



GLOBAL JOURNAL OF RESEARCHES IN ENGINEERING: F
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
Volume 22 Issue 3 Version 1.0 Year 2022
Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals
Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861

Matching Device for AD-25/CW-3512 Broadband Antenna System Adaptive to Changing Load Impedance

By Dubovik Ilya Andreevich, Boykachev P. V. & Isaev V. O.

Abstract- The mathematical model of an adaptive matching device is presented, taking into account the deviation of the load impedance and the parameters of the matching circuit, based on this mathematical model, an adaptive matching device was synthesized for the AD-25/CW-3512 broadband antenna, which made it possible to reduce the loss of the power transmission coefficient level from the input (output) of the path to the AC and increase the potential range of the radio link from 2 to 15% in the framework of the presented experimental studies.

Keywords: coordination, method, sensitivity, load, broadband, mathematical model, adaptation.

GJRE-F Classification: DDC Code: 621.3845 LCC Code: TK6570.M6



Strictly as per the compliance and regulations of:



© 2022. Dubovik Ilya Andreevich, Boykachev P. V. & Isaev V. O.. This research/review article is distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BYNCND 4.0). You must give appropriate credit to authors and reference this article if parts of the article are reproduced in any manner. Applicable licensing terms are at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Matching Device for AD-25/CW-3512 Broadband Antenna System Adaptive to Changing Load Impedance

СОГЛАСУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ
AD-25/CW-3512 АДАПТИВНОЕ К ИЗМЕНЯЮЩЕМУСЯ ИМПЕДАНСУ НАГРУЗКИ

Dubovik Ilya Andreevich ^α, Boykachev P. V. ^σ & Isaev V. O. ^ρ

Абстрактный- Представлена математическая модель адаптивного согласующего устройства, учитывающая отклонение импеданса нагрузки и параметров согласующей цепи, на основе данной математической модели было синтезировано адаптивное согласующее устройство для широкополосной антенны AD-25/CW-3512, что позволило уменьшить потери уровня коэффициента передачи по мощности от входного (выходного) тракта к АУ и увеличить потенциальную дальность радиолинии от 2 до 15% в рамках представленных экспериментальных исследований.

Abstract- The mathematical model of an adaptive matching device is presented, taking into account the deviation of the load impedance and the parameters of the matching circuit, based on this mathematical model, an adaptive matching device was synthesized for the AD-25/CW-3512 broadband antenna, which made it possible to reduce the loss of the power transmission coefficient level from the input (output) of the path to the AC and increase the potential range of the radio link from 2 to 15% in the framework of the presented experimental studies.

Keywords: coordination, method, sensitivity, load, broadband, mathematical model, adaptation.

I. 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 в организации устойчивого управления войсками в условиях современного боя, для обеспечения связи личного состава воинских подразделений наблюдения, разведки, сил специальных операций и сухопутных войск, а также должностных лиц тактического звена управления, 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.

а) Постановка задачи

В предыдущих публикациях на основании разработанной методики синтеза согласующих устройств (СУ) с учетом отклонения импеданса нагрузки была синтезирована цепь согласования для АУ AD-44/CW-TA-30-512, обеспечивающая уровень передачи мощности не менее 0,9 в различных

Author α: Ph.D., Teacher of the Automation, Radar and Transceiver Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus. e-mail: duba-77@mail.ru.

Author σ: Ph.D., Associate Professor, Doctoral Candidate of the Automation, Radar and Transceiver Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus. e-mail: pashapasha.boi@mail.ru

Author ρ: Master of Technical Sciences of the Automation, Radar and Transceiver Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus. e-mail: ystasmoz@gmail.com

условиях эксплуатации[3]. Однако использование представленного подхода для синтеза подобного рода цепей применительно к АУ AD-25/CW-3512 не представляется возможным. Дело в том, что реальная составляющая импеданса АУ AD-25/CW-3512 изменяется в диапазоне от 10 до 160 Ом[2]. В таких случаях положительный эффект функционирования может быть гарантирован только при наличии в системе адаптации [3]. Таким образом, целесообразно разработать СУ для АУ AD-25/CW-3512 адаптивное к изменению импеданса нагрузки и обеспечивающее требуемый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации, в рабочем диапазоне частот.

b) Результаты экспериментального исследования по влиянию изменений условий эксплуатации на импеданс антенного устройства AD-25/CW-3512

В работе [2] были проведены экспериментальные исследования, показывающие вариации импеданса АУ в различных условиях эксплуатации носимых радиостанций (в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой, а также в безэховой камере). Результаты экспериментального исследования представлены на рисунке 1 в виде зависимостей реальной и мнимой составляющих импеданса нагрузки от частоты (полосы частот выбраны в соответствии с диапазонами работы радиостанции Р-181[4]) для различных условий эксплуатации.

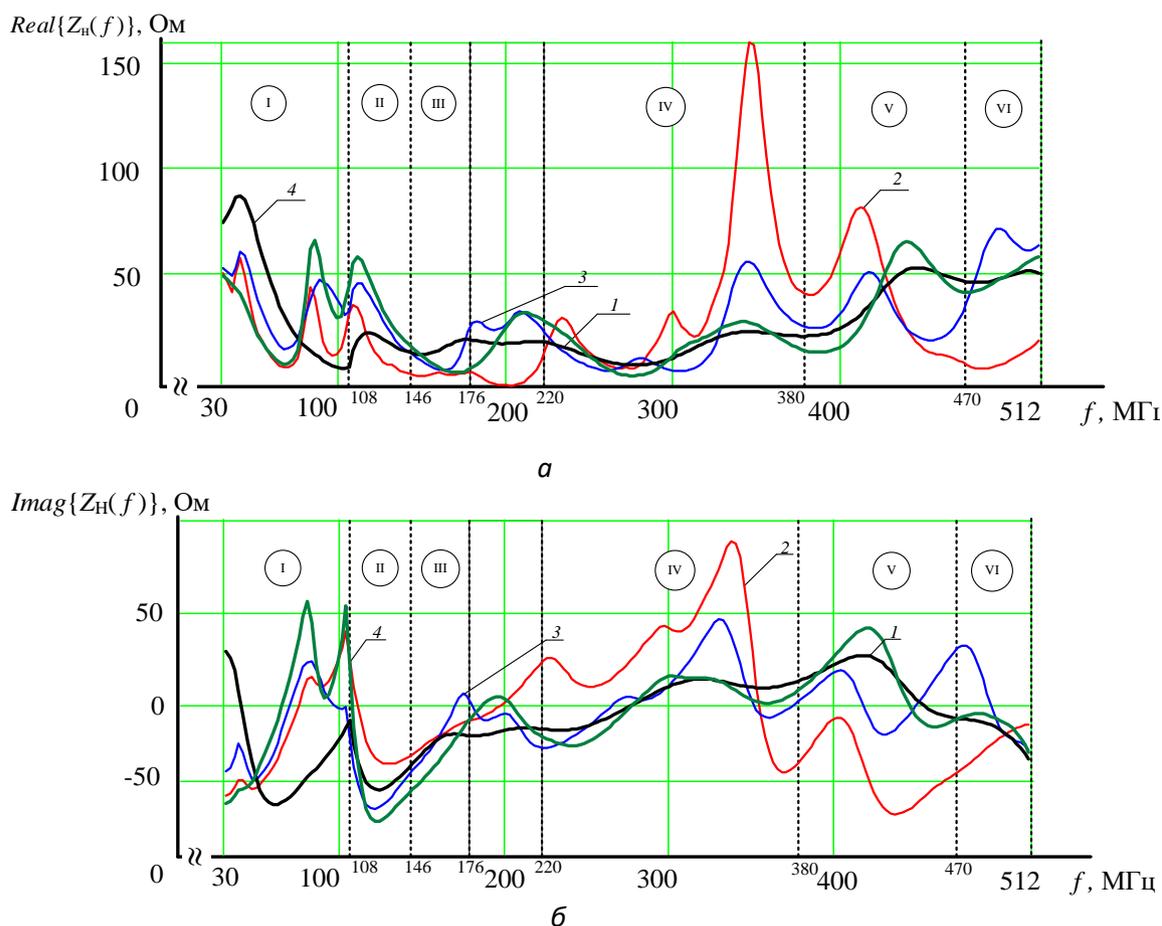


Рисунок 1: Зависимость изменения активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны AD-25/CW-3512 в рабочей полосе частот:

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

Анализируя полученные результатов можно сделать определенные выводы:

- изменение условий эксплуатации приводит к изменению импеданса АУ относительно эталонного значения (в безэховой камере). Значительное изменение активной и реактивной составляющих импеданса АУ AD-25/CW-3512 наблюдается в помещении;
- существенное изменение импеданса приводит к изменению функции коэффициента передачи по мощности (КПМ), особенно это наблюдается в 2-6 диапазонах работы радиостанции (рисунок 2), несмотря на то, что АУ согласованно на линию с сопротивлением в 50 Ом [5].

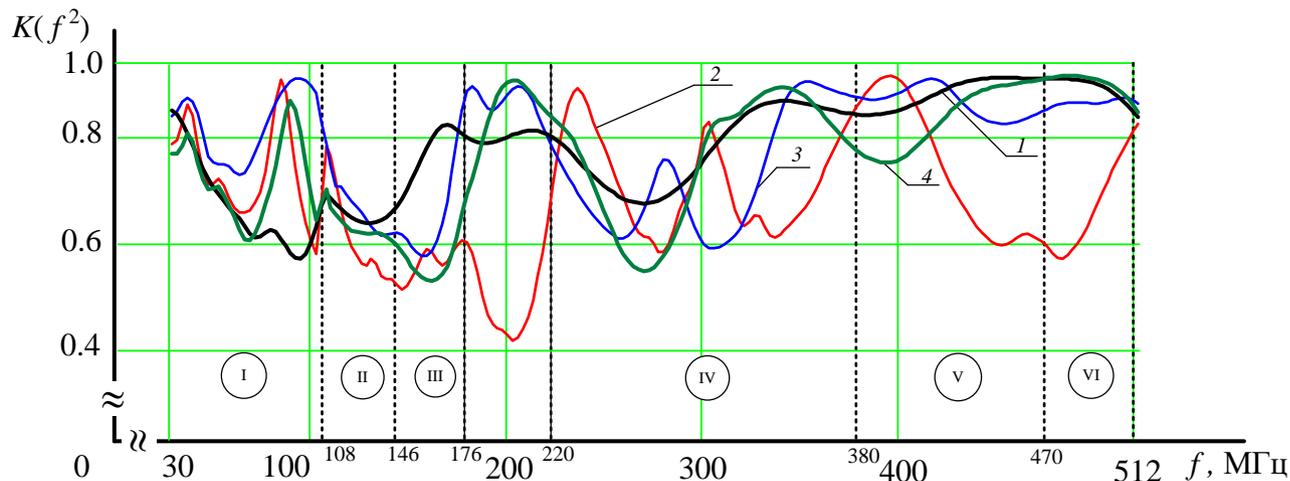


Рисунок 2: Зависимость коэффициента передачи по мощности антенны AD-25/CW-3512:

1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении;

3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой

Кроме импеданса нагрузки и уровня КПМ в экспериментальном исследовании было рассмотрено влияние условий эксплуатации на дальность радиосвязи, потенциальные возможности которой можно оценить с помощью дальности радиолинии [6, с. 215]. В связи с тем, что работа посвящена уменьшению потерь передаваемой энергии полезного сигнала, расчет дальности радиолинии осуществлялся при условии, что все параметры радиостанции остаются неизменными, за исключением мощности передачи полезного сигнала от ППМ к АУ. Исходя из [2], изменение передачи мощности (рисунок 2) приводит к уменьшению дальности радиолинии на 15,8-22,2%, что может привести к потере связи между подразделениями. Таким образом, полученные результаты подтверждают актуальность поставленной задачи.

с) *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 3), анализирующую качество согласования и подстраивающую свои элементы в сторону улучшения согласования [4].

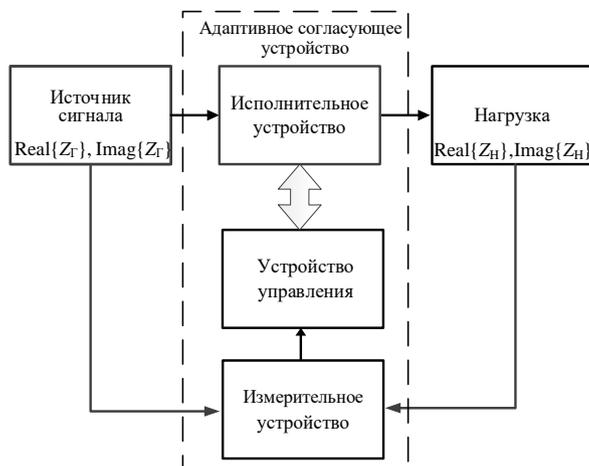


Рисунок 3: Структурная схема адаптивного согласующего устройства

Работа представленной схемы (рисунок 3) осуществляется следующим образом. Появление нежелательного отклонения (уровня КПМ, коэффициента стоячей волны (КСВ) и т. д.) обнаруживается и его значение измеряется. После чего приводятся в действие органы (перестраиваемые элементы адаптивного широкополосного согласующего устройства (ШСУ)), устраняющие отклонения путем соответствующего изменения значения управляемой величины. Следует отметить, что использование принципа обратной связи, при построении динамической системы, характеризуется простотой измерения отклонения исследуемой характеристики. При этом наибольший недостаток обратной связи (срабатывание после появления отклонения) устраняется путем многократного измерения исследуемой характеристики.

В общем случае адаптивное ШСУ можно разбить на три составляющие (рисунок 3):

- 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 [5, 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 широкополосного согласующего устройства (ШСУ), при котором суммарная среднеквадратичная ошибка уровня КПМ по отношению к требуемому значению будет минимальна [5 с. 136], т. е.:

$$\int_{f_n}^{f_a} \left[K(f)_{\text{треб}} - K(f, Z_n, Z_{\text{сц}}) \right]^2 d f \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $K(f)_{\text{треб}}$ – требуемый уровень передачи мощности в нагрузку;

$K(f, Z_n, Z_{\text{сц}}) = 1 - |S_{in}(f, Z_n, Z_{\text{сц}})|^2$ – функция КПМ;

$S_{in}(f, Z_n, Z_{\text{сц}}) = \frac{Z_n(f) - Z_{\text{сц}}(-f)}{Z_n(f) + Z_{\text{сц}}(f)}$ – функция коэффициента отражения;

f_n, f_b – верхняя и нижняя частота рабочего диапазона;

$Z_n(f)$ – комплексное сопротивление нагрузки;

$Z_{сц}(f)$ – комплексное сопротивление согласующего устройства.

В [3] было установлено, что для обеспечения требуемого уровня передачи мощности при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо, чтобы синтезируемое СУ обладало свойством минимальной чувствительности [9, с. 51] функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки. В виду того, что импеданс нагрузки будет рассматриваться как измеренное значение реальной ($\text{Real}[Z_n(f)]$) и мнимой части ($\text{Imag}[Z_n(f)]$) комплексного сопротивления на дискретном ряде частот, то выполнение поставленной задачи (расчета функции чувствительности) предлагается выполнять с помощью статистического метода анализа [9]. Этот метод применим к случайным величинам, в частности к отклонениям параметров нагрузки от номинального значения внутри поля допусков [10, с. 156]. Знание функции чувствительности, характеризующей степень влияния элементов на характеристики схемы, позволяет с определенной вероятностью [10, с. 157] найти среднеквадратичное отклонение (СКО) модуля функции коэффициента отражения, рассчитанного по формуле:

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

где $\sigma_{Z_n}^2 \left(\frac{\Delta Z_n}{Z_n} \right)$ – СКО импеданса нагрузки;

ΔZ_n – допустимое отклонение импеданса нагрузки;

$S_{Z_n}^{s_{in}} = \text{Re} \left[\frac{2\text{Re}(Z_{сц}(f))Z_n(f)}{(Z_n(f) + Z_{сц}(f))(Z_n(f) - Z_{сц}(f))} \right]$ – чувствительности модуля функции

коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки [3].

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 [10, с. 146-147].

В качестве примера на рисунке 4 представлены зависимости уровня КПМ от частоты, с учетом отклонения элементов СЦ [19] (ряд номиналов E24 ($\pm 5\%$) (рисунок 4,а) и E12 ($\pm 10\%$) (рисунок 4,б)), функционирующей от 47 до 158 МГц. В представленных зависимостях наблюдается изменение уровня КПМ (рисунок 4, в) относительно исходной зависимости (рисунок 4,г), при условии, что параметры нагрузки остаются фиксированными.

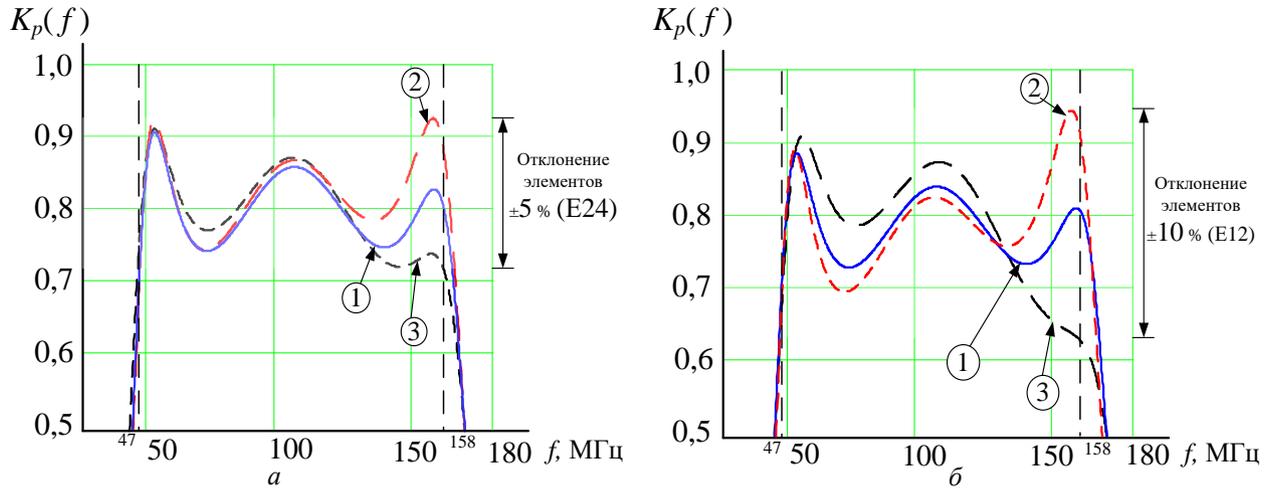


Рисунок 4: Зависимость КПМ от частоты с учетом отклонения элементов СЦ [19]

Таким образом, полагая, что отклонение импеданса нагрузки и элементов согласующего устройства, в силу «Центральной предельной теоремы» [11], подчиняется нормальному закону распределения, то дисперсию относительного изменения модуля функции коэффициента отражения можно определить с помощью выражения:

$$\sigma_K(f)^2 = |S_{Z_H}^{S_m}(f)|^2 \sigma_{Z_H}^2 + \sum_{i=0}^{N_C} |S_{C_i}^{S_m}(f)|^2 \sigma_{C_i}^2 + \sum_{i=0}^{N_L} |S_{L_i}^{S_m}(f)|^2 \sigma_{L_i}^2, \quad (3)$$

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

$$S_{L_i}^{S_m}(f) = \text{Re} \left\{ \frac{-4 \left[2Z_H(f) + \frac{1}{2} \text{Im}(Z_{\text{сц}}(f)) \right] \partial \text{Re}[Z_{\text{сц}}(f)]}{[Z_H(f) + Z_{\text{сц}}(f)]^2 \partial L_i} \right\} \quad \text{– чувствительность модуля}$$

функции коэффициента отражения к изменению индуктивности согласующей цепи;

$$S_{C_i}^{S_m}(f) = \text{Re} \left\{ \frac{-4 \left[2Z_H(f) + \frac{1}{2} \text{Im}(Z_{\text{сц}}(f)) \right] \partial \text{Re}[Z_{\text{сц}}(f)]}{[Z_H(f) + Z_{\text{сц}}(f)]^2 \partial C_i} \right\} \quad \text{– чувствительность модуля}$$

функции коэффициента отражения к изменению емкости согласующей цепи;

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

Для того, чтобы обеспечить наименьшее влияние изменения импеданса нагрузки и элементов цепи необходимо, чтобы выражение (3) было минимизировано, ограничиваясь при этом номиналами элементов цепи, находящихся в магазине элементов исполнительного устройства ($C_{\text{min}} \dots C_{\text{max}}, L_{\text{min}} \dots L_{\text{max}}$). Таким образом, критерий оптимальности, может быть представлен следующим выражением:

$$\begin{cases} \left\{ K(f)_{\text{треб}} - [K(f^2) - \sigma_K(f)] \right\}^2 \leq \varepsilon & f_{\text{н}} \leq f \leq f_{\text{в}} \\ \sigma_K(f)^2 \rightarrow \min & f_{\text{н}} \leq f \leq f_{\text{в}}; \\ C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max}; \\ L_{\min} \leq L_i \leq L_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

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

Использование выражения (4) 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 надежности радиотехнического устройства. Структура адаптивного согласующего устройства (исполнительного устройства) может быть найдена с помощью методики синтеза представленной в [3].

Таким образом, на основании полученных результатов и результатов представленных в [2,3,12-14] была разработана математическая модель адаптивного согласующего устройства, алгоритм расчета параметров которой представлен на рисунке 5.



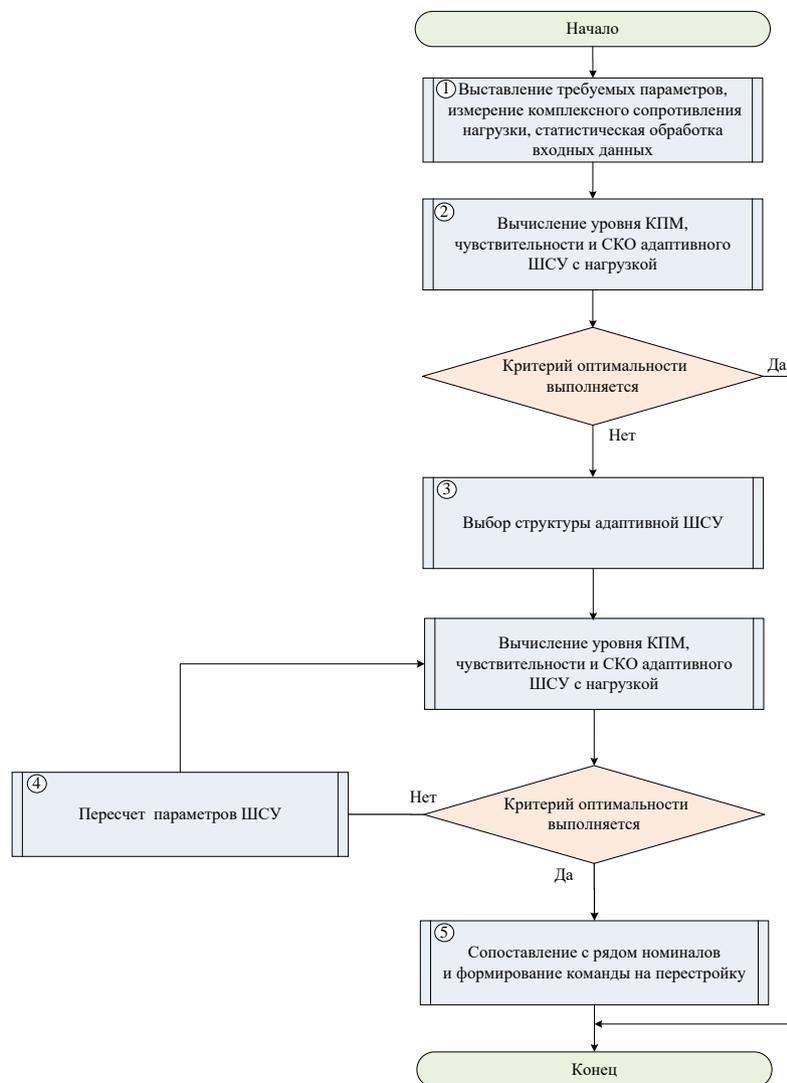


Рисунок 5: Обобщенный алгоритм расчета параметров математической модели адаптивного согласующего устройства

Суть алгоритма заключается в нахождении ШСУ, которое обеспечивает выполнение критерия оптимальности (выражение 4), 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. 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.

Следует отметить, что на практике реактивные элементы неидеальны и обладают резистивным сопротивлением (сопротивлением потерь r). Для его учета используют такой параметр, как добротность Q определяющейся с помощью:

$$Q_{Li} = 2\pi f_i L / r ; \quad (5)$$

$$Q_{Ci} = 2\pi f_i C r . \quad (6)$$

В доступной технической документации содержится информация о добротностях номиналов индуктивностей и емкостей на некоторой частоте измерения. Эта информация оказывается полезной не только на этапе моделирования схем, но и на этапе их расчета. Известные величины добротностей, используемых элементов, позволяют рассчитывать параметры СЦ по заданным критериям оптимальности с учетом тепловых потерь и тем самым максимально приблизить характеристики рассчитываемых схем к характеристикам их экспериментальных аналогов.

На основании разработанной математической модели был разработан специализированный экспериментальный комплекс расчета и контроля функционирования согласующих устройств в РТС (рисунок 6), состоящий из измерительного устройства, устройства управления (программно-имитационная модель) и средства индикации.



Рисунок 6: 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.

d) Синтез СУ для АУ AD-25/CW-3512 адаптивного к изменяющемуся импедансу нагрузки

На основании поставленной задачи с помощью предложенной математической модели было разработано адаптивное СУ для АУ AD-25/CW-3512. Электрическая схема исполнительного устройства адаптивного ШСУ, состоящая из шести реактивных элементов, представлена на рисунке 7.

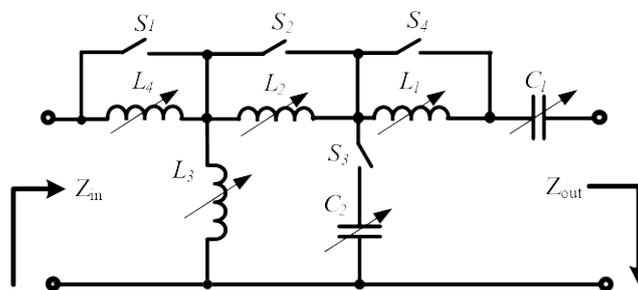


Рисунок 7: Электрическая схема исполнительного устройства адаптивного ШСУ

Функция сопротивления, описывающая данное адаптивное ШСУ, выглядит следующим образом:

$$Z_{\text{сш}}(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4 + a_5s^5}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + b_4s^4 + b_5s^5}. \tag{7}$$

Коэффициенты функции числителя (a_i) и знаменателя (b_i) $Z_{\text{сш}}(s)$ описываются значениями элементов цепи (L, C, R):

$$\begin{cases} a_0 = R; \\ a_1 = L_3 + L_4; \\ a_2 = C_1L_1R + C_1L_2R + C_2L_3R; \\ a_3 = C_1(L_1L_4 + L_1L_3 + L_2L_3 + L_2L_4 + L_3L_4) + C_2(L_2L_3 + L_2L_4 + L_3L_4); \\ a_4 = C_1C_2L_1R(L_3 + L_2); \\ a_5 = C_1C_2L_1(L_3L_4 + L_2L_4 + L_2L_3). \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} b_0 = 0; \\ b_1 = C_1R; \\ b_2 = C_1(L_3 + L_4); \\ b_3 = C_1C_2R(L_2 + L_3); \\ b_4 = C_1C_2(L_3L_4 + L_2L_4 + L_2L_3); \\ b_5 = 0. \end{cases} \tag{9}$$

Параметры аналитической математической модели в виде параметров 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)	
$C_1, \mu\text{Ф}$	200	200	62	2	2	12	95	9.5	15.6	6
$L_1, \text{нГн}$	18,6	66	4	—	—	—	—	—	—	3.5
$L_2, \text{нГн}$	26,21	—	—	—	—	11	—	7,5	—	—

L_3 , нГн	300	35	52	2 1	3 3	24	121	130	29	65
L_4 , нГн	11,3	–	3	–	–	2	–	2,5	7	28
C_2 , пФ	32	10	-	8	–	9	–	–	–	–

« – » – элемент равен нулю и исключается из согласующей цепи

Следует отметить, что принципиальная схема, представленная на рисунке 6, может быть выполнена на реактивных элементах, реле или рpn-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 6 представлена 3D модель возможного варианта исполнения разработанного адаптивного согласующего устройства размерами (52,5×42,5×2 мм³), реализованная в среде моделирования радиотехнических устройств CST Studio [15]. 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.

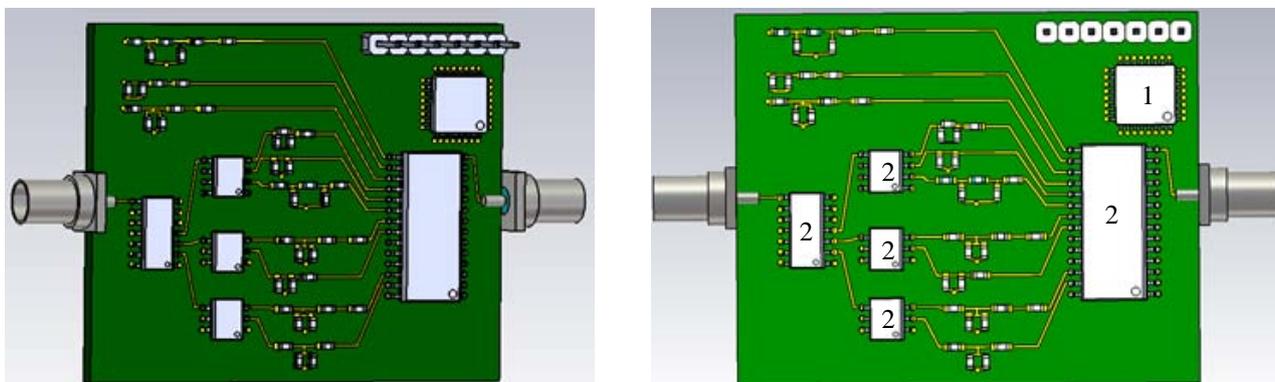


Рисунок 8: Пример 3D модели разработанного адаптивного согласующего устройства

Моделирование синтезированного согласующего устройства проводилось в AWR Microwave Studio 14 [16]. Результаты моделирования представлены на рисунке 9 в виде зависимости КПМ от частоты для различных условий обстановки. Прерывистыми линиями показаны КПМ АУ без синтезированного адаптивного ШСУ (2), а сплошными линиями с синтезированным адаптивным ШСУ (1).

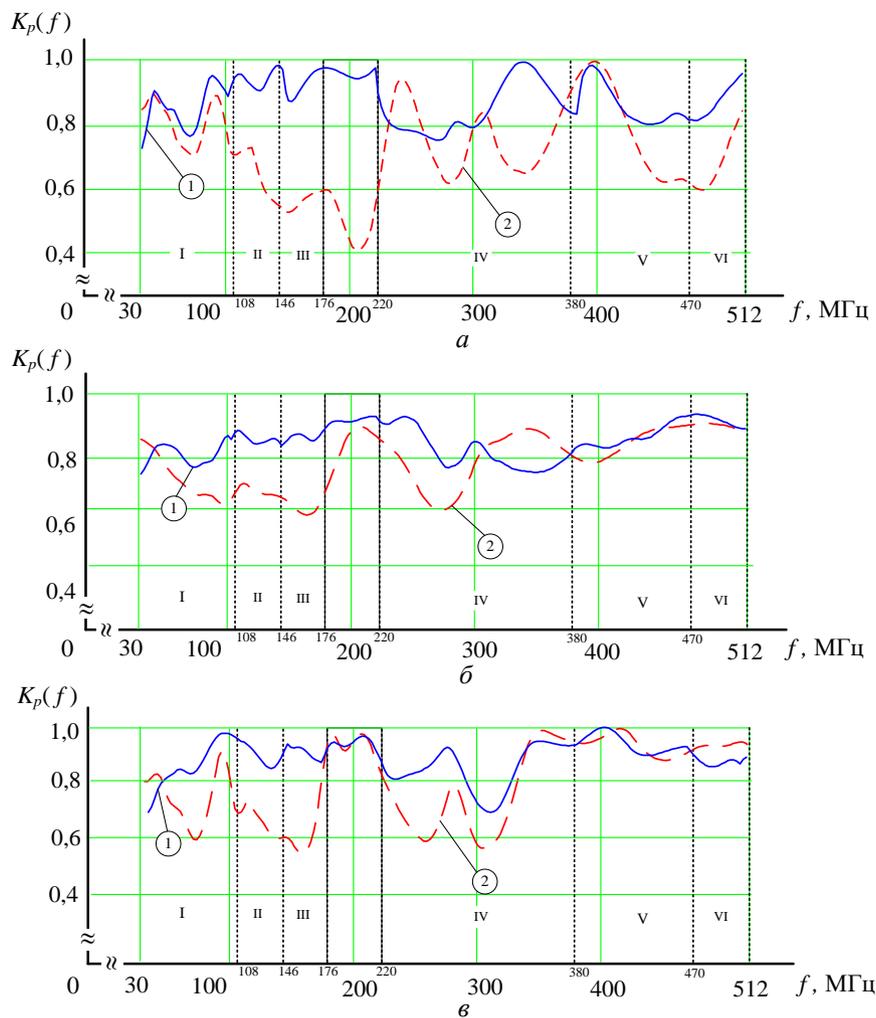


Рисунок 9: Зависимость КПМ от частоты АУ AD-25/CW-3512:

а- в помещении; *б-* в непосредственной близости с техникой; *в-* в лесном массиве

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 в помещении (наихудший случай) потери уровня КПМ (исходя из [17, с. 36-38]) составляют 39,7% (в III диапазоне) от максимального значения (19,7% в дальности радиолинии [6, с. 215]), а при использовании адаптивной ШСУ-8,6% (4,4 % в дальности радиолинии). 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	21,3	11,3	31,4%	17,2	36,3	20,2	19%	10%	11,3	5,8%	12,2	6,3%

адаптивн ого ШСУ	%	%		%	%	%			%		%	
С адаптивн ым ШСУ	16,4 %	8,6%	9,6%	4,9 %	9,8%	5%	13,2 %	6,8%	8,1%	4,1%	7,8%	4%

Таким образом, синтезированное адаптивное ШСУ обеспечивает уменьшение потерь уровня КПП отходного (выходного) тракта к АУ радиостанции Р-181 на 3 – 26 %, что позволяет увеличить усредненную потенциально достижимую дальность действия радиолинии [6, с. 215] для АУ от 2 % до 15% в рамках представленных экспериментальных исследований.

II. Заключение

Для выполнения поставленной задачи была разработана математическая модель адаптивного ШСУ, обеспечивающая увеличение уровня передачи мощности в различных условиях эксплуатации за счет уменьшения дисперсии модуля функции коэффициента отражения. На основе которой было синтезировано адаптивное ШСУ для АУ AD-25/CW-3512, что позволило увеличить потенциальную дальность радиолинии от 2 до 15% в рамках представленных экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дик, А.М. Радиостанции малой и средней мощности / А. М. Дик, А. В. Кашмаров, А.В. Макагерчик. – Минск: БГУИР, 2014. – 108 с.
2. Бойкачев, П. В. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов / П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик, В. О. Исаев // «Вестник» ВАРБ. – 2019. – №2(63). – С.32–40.
3. Дубовик, И. А. Методика синтеза согласующих устройств для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки на основе метода вещественных частот / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев // Докл. БГУИР. – 2021. – № 19. – С. 70–78.
4. Руководство по эксплуатации радиостанции Р-181-5НУ КЛСИ.464429.003-01 РЭ.
5. Trivalantene. Datasheet AD-25/CW-3512. – Slovenia, 2019.
6. Гришин, В.П. Радиотехнические системы. / В. И. Гришин, Ю. М. Ипатов, Ю. М.Казаринов: [и др.].– М., 1990.– 496 с.
7. 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.
8. Коновалов Г.Ф., Радиоавтоматика / Г.Ф. Коновалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
9. Гехер, К., ред: Ю.Л. Хотунцева. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М.Сов. радио. 1973.
10. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К., Схемы с преобразователем сопротивления / И.М. Филановский, А.Ю., Персианов, В.К., Рыбин. – Л., «Энергия». 1973.
11. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королук и др. - М.: Наука, 1985.-640 с.
12. Дубовик И.А., Адаптивное согласование широкополосных радиотехнических устройств к изменяющемуся импедансу нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, М. А. Янцевич // Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения.: сб. науч. статей 8-й Междунар. науч. конф., Минск, 16–17 мая 2017 г. Минск, 2019. – С. 50–53.

13. Дубовик И.А., Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки / И.А. Дубовик, П.В., Бойкачев, В.О. Исаев, А.А. Дмитренко // Доклады БГУИР. 2021;19(1):61-69.
14. Дубовик И. А., Бойкачев П. В., Исаев В. О. Комплексный критерий синтеза широкополосных согласующих устройств на основе инварианта чувствительности. Информационныерадиосистемыирадиотехнологии2020; Минск: БГУИР, 2020: 41–44 с.
15. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. Издательство МЭИ, 2011, 155 с.
16. Руководствопо MWO: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA –2018.
17. Ланнэ, А. А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей / А. А. Ланнэ. – М. : Связь, 1969. – 294 с.
18. Техника связи [Электронныйресурс] Режимдоступа: :<https://t-c.by/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-TVN.pdf/pdf/>(дата обращения10.04.2021).
19. Самуилов, А. А. Методика «визуального» проектирования цепей на сосредоточенных элементах для широкополосного согласования двух комплексных нагрузок / А. А. Самуилов, М. В. Черкашин, Л. И. Бабак // Сборник докладов ТУСУР. – 2013. - № 2(28). – С. 30-39.

