

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>

УДК 621.372.512

МЕТОД СИНТЕЗА ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСТРОЙСТВ С ОПТИМАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОЩНОСТИ, СОГЛАСУЮЩИХ ИЗМЕНЯЮЩИЙСЯ ВО ВРЕМЕНИ ИМПЕДАНС НАГРУЗКИ

П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик, В. О. Исаев

Военная академия Республики Беларусь,
220057, Минск, пр-т. Независимости, 220

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2021 г.

Аннотация. Предложен метод синтеза широкополосных согласующих устройств, адаптирующих радиотехнические системы к изменяющемуся импедансу нагрузки в широком спектре естественных условий их эксплуатации. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния условий эксплуатации на импеданс антенн радиосвязи VHF и UHF диапазона, имеющих в своем составе согласующие устройства. Получен инвариант чувствительности функции коэффициента отражения к изменениям импеданса нагрузки, на основе которого разработан комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств. Синтезирована широкополосная согласующая цепь для антенного устройства AD-44/CW-TA-30-512, обеспечивающая выигрыш в потенциально достижимой дальности радиолинии до 5 % по отношению к штатному согласующему устройству. Разработана аналитическая математическая модель устройства широкополосного согласования и на основе ее синтезировано согласующее устройство адаптивное к изменяющемуся импедансу антенны AD-25/CW-3512, обеспечивающее усредненный выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии от 2 % до 15 % в рамках представленных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: широкополосное согласование, инвариант,

чувствительность, импеданс, методика синтеза.

Abstract. A method is proposed for the synthesis of broadband matching devices that adapt radio engineering systems to the changing load impedance in a wide range of natural conditions of their operation. The results of experimental studies of the effect of operating conditions on the impedance of VHF and UHF radio antennas with matching devices are presented. An invariant of the sensitivity of the reflection coefficient function to changes in the load impedance is obtained, on the basis of which a complex criterion for the synthesis of broadband matching devices is developed. A broadband matching circuit was synthesized for the AD-44/CW-TA-30-512 antenna device, which provides a gain in the potentially achievable radio line range of up to 5% in relation to the standard matching device. An analytical mathematical model of a broadband matching device is developed and based on it, a matching device adaptive to the changing impedance of the AD-25/CW-3512 antenna is synthesized, providing an average gain in the potentially achievable range of the radio line from 2% to 15% in the framework of the presented experimental studies.

Key words: broadband matching, invariant, sensitivity, impedance, synthesis technique.

Введение

Проектирование высокочастотных приемо-передающих трактов с оптимальными частотными характеристиками, несомненно, является одной из важнейших радиотехнических задач, значимость которой возрастает в связи с освоением новых диапазонов частот и использованием в современных системах радиолокации, радионавигации, телевидения и мобильной связи сигналов со сложной структурой. В системах радиосвязи, обладающих исключительно большим значением практически во всех сферах жизнедеятельности человека, часто используются радиостанции VHF/UHF диапазонов, позволяющие функционировать в широком спектре частот (30–3000 МГц) в различных условиях эксплуатации [1, с. 5–8]. В тоже время следует заметить, что изменение условий эксплуатации приводит к изменению импеданса антенного

устройства (АУ) и соответственно к изменению уровня передачи мощности между приемо-передающими модулями (ППМ) и антенной [2]. Это уменьшает потенциальные возможности радиостанций, в том числе потенциально достижимую дальность радиолинии [3]. Таким образом, актуальной является задача разработки устройств, позволяющих решить задачу обеспечения оптимальной работы радиотехнических систем (РТС) связи в различных условиях их эксплуатации.

1. Постановка задачи

Практический интерес представляют радиостанции, работающие в VHF/UHF диапазонах частот, стоящие на обеспечении различных подразделений силовых структур, министерства здравоохранения и министерства по чрезвычайным ситуациям. В качестве примера рассмотрим радиостанции Р-180 и Р-181. Внешний вид радиостанций представлен на рисунке 1.

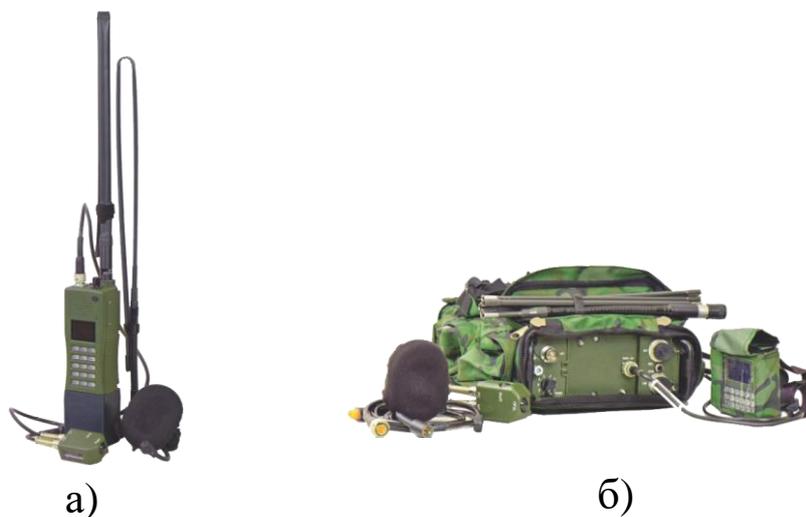


Рис.1. Радиостанции VHF/UHF диапазона частот: а) Р-180, б) Р-181.

В качестве АУ в рассматриваемых радиостанциях используются АУ AD-44/CW-TA-30-512 (Р-180) и AD-25/CW-3512 (Р-181) (рисунок 2), гарантирующие работу радиостанций в диапазоне частот от 30 до 512 МГц и согласованные на линию с сопротивлением 50 Ом [3, 4].

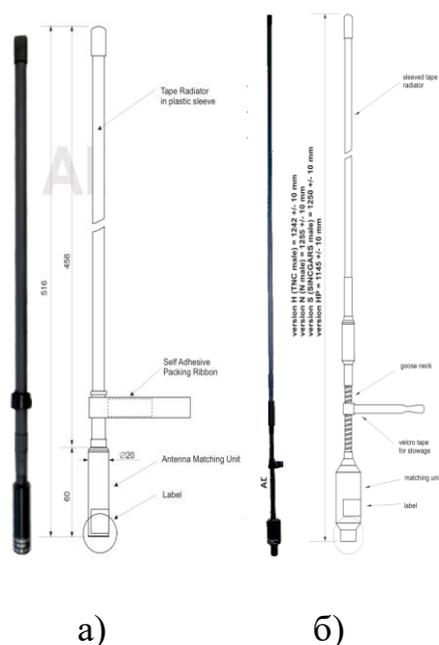
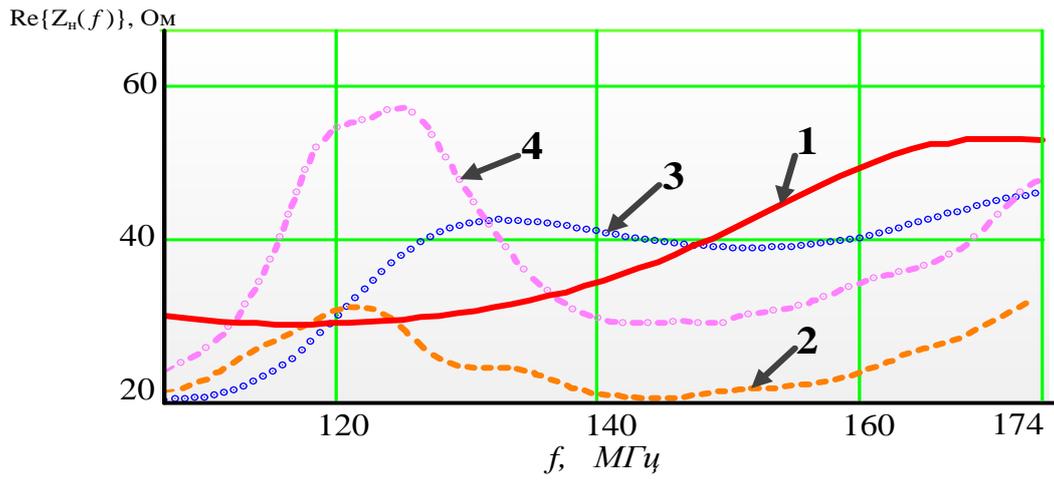


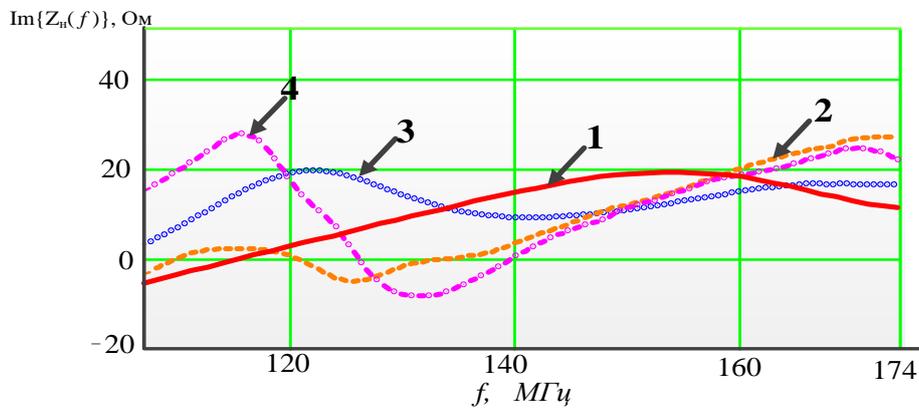
Рис.2. Антенные устройства: а) AD-44/CW-TA-30-512, б) AD-25/CW-3512.

Радиостанции обеспечивают обмен информацией в различных условиях их эксплуатации [5, с. 41–42], что приводит к возникновению возмущающих воздействий на АУ. В связи с этим проведено экспериментальное исследование по оценке влияния изменений условий эксплуатации радиостанций на импедансные характеристики АУ [2]. Эксперимент проводился в различных условиях эксплуатации: в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой, а также в безэховой камере для получения эталонных значений комплексного сопротивления рассматриваемых АУ. В результате экспериментальных исследований было выявлено следующее:

1. Изменение условий эксплуатации приводит к изменению импеданса АУ относительно эталонного значения. Значительное изменение активной составляющей импеданса АУ AD-44/CW-TA-30-512 наблюдается в помещении, а в непосредственной близости с техникой - на реактивную составляющую (рисунок 3). Для антенны AD-25/CW-3512 значительное изменение как активной, так и реактивной составляющей наблюдается в помещении (рисунок 4).

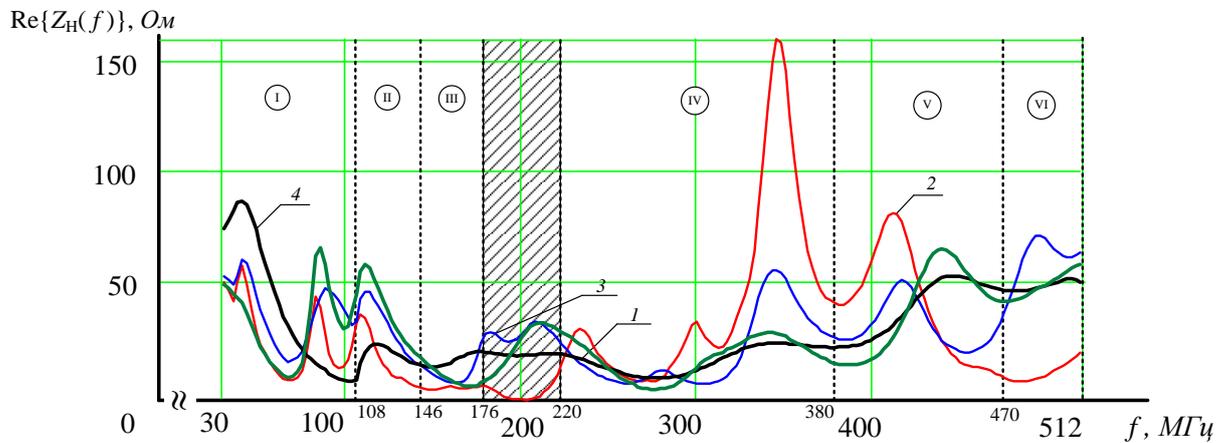


а)

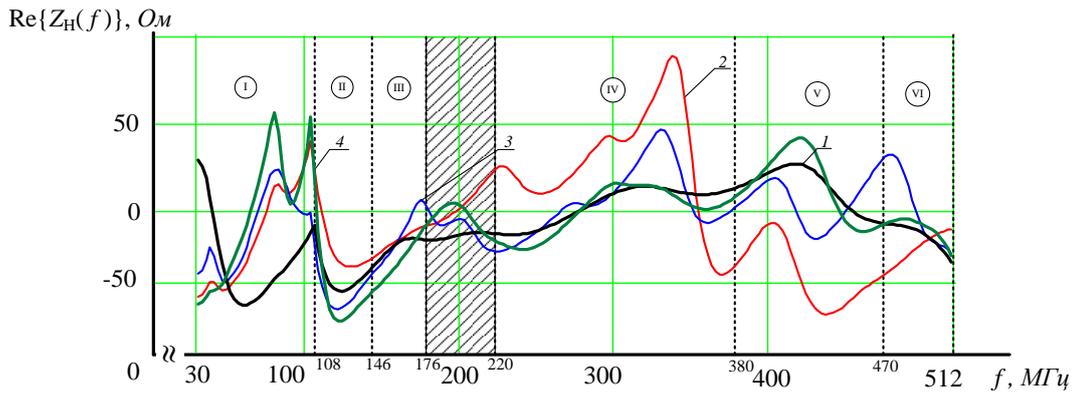


б)

Рис.3. Зависимость изменения активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны AD-44/CW-TA-30-512 в рабочей полосе частот:
 1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении;
 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой.



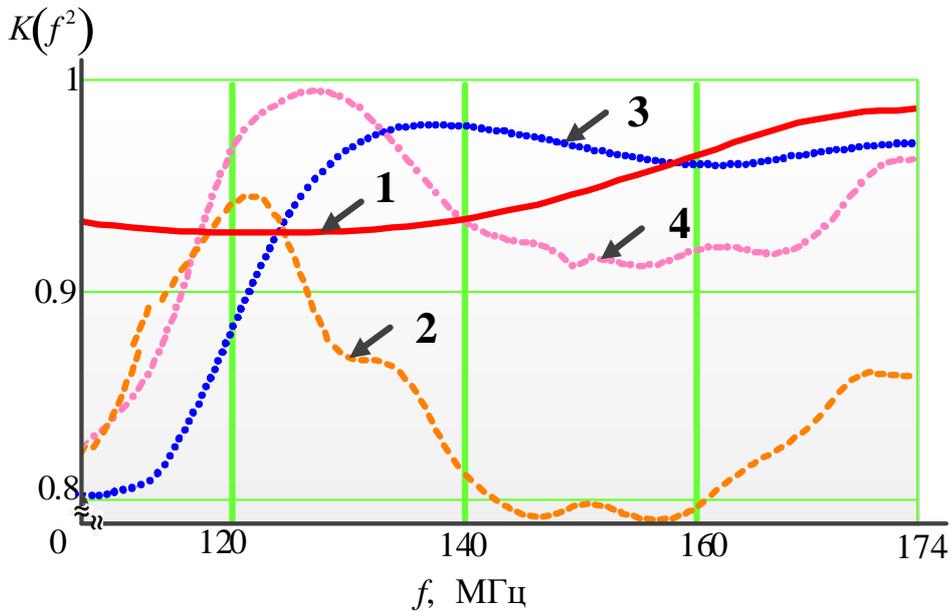
а)



б)

Рис.4. – Зависимость изменения активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны AD-25/CW-3512 в рабочей полосе частот:
 1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении;
 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой.

2. Существенное изменение импеданса рассматриваемых АУ (для АУ AD-44/CW-ТА-30-512 при $f = 140\text{--}160$ МГц, для АУ AD-25/CW-3512 при $f = 310\text{--}360; 420\text{--}500$ МГц) приводит к изменению функции коэффициента передачи мощности (КПМ) (рисунок 5).



а)

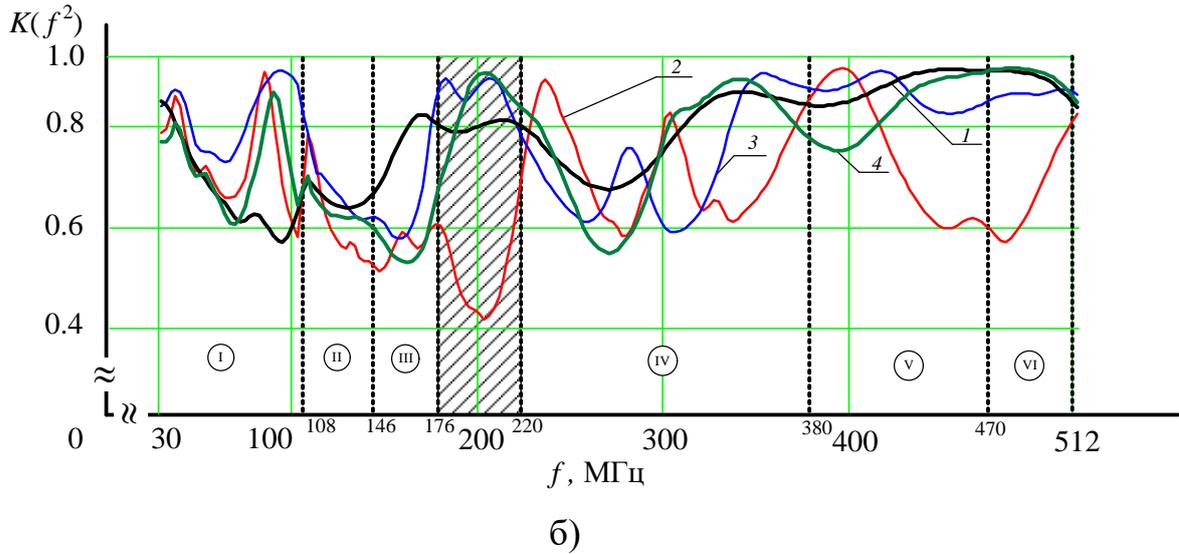


Рис.4. – Зависимость КПМ антенны AD-44/CW-ТА-30-512 (а) и антенны AD-25/CW-3512 (б):

1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении; 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой.

Исходя из результатов экспериментальных исследований, целесообразно оценить, как будут изменяться технические характеристики радиостанций в рассматриваемых условиях их эксплуатации. Оценим данные вариации импеданса на примере потенциально достижимой дальности радиолинии [6], которая определяется

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{\Delta f (4\pi)^2 N_a}}, \quad (1)$$

где P_t – мощность передатчика; G_t – коэффициент направленного действия антенны передатчика; G_r – коэффициент направленного действия антенны приемника; λ – длина волны; Δf – ширина спектра сигнала; N_a – спектральная плотность мощности сигнала.

Из выражения (1) следует, что изменение КПМ (рисунок 5) приводит к уменьшению потенциально достижимой дальности радиолинии на 16...22%, а наличие штатной ШСУ, которое имеется в составе рассматриваемых АУ, не позволяет компенсировать вариации импеданса АУ. В связи с этим для

компенсации импеданса АУ и обеспечение максимального уровня КПМ в различных условиях эксплуатации радиостанций необходимо синтезировать ШСУ, которое способно обеспечить инвариант чувствительности к изменению характеристик нагрузки в рабочем диапазоне частот.

2. Методика синтеза широкополосных согласующих устройств на основе аппарата инварианта чувствительности

Для синтеза ШСУ, позволяющего обеспечить уровень КПМ не хуже требуемого, при наличии изменяющегося импеданса нагрузки в первую очередь необходимо оценить степень влияния вариации импеданса нагрузки на уровень КПМ. Представим комплексное сопротивление нагрузки $Z_H(f)$ в качестве ряда параметров $\{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$), от которого зависит некоторая функция $D(x_i)$, описывающая частотную характеристику ШСУ (КПМ, групповое время запаздывания и др.). Отклонение функции от номинального значения $\Delta D = D(x_i + \Delta x_i) - D(x_i)$, вызванное изменением параметра $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_M$, определяется соответствующим разложением в ряд Тейлора [7, с. 14–15]. Для линеаризованного случая (пренебрегая производными второго и более высоких порядков) разложение имеет вид

$$\Delta D = \sum_{i=1}^N S_{x_i}^D \Delta x_i, \quad (2)$$

где $S_{x_i}^D = S\{D(x_i), x_i\} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}$ – чувствительность функции $D(x)$ к изменению параметров x_i ; N – количество параметров x_i ; ΔD – отклонение функции.

Выражение (2) используется для описания влияния малых отклонений, и оно основано на математическом анализе [7, с. 16]. Особый интерес в данном выражении представляет чувствительность характеристики ШСУ, так как уменьшение значения данного параметра приводит к уменьшению отклонения характеристики ШСУ, а при ее фиксированном (допустимом) значении

увеличивает отклонение Δx_i , при котором сохраняются требуемые значения характеристики ШСУ.

Под чувствительностью (абсолютной чувствительностью) понимают меру изменения некоторой характеристики ШСУ (функции цепи), которая произошла в результате некоторого изменения одного или нескольких элементов ШСУ [8]. Кроме абсолютной чувствительности, используют полуотносительную (выражение 3) и относительную чувствительность (выражение 4)

$$Q_{x_i}^D = Q\{D(x_i), x_i\} = \frac{\partial D(x_i)}{\partial \ln x_i} = x_i \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}; \quad (3)$$

$$R_{x_i}^D = R\{D(x_i), x_i\} = \frac{\partial \ln D(x_i)}{\partial \ln x_i} = \frac{x_i}{D(x_i)} \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Непосредственным дифференцированием выражения (4) можно убедиться, что вещественная и мнимая части относительной чувствительности комплексной характеристики связаны с чувствительностями ее модуля и аргумента простыми соотношениями (выражение 5 и 6)

$$R_{x_i}^D = \operatorname{Re}\left[R\{D(x_i), x_i\}\right] = R\{|D(x_i)|, x_i\}; \quad (5)$$

$$R_{x_i}^D = \operatorname{Im}\left[R\{D(x_i), x_i\}\right] = Q\{\arg D(x_i), x_i\}. \quad (6)$$

Функция КПМ определяется как отношение мощности в нагрузке к максимальной мощности, которая может быть получена генератором или же, исходя из [9, с. 8], через модуль функции коэффициента отражения.

$$K(f^2) = \frac{P_H}{P_0} = 1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{CC})|^2, \quad (7)$$

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

(коэффициент рассогласования); $Z_H(f)$ – комплексное сопротивление нагрузки; $Z_{CC}(f)$ – комплексное сопротивление согласующей цепи.

Выражение (7) является четной вещественной функцией, а сопротивление нагрузки является комплексной величиной, и при изменении импеданса меняется как реальная, так и мнимая составляющие сопротивления (рисунок 2, 3). В связи с этим предлагается оценивать чувствительность функции коэффициента отражения к изменению импеданса нагрузки. Функция коэффициента отражения является комплексной величиной и позволяет в полной мере оценить изменение как реальной, так и мнимой составляющей комплексного сопротивления нагрузки. Таким образом, для обеспечения требуемого уровня КПМ при наличии варьирования импеданса нагрузки необходимо, чтобы синтезируемое ШСУ обладало свойством минимальной чувствительности функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки.

Для того, чтобы ШСУ обладало свойством минимальной чувствительности функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки (исходя из [7, с. 51]) необходимо минимизировать квадрат модуля относительной чувствительности.

$$\left| R\{S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ})\} \right|^2 \rightarrow \min.$$

Для нахождения относительной чувствительности функции коэффициента отражения воспользуемся инвариантным свойством чувствительности. Оно показывает соответствующие соотношения, связывающие функцию чувствительности по различным параметрам типовых функций цепей [7, с. 41]. Это позволит избавиться от дифференцирования функции коэффициента отражения. Проведя некоторые преобразования, получаем квадрат модуля относительной чувствительности функции коэффициента отражения.

$$\left| R\{S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ})\} \right|^2 = \left| \frac{2 \operatorname{Re}\{Z_{CЦ}(f)\} Z_H(f)}{(Z_H(f) + Z_{CЦ}(f))(Z_H(f) - Z_{CЦ}(-f))} \right|^2. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет оценить потенциальные возможности синтезируемой ШСУ к изменению импеданса нагрузки на фиксированной частоте. Для того, чтобы оценить возможности ШСУ в диапазоне частот $f_H \leq f \leq f_B$ необходимо проинтегрировать выражение 8 по частоте. В результате чего получим

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \} \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{2 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ}(f) \} Z_H(f)}{(Z_H(f) + Z_{ЦЦ}(f))(Z_H(f) - Z_{ЦЦ}(-f))} \right|^2 df, \quad (9)$$

где f_H, f_B – нижняя и верхняя границы рабочего диапазона частот соответственно.

Так как основной задачей синтеза ШСУ является обеспечение требуемого уровня КПМ (выражение 7), то достаточно оценить лишь чувствительность модуля функции коэффициента отражения. В этом случае (исходя из выражения 2) выражение (9) принимает вид

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left[R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \} \right] \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{\left(1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2\right)^2 \left(|Z_H(f)|^2 - |Z_{ЦЦ}(f)|^2\right)}{|S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 8 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ}(f) \} \operatorname{Re} \{ Z_H(f) \}} \right|^2 df$$

Таким образом, для обеспечения требуемого уровня КПМ и минимальной чувствительности функции коэффициента отражения необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} \int_{f_B}^{f_H} \left(K_{\text{треб}} - \left(1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2\right) \right)^2 df \leq \varepsilon \\ \int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \} \right\} \right|^2 df \rightarrow \min \end{cases}, \quad (10)$$

где ε – допустимое отклонение уровня КПМ в рабочем диапазоне частот;

$K_{\text{треб}}$ – требуемый уровень КПМ.

Систему уравнений можно использовать в качестве целевой функции (комплексного критерия) в сочетании с одним из существующих численных

методов синтеза ШСУ. В качестве метода синтеза ШСУ (исходя из [10]) предлагается использовать метод вещественных частот [11]. Данный метод основан на сочетании аналитического и численного подходов решения задачи синтеза ШСУ. Основное преимущество данного метода заключается в том, что он не требует аппроксимации импеданса нагрузки, а также в том, что функция КПМ представляется в виде аналитического выражения, при этом ШСУ синтезируется с помощью итеративных подходов поиска вещественной составляющей функции сопротивления ШСУ.

$$R_{\text{ЦЦ}}(f^2) = \frac{A(f^2)}{B(f^2)} = \frac{a_0 2\pi f^{ndc} \prod_{i=1}^{nz} (2\pi f_i^2 - 2\pi f^2)^2}{B_1 2\pi f^{2n} + B_2 2\pi f^{2(n-1)} + \dots + B_n 2\pi f^2 + 1} \geq 0, \forall f,$$

где $R_{\text{ЦЦ}}(f^2)$ – вещественная составляющая функции сопротивления согласующей цепи; ndc – количество нулей передачи на нулевой частоте; nz – количество нулей на фиксированных частотах; f_i – ноль передачи на фиксированной частоте; B_i – коэффициенты полинома знаменателя; n – порядок полинома; a_0 – нулевой коэффициент полинома знаменателя.

Алгоритм работы метода вещественных частот на основе комплексного критерия (выражение 10) представлен на рисунке 6.

Работа алгоритма заключается в нахождении вещественной составляющей функции сопротивления ШСУ, которая обеспечивает выполнение комплексного критерия (выражение 9). Достоинство данного подхода заключается в отсутствии дифференцирования функции коэффициента отражения для поиска значения чувствительности. Достаточно лишь знать значение импеданса АУ на дискретном ряде частот, чтобы синтезировать ШСУ, обладающее минимальной чувствительностью к изменению импеданса нагрузки.

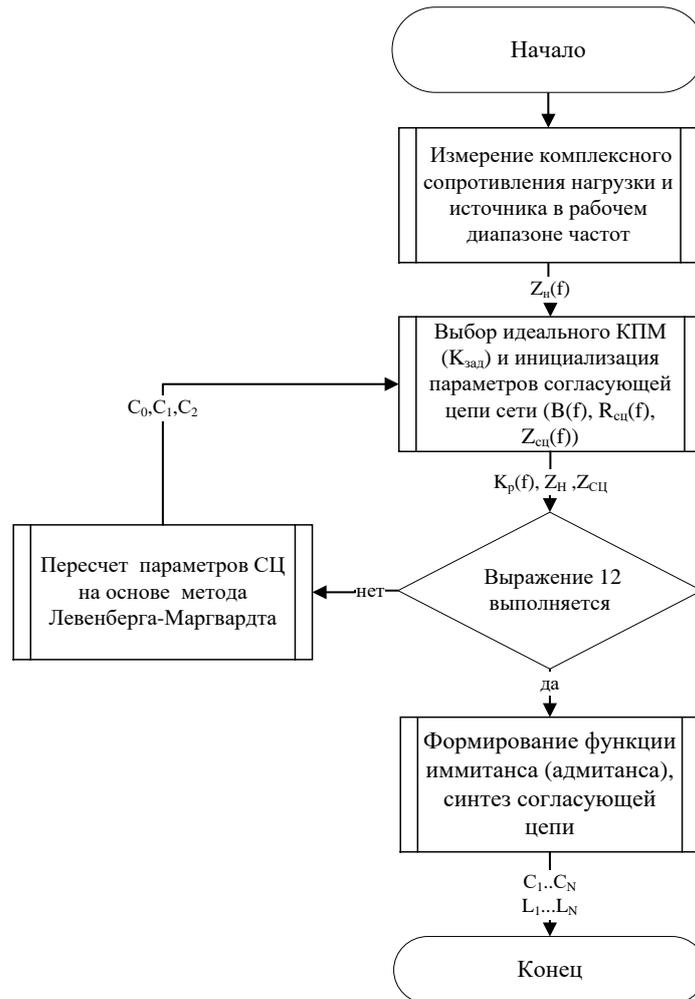


Рис.6. Алгоритм работы метода вещественных частот на основе комплексного критерия.

3. Синтез малочувствительного СУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512 радиостанции Р-180

Для проверки работоспособности алгоритма была синтезирована широкополосная согласующая цепь (ШСЦ), обеспечивающая максимальный уровень КПП в различных условиях обстановки (в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой), для АУ AD-44/CW-TA-30-512 (Р-180) в рабочей полосе частот ($\Delta f = 108\text{--}146$ МГц) с допустимым отклонением уровня $\varepsilon = 0,01$ (10 % от максимального значения функции КПП). Моделирование было проведено в AWR Microwave Studio 14 [12]. Схема ШСУ представлена на рисунке 7, элементы которого приведены под ряд номиналов E24.

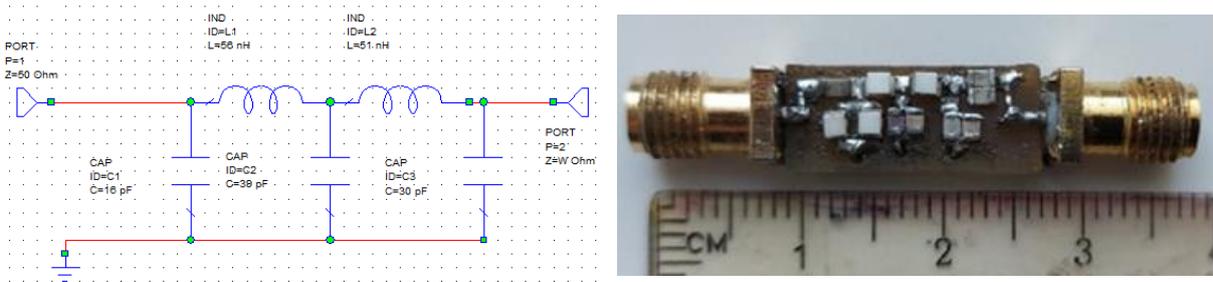


Рис.7. Схема ШСУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512 (P-180).

Итоговая зависимость КПМ от частоты для различных условий обстановки представлена на рисунке 8. На данном рисунке прерывистыми линиями показаны КПМ АУ с синтезированным ШСУ, а сплошными линиями со штатным ШСУ в различных условиях обстановки.

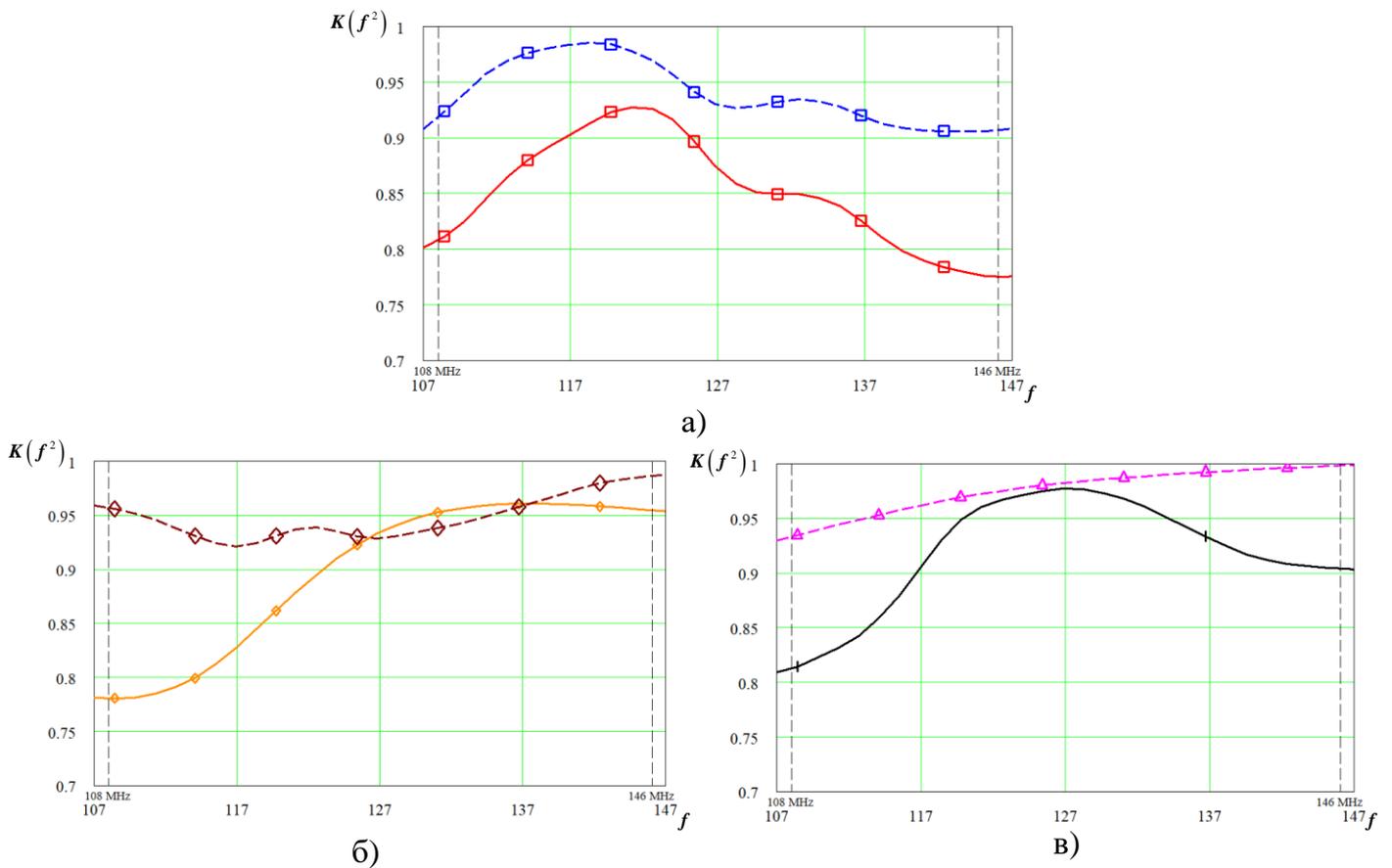


Рис.8. Зависимость КПМ от частоты АУ AD-44/CW-TA-30-512 (P-180):
 а) в помещении; б) в непосредственной близости с техникой;
 в) в лесном массиве.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что синтезированное ШСУ обеспечивает более высокое значение уровня КПМ АУ

при нахождении АУ в различных условиях обстановки. Рассмотрим потери в уровне КПМ и в дальности радиосвязи для наихудшего случая (расположении АУ в помещении). Потери уровня КПМ относительно максимального значения (исходя из [13, с. 44]) составляют 6,0%, а в дальности радиосвязи (выражение 1) – 3% при расположении АУ в помещении. При сравнении с ранее полученными результатами (потери уровня КПМ – 15%; потери в дальности – 8%) синтезированное ШСУ обеспечивает выигрыш в дальности радиосвязи (1) для радиостанции Р-180 по сравнению со штатной ШСУ до 5% (в рамках представленных экспериментальных исследований).

Следовательно, использование в качестве критерия выражение (10) совместно с методом вещественных частот, позволило повысить уровень КПМ, а также минимизировать влияние изменения импеданса нагрузки на результирующий КПМ, что наглядно продемонстрировано в полученных результатах (рисунок 8). Следует обратить особое внимание, что возможности по сохранению требуемого уровня КПМ в условиях изменения импеданса нагрузки не могут быть безграничными. Если допустимый класс изменения импеданса нагрузки слишком велик, то одна и та же синтезированная СЦ не сможет функционировать во всех возможных ситуациях, какими бы динамическими свойствами она не обладала [14, с. 15–16]. В этом можно убедиться исходя из выражения (2) и значений импеданса нагрузки АУ радиостанции Р-181, 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.

Таким образом, целесообразно разработать СУ для АУ радиостанции Р-181 адаптивное к изменению импеданса нагрузки и обеспечивающее требуемый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации, в рабочем диапазоне частот.

4. Математическая модель согласующего устройства адаптивного к изменению импеданса нагрузки

Под адаптивным устройством согласования комплексной нагрузки с радиотехническим устройством понимают систему с отрицательной обратной связью (рисунок 9), анализирующую качество согласования и подстраивающую свои элементы в сторону улучшения согласования [15].

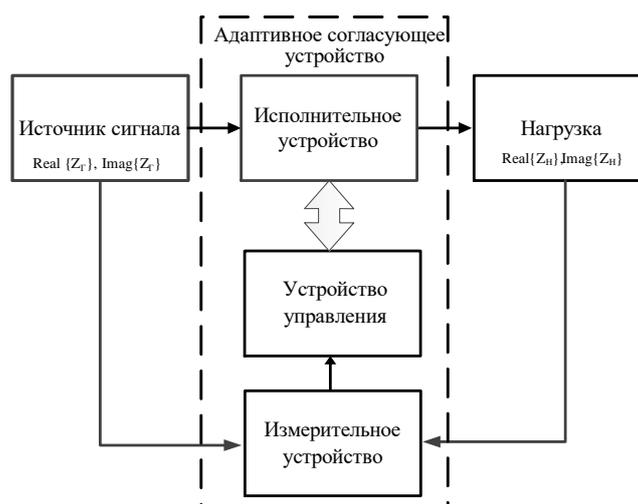


Рис.9. Структурная схема адаптивного согласующего устройства.

Адаптивное устройство согласования включает в себя (рисунок 9):

- измерительное устройство, предназначенное для измерения входных (выходных) параметров нагрузки (импедансные характеристики);
- управляющее устройство, преобразующее по определенному алгоритму информацию с измерительного устройства и формирующее команды исполнительному устройству;
- исполнительное устройство, предназначенное для изменения величин элементов согласующей цепи по команде управляющего устройства.

Из [16, с 138] следует, что для синтеза адаптивной системы необходимо выбрать, на основании заданных технических требований к качеству работы системы, критерии оптимальности. Так как основное предназначение системы является обеспечение требуемого уровня передачи мощности при наличии изменяющегося импеданса нагрузки, то необходимо определить оптимальное значение параметров ШСУ, при котором суммарная среднеквадратичная

ошибка уровня КПМ по отношению к требуемому значению будет минимальна [16, с. 136]. В разделе 2 настоящей работы было установлено, что для обеспечения требуемого уровня передачи мощности при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо, чтобы синтезируемое СУ обладало свойством минимальной чувствительности [7, с. 51] функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки. В виду того, что импеданс нагрузки будет рассматриваться как измеренное значение реальной ($\text{Re}\{Z_H(f)\}$) и мнимой части ($\text{Im}\{Z_H(f)\}$) комплексного сопротивления на дискретном ряде частот, расчет функции чувствительности предлагается выполнять с помощью статистического метода анализа [7]. Этот метод применим к случайным величинам, в частности к отклонениям параметров нагрузки от номинального значения внутри поля допусков [17, с. 156]. Знание функции чувствительности, характеризующей степень влияния элементов на характеристики схемы, позволяет с определенной вероятностью [17, с. 157] найти среднеквадратичное отклонение (СКО) модуля функции коэффициента отражения, рассчитанного по формуле:

$$\sigma_{|S_{in}|}^2 = \left| S_{Z_H}^{S_{in}} \right|^2 \sigma_{Z_H}^2 \left(\frac{\Delta Z_H}{Z_H} \right)^2,$$

где $\sigma_{Z_H}^2 \left(\frac{\Delta Z_H}{Z_H} \right)$ – СКО импеданса нагрузки; ΔZ_H – допустимое отклонение импеданса нагрузки; $S_{Z_H}^{S_{in}}$ – чувствительности модуля функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки [18].

Однако кроме изменения импеданса нагрузки необходимо еще и рассматривать влияние отклонения параметров ШСУ от заданного значения, так как для проектирования СУ применяются схемные элементы, номиналы которых в процессе эксплуатации могут изменяться [17, с. 146-147]. Таким образом, полагая, что отклонение импеданса нагрузки и элементов согласующего устройства, в силу «Центральной предельной теоремы» [19], подчиняется нормальному закону распределения, то дисперсию относительного

изменения модуля функции коэффициента отражения можно определить с помощью выражения:

$$\sigma_K(f)^2 = \left| S_{Z_H}^{S_{in}}(f) \right|^2 \sigma_{Z_H}^2 + \sum_{i=0}^{N_C} \left| S_{C_i}^{S_{in}}(f) \right|^2 \sigma_{C_i}^2 + \sum_{i=0}^{N_L} \left| S_{L_i}^{S_{in}}(f) \right|^2 \sigma_{L_i}^2, \quad (11)$$

где $\sigma_{Z_H}^2 = \left(\sigma^2 \{ \text{Re}[Z_{изм}] \} + \sigma^2 [\text{Re}\{Z_H(f_i)\}] \right) + j \left(\sigma^2 [\text{Im}\{Z_{изм}\}] + \sigma^2 [\text{Im}\{Z_H(f_i)\}] \right)$ – дисперсия реальной и мнимой составляющих функции сопротивления нагрузки с учетом погрешности измерителя ($\sigma^2 \{ \text{Re}[Z_{изм}] \}, \sigma^2 \{ \text{Im}[Z_{изм}] \}$);

$S_{C_i}^{S_{in}}(f), S_{L_i}^{S_{in}}(f)$ – чувствительность модуля функции коэффициента отражения к изменению индуктивности, емкости согласующей цепи;

σ_C, σ_L – СКО номиналов элементов цепи (E24 { $\pm 5\%$ }, E48 { $\pm 2\%$ } и т.д.).

Для того, чтобы обеспечить наименьшее влияние изменения импеданса нагрузки и элементов цепи необходимо, чтобы выражение (11) было минимизировано, ограничиваясь при этом номиналами элементов цепи, находящихся в магазине элементов исполнительного устройства. Таким образом, критерий оптимальности, может быть представлен следующим выражением:

$$\begin{cases} \left\{ K(f)_{\text{треб}} - [K(f^2) - \sigma_K(f)] \right\}^2 \leq, \varepsilon f_H \leq f \leq f_B; \\ \sigma_K(f)^2 \rightarrow \min f_H \leq f \leq f_B; \\ C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max}; \\ L_{\min} \leq L_i \leq L_{\max}, \end{cases} \quad (12)$$

где в качестве задаваемых параметров используется допустимое отклонение уровня КПМ ε от требуемого значения.

Использование выражения (12) в качестве целевой функции позволяет уменьшить степень влияния изменения импеданса нагрузки и номиналов элементов СУ, в результате чего повышается эффективность работы радиотехнических устройств в различных условиях эксплуатации. В дополнении к этому учет отклонения импеданса нагрузки позволит находить

параметры согласующего устройства, обеспечивающие меньшее количество переключений (коммутаций) магазина элементов, что увеличит время наработки на отказ и надежность радиотехнического устройства. Структура адаптивного согласующего устройства (исполнительного устройства) может быть найдена с помощью методики синтеза, представленной в [18].

Таким образом, на основании полученных результатов и результатов, представленных в [2,10,18,20,21] была разработана математическая модель адаптивного согласующего устройства, алгоритм расчета параметров которой представлен на рисунке 10.

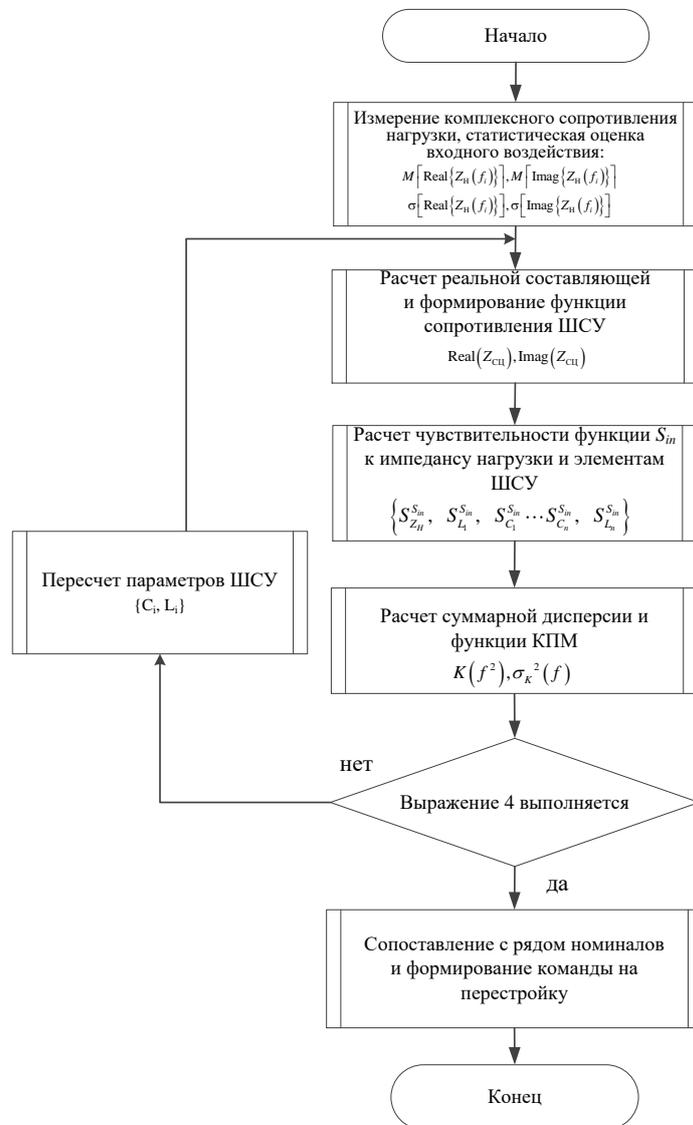


Рис.10. Алгоритм расчета параметров математической модели адаптивного согласующего устройства.

Суть алгоритма заключается в нахождении ШСУ, которое обеспечивает выполнение критерия оптимальности (выражение 12), ограничиваясь при этом допустимым магазином элементов. Достоинство математической модели заключается в предварительном расчете параметров ШСУ, значение которых обеспечивает требуемый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации радиотехнических устройств и не осуществляет поиск значения параметров методом перебора. Еще одно немаловажное достоинство математической модели – способность системы согласовывать нагрузку с радиотехническим устройством не во всей полосе частот, а только в той, где станция работает в текущий момент времени. Это позволяет уменьшить полосу согласования и применять ШСУ более эффективно.

На основании разработанной математической модели был разработан специализированный экспериментальный комплекс расчета и контроля функционирования согласующих устройств в РТС (рисунок 11), состоящий из измерительного устройства, устройства управления (программно-имитационная модель) и средства индикации.



Рис.11. Специализированный экспериментальный комплекс расчета и контроля функционирования согласующих устройств в РТС.

Экспериментальный комплекс позволяет контролировать изменение уровня передачи мощности между трактами РТС, вызванных разбросом значений номиналов элементов цепи и вариаций импеданса нагрузки, а также

рассчитывать параметры согласующего устройства по заданному критерию, что обеспечивает устойчивую работу РТС в условиях изменяющегося импеданса нагрузки.

5. Синтез СУ для АУ AD-25/CW-3512 радиостанции Р-181, адаптивного к изменяющемуся импедансу нагрузки

На основании поставленной задачи с помощью предложенной математической модели было разработано адаптивное СУ для АУ радиостанции Р-181. Электрическая схема исполнительного устройства адаптивного ШСУ, состоящая из шести реактивных элементов, представлена на рисунке 12.

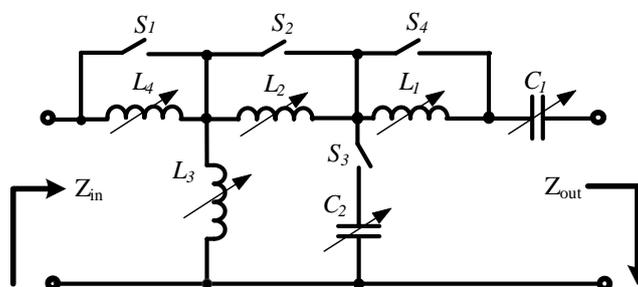


Рис.12. Электрическая схема исполнительного устройства адаптивного ШСУ.

Параметры исполнительного устройства, значения которых приведены под ряд номиналов E24, для рабочих диапазонов частот радиостанции Р-181 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исполнительного устройства адаптивного ШСУ

Элементы	Диапазоны частот											
	I (30-108 МГц)		II (108-146 МГц)		III (146-174 МГц)		IV (220-380 МГц)		V (380-470 МГц)		VI (470-512 МГц)	
C ₁ ,pФ	200	200	62	26	29	12	95	9.5	15.6	6		
L ₁ , нГн	18,6	66	4	–	–	–	–	–	–	–	3.5	
L ₂ , нГн	26,21	–	–	–	–	11	–	7,5	–	–	–	
L ₃ , нГн	300	35	52	21	33	24	121	130	29	65		
L ₄ , нГн	11,3	–	3	–	–	2	–	2,5	7	28		
C ₂ ,pФ	32	10	0	8	–	9	–	–	–	–		

« – » – элемент исключается из согласующей цепи

Следует отметить, что принципиальная схема, представленная на рисунке 12, может быть выполнена на реактивных элементах, реле или pin-диодах в SMD исполнении. Устройство управления может быть реализовано на ПЛИС или микроконтроллере, а измерительное устройство - в

виде радиочастотного измерительного моста (микропроцессора). Так, в качестве примера на рисунке 13 представлена 3D модель возможного варианта исполнения разработанного адаптивного согласующего устройства размерами ($52,5 \times 42,5 \times 2$ мм³), реализованная в среде моделирования радиотехнических устройств CST Studio [22]. Где в качестве реактивных элементов используются SMD элементы 0805 серии, в качестве измерительного устройства и устройства управления - микропроцессор (1) в корпусе QFP, а в качестве коммутирующих устройств - аналоговые мультиплексоры (2) в корпусе PDIP.

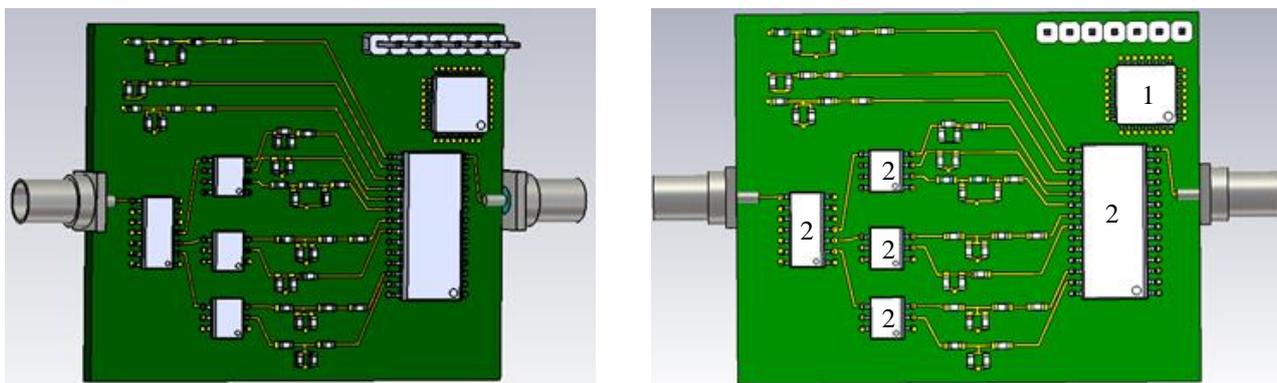
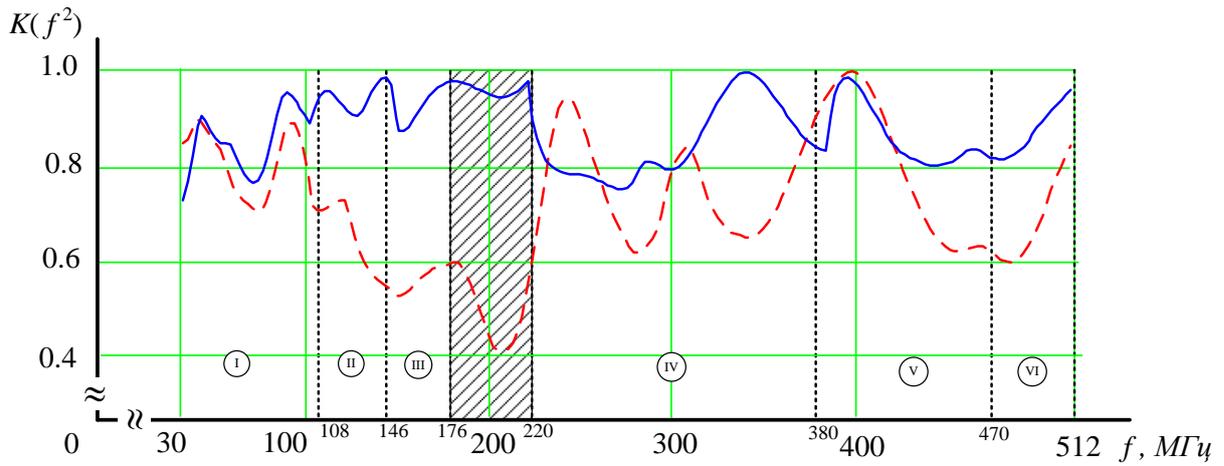


Рис.13. Пример 3D модели разработанного адаптивного согласующего устройства.

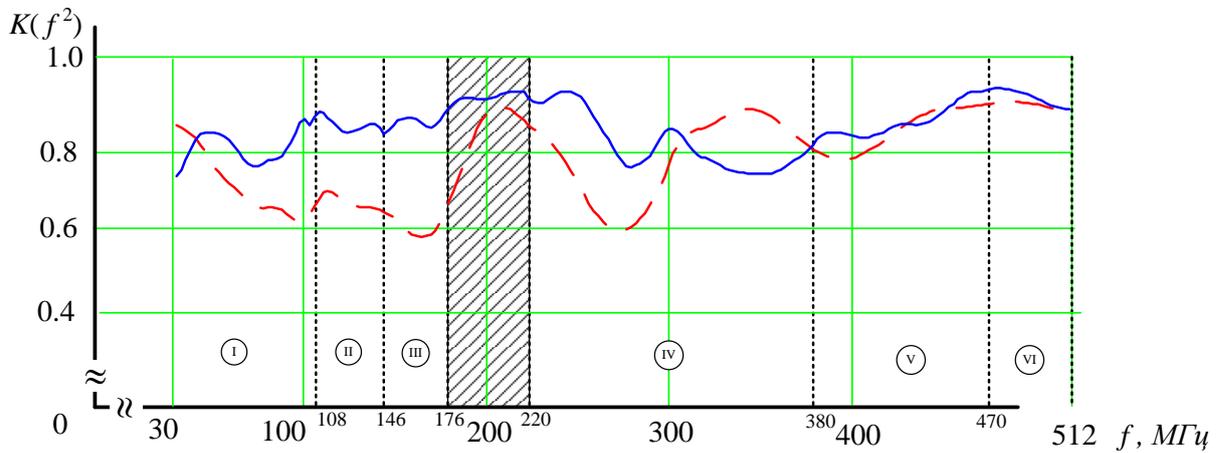
Моделирование синтезированного согласующего устройства проводилось в AWR Microwave Studio 14 [12]. Результаты моделирования представлены на рисунке 14 в виде зависимости КПМ от частоты для различных условий обстановки. Прерывистыми линиями показаны КПМ АУ без синтезированного адаптивного ШСУ, а сплошными линиями с синтезированным адаптивным ШСУ.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что синтезированное адаптивное ШСУ обеспечивает более высокий уровень передачи мощности при работе радиостанции в различных условиях обстановки. Так, при расположении АУ радиостанции в помещении (наихудший случай) потери уровня КПМ (исходя из [13, с. 36-38]) составляют 40 % (в III диапазоне) от максимального значения (20 % в потенциально достижимой дальности радиолинии [6, с. 215]), а при использовании адаптивной ШСУ - 9 % (5 % в потенциально достижимой дальности

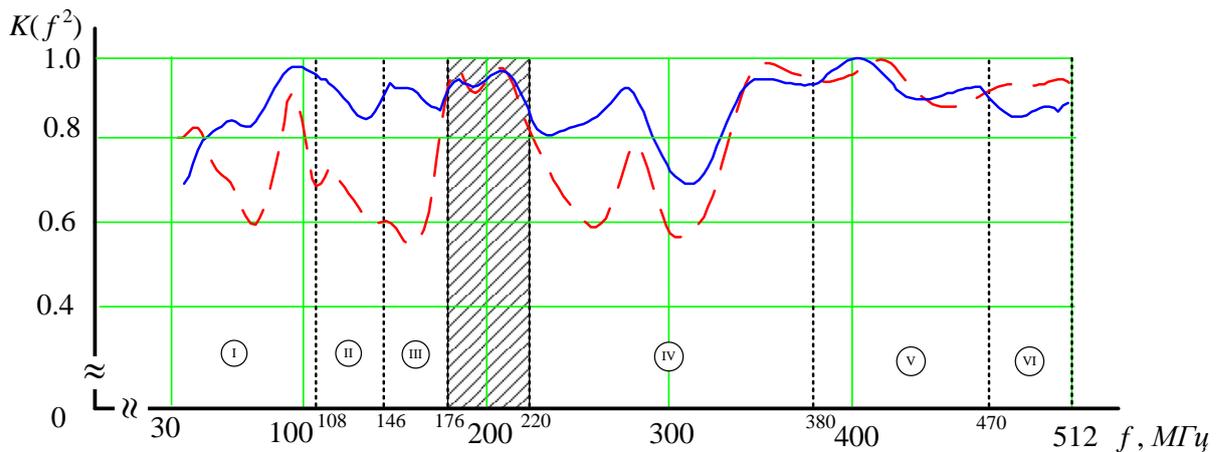
радиолинии).



а)



б)



в)

Рис.16. Зависимость КПМ от частоты АУ AD-44/CW-TA-30-512:
а) в помещении; б) в непосредственной близости с техникой;
в) в лесном массиве.

В таблице 2 представлены усредненные значения потерь в уровне передачи мощности ($\Delta K(f^2)$) и в дальности радиолинии (ΔR_{\max}) для различных диапазонов частот.

Таблица 2. Потери уровня передачи мощности и дальности радиолинии

Условия эксплуатации	Диапазоны частот											
	I (30-108 МГц)		II (108-146 МГц)		III (146-174 МГц)		IV (220-380 МГц)		V (380-470 МГц)		VI (470-512 МГц)	
	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}	$\Delta K(f^2)$	ΔR_{\max}
Без адаптивного ШСУ	21 %	11 %	31 %	17 %	36 %	20 %	19 %	10 %	11 %	6 %	12 %	6 %
С адаптивным ШСУ	16 %	9 %	10 %	5 %	10 %	5 %	13 %	7 %	8 %	4 %	8 %	4 %

Таким образом, синтезированное адаптивное ШСУ обеспечивает усредненный выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии [6, с. 215] для радиостанции Р-181 от 2 % до 15 % в рамках представленных экспериментальных исследований. Исходя из того, что потенциально достижимая дальность радиолинии для радиостанции Р-181 равна 15 000 м [23] выигрыш составляет 250 – 2300 м.

Заключение

Таким образом, для того, чтобы уровень КПМ сохранял требуемое значение в заданном диапазоне частот, необходимо, чтобы синтезированное ШСУ обладало свойством минимальной чувствительности функции коэффициента отражения к импедансу нагрузки. В связи с этим был разработан комплексный критерий на основе инварианта чувствительности функции коэффициента отражения. Использование данного критерия в комбинации с методом вещественных частот позволяет синтезировать ШСУ, обладающее требуемым уровнем КПМ при наличии изменяющегося импеданса нагрузки.

С помощью предложенного подхода для АУ радиостанции Р-180 было синтезировано ШСЦ, обеспечивающая уровень КПМ не менее 0,9 в рабочем диапазоне частот для различных условий обстановки. Данное решение

позволило обеспечить выигрыш в дальности радиосвязи радиостанции Р-180 до 5% в рабочем диапазоне частот по сравнению со штатным ШСУ.

Также была разработана математическая модель адаптивного ШСУ, на основе которой было синтезировано адаптивное ШСУ для АУ радиостанции Р-181, обеспечивающее увеличение уровня передачи мощности в различных условиях эксплуатации за счет уменьшения дисперсии модуля функции коэффициента отражения. Это позволило увеличить потенциально достижимую дальность радиолинии от 2 до 15 % в рамках представленных экспериментальных исследований.

Литература

1. Дик А.М., Кашкаров А.В., Макатерчик А.В. *Радиостанции малой и средней мощности*. Минск, БГУИР. 2014. 108 с.
2. Бойкачев П.В., Дубовик В.О., Исаев В.О. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов. *Вестник ВАРБ*. 2019. №2(63). С.32–40.
3. Trival antene. Datasheet AD-44/CW-TA-30-512. Slovenia, 2019.
4. Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512. Slovenia, 2019.
5. Руководство по эксплуатации радиостанции Р-180 КЛСИ.46.464429.002РЭ.
6. Гришин В.П., Ипатов Ю.М., Казаринов Ю.М. *Радиотехнические системы*. Москва, Высшая школа. 1990. 496 с.
7. Гехер К. *Теория чувствительности и допусков электронных цепей*. Москва, Советское радио. 1973.
8. Хьюдсман Л.П., Аллен Ф.Е. *Введение в теорию и расчет активных фильтров*. Москва, Радио и связь. 1984. 384 с.
9. Филиппович Г.А. *Широкополосное согласование сопротивлений*. Минск, ВА РБ. 2004.
10. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О., Янцевич М.А. Адаптивное согласование широкополосных радиотехнических устройств к изменяющемуся импедансу. *8-я Международная научная конференция по*

военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения. Минск, 16–17 мая 2017 г. С.50–53.

11. Yarman B.S. Design of ultra wide-band antenna matching networks. Istanbul, Springer. 2008. 308 p.
12. MWO Software Guide: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA. 2018.
13. Ланнэ А.А. *Оптимальный синтез линейных электрических цепей*. Москва, Связь. 1969. 294 с.
14. Небылов А.В. *Гарантирование точности управления*. Москва, Наука Физматлит. 1998. 293 с.
15. Полушин П.А., Самойлов А.Г., Самойлов С.А. Адаптация цепей согласования импеданса высокочастотных нагрузок. *Симпозиум с международным участием «Аэрокосмические приборные технологии»*. Москва. 1999. С.34-35.
16. Коновалов Г.Ф. *Радиоавтоматика*. Москва, Высшая школа. 1990. 335 с.
17. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К., *Схемы с преобразователем сопротивления*. Ленинград, Энергия. 1973.
18. Дубовик И.А., *Согласующая цепь для широкополосного антенного устройства радиостанции Р-180 на основе инварианта чувствительности функции коэффициента отражения / И.А. Дубовик, П.В. Бойкачев // Сборник научных трудов НИИ ВС. – 2020. – № 2 (10). – С.111–120.*
19. Королук В.С. и др. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике*. Москва, Наука. 1985. 640 с.
20. 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). С.61-69.
21. Дубовик И. А., Бойкачев П. В., Исаев В. О. Комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств на основе инварианта

чувствительности. В сб. *Информационные радиосистемы и радиотехнологии*. Минск, БГУИР. 2020.

22. Курушин А.А., Пластиков А.Н. *Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio*. Москва, Издательство МЭИ. 2011. 155 с.

23. Техника связи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://t-c.by/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-TVN.pdf> (дата обращения 10.04.2021).

Для цитирования:

Бойкачев П.В., Дубовик И.А., Исаев В.О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки. Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>