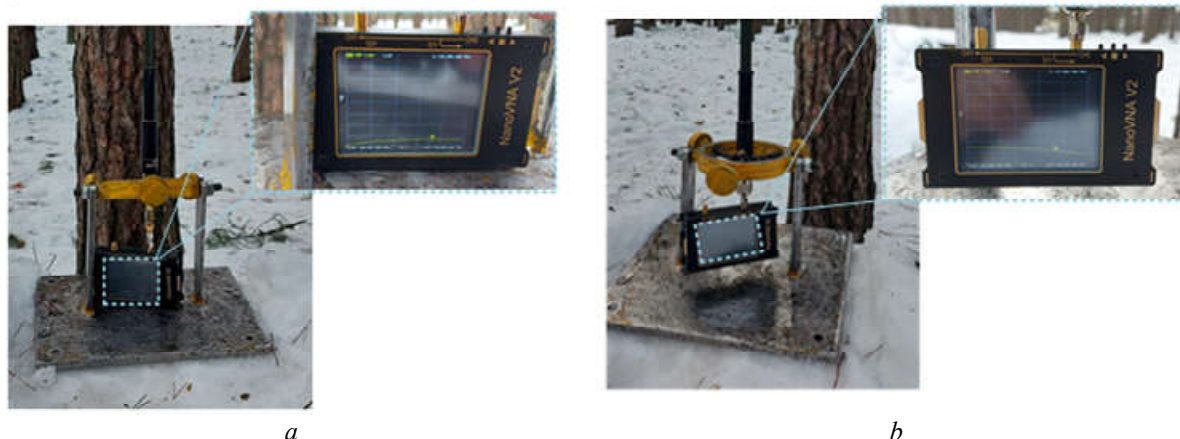


Рис. 6. Измерение коэффициента стоячей волны АУ AD-44 / CW-TA-30-512 в лесном массиве:
а – без согласующего устройства; б – с согласующим устройством
Fig. 6. Measurement of the standing wave ratio of AD-44 / CW-TA-30-512 in a forest:
а – without a matching device; б – with a matching device

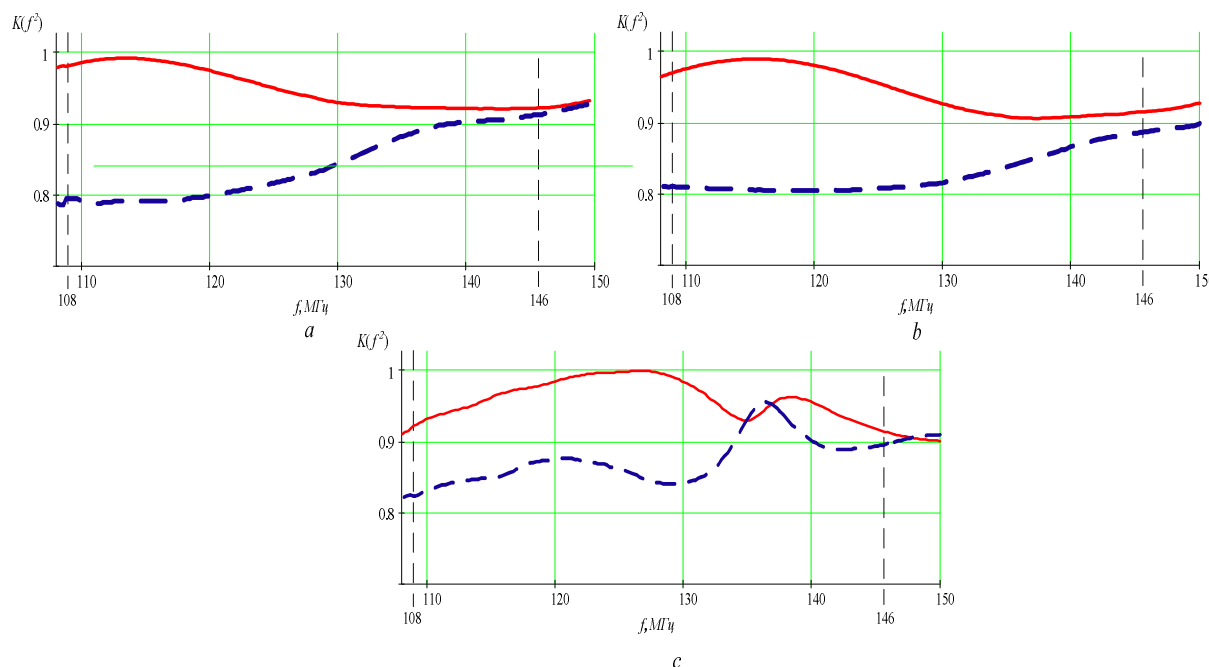


Рис. 7. Измеренные значения функции КПМ АУ AD-44/CW-TA-30-512:
а – в лесном массиве; б – в непосредственной близости с техникой; с – в помещении
Fig. 7. Measured values of the PTC function AD-44 / CW-TA-30-512:
а – in a forest; б – in close proximity to equipment; с – indoors

Из результатов эксперимента следует, что потери уровня КПМ относительно максимального значения (исходя из [12, с. 44]) составляют 4,0 % (со штатным СУ – 9,1 %) при расположении АУ в помещении, 8,3 % (со штатным СУ – 17,2 %) в непосредственной близости с техникой и 6,1 % (со штатным СУ – 12,2 %) при расположении в лесном массиве. Синтезированное СУ обеспечивает уменьшение потерь уровня КПМ АУ AD-44/CW-TA-30-512 при расположении его в различных условиях эксплуатации не менее чем на 50 % по отношению к потерям со штатным СУ. Таким образом, проведенный эксперимент свидетельствует о достоверности и практической значимости теоретических результатов.

Заключение

Использование разработанной методики позволило синтезировать СУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512, которое минимизирует влияние изменения импеданса нагрузки на

результатирующий КППМ, что наглядно продемонстрировано результатами (рис. 7), полученными в ходе экспериментальных исследований. Синтезированное СУ уменьшает потери уровня КППМ АУ AD-44/CW-TA-30-512 при расположении его в различных условиях эксплуатации не менее чем на 50 % по отношению к потерям, полученным со штатным СУ.

Следует обратить особое внимание на то, что возможности по сохранению требуемого уровня КППМ в условиях изменения импеданса нагрузки не могут быть безграничными. Если допустимый класс изменения импеданса нагрузки слишком велик, то одна и та же синтезированная согласующая цепь не сможет функционировать во всех возможных ситуациях, какими бы динамическими свойствами она не обладала [13, с. 15–16]. В этом можно убедиться исходя из значений импеданса нагрузки АУ радиостанции Р-181 [3], где только реальная составляющая импеданса изменяется в диапазоне от 10 до 160 Ом. В таких случаях положительный эффект функционирования может быть гарантирован только при наличии в системе адаптации.

Список литературы

1. Дик А.М., Кашкаров А.В., Макатерчик А.В. *Радиостанции малой и средней дальности*. Минск: БГУИР; 2014: 108.
2. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О., Дмитренко А.А. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки. *Доклады БГУИР*. 2021;19(1):61-69.
3. Бойкачев П.В., Дубовик И.А., Исаев В.О. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2019;2:32-40.
4. Trival antene. Datasheet AD-44/CW-TA-30-512. Slovenia; 2019.
5. Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512. Slovenia; 2019.
6. Гехер К., ред: Хотунцева Ю.Л. *Теория чувствительности и допусков электронных цепей*. Москва: Сов. радио; 1973.
7. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О. Комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств на основе инварианта чувствительности. *Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020*. Минск: БГУИР; 2020: 41-44.
8. Yarman B.S. *Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks*. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
9. Guide to MWO: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA; 2018.
10. Ланнэ А.А. *Оптимальный синтез линейных электрических цепей*. Москва: Связь; 1969.
11. Небылов А.В. *Гарантирование точности управления*. Москва: Наука. Физматлит; 1998.

References

1. Dick A.M., Kashkarov A.V., Makaterchik A.V. [*Radio stations small and medium*]. Minsk: BSUIR; 2014: 108. (In Russ)
2. Dubovik I.A., Boykachev P.V., Isaev V.O., Dmitrenko A.A. [Methods for synthesis of matching circuits for broadband radio devices with unstable load impedance]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(1):61-69. (In Russ.)
3. Boykachev P.V., Dubovik I.A., Isaev V.O. [Results of the study of the influence of operating conditions on the impedance of antenna devices of VHF/UHF radio stations]. *Vestnik VoЕННОj akademii Respubliki Belarus'*. 2019;2:32-40. (In Russ)
4. Trival antene. Datasheet AD-44/CW-TA-30-512. Slovenia; 2019.
5. Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512. Slovenia; 2019.
6. Gekher K., ed.: Khotuntseva Yu.L. [*Theory of sensitivity and tolerances of electronic circuits*]. Moscow: Sov. Radio; 1973. (In Russ)
7. Dubovik I.A., Boykachev P.V., Isaev V.O. [Complex criterion for the algorithm of broadband devices based on the sensitivity invariant]. *Information radio systems and radio technologies 2020*; Minsk: BSUIR, 2020: 41-44. (In Russ)
8. Yarman B.S. *Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks*. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
9. Guide to MWO: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA; 2018.
10. Lanne A.A. [*Optimal synthesis of linear electric circuits*]. Moscow: Svyaz'; 1969. (In Russ)
11. Nebylov A.V. [*Control accuracy assurance*]. Moscow: Nauka. Fizmatlit; 1998. (In Russ)

Вклад авторов

Дубовик И.А. разработал методику синтеза, синтезировал и реализовал широкополосное согласующее устройство для антенного устройства AD-44/CW-TA-30-512.

Бойкачев П.В. принял участие в обработке и интерпретации полученных результатов.

Authors' contribution

Dubovik I.A. developed a synthesis technique, synthesized and implemented a broadband matching device for the AD-44 / CW-TA-30-512 antenna device.

Boykachev P.V. took part in the processing and interpretation of the results.

Сведения об авторах

Дубовик И.А., м.т.н., адъюнкт Военной академии Республики Беларусь.

Бойкачев П.В., к.т.н., доцент, начальник цикла кафедры автоматизации, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Dubovik I.A., M.Sc, Adjunct of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Boykachev P.V., PhD., Associate Professor, Head of the Cycle of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375-17-287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Дубовик Илья Андреевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Independence Ave. 220,
Military Academy of the Republic of Belarus;
tel. +375-17- 287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Dubovik Ilya Andreevich