

П.В. Бойкачев, А.А. Ержан*, И.А. Дубовик, В.О. Исаев, А.А. Сутько

Военная академия Республики Беларусь

*e-mail: a.erzhan@aes.kz

МЕТОДИКА СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНТЕНН UHF/VHF ДИАПАЗОНА

Аннотация. Основные преимущества (30–512 МГц) диапазонов – большая дальность связи, особенно используемая за городом. Радиостанции таких диапазонов отлично работают как в мало пресечённой местности, так и в условиях многоэтажной застройки. В радиостанциях используются широкополосные согласующие устройства (ШСУ), обеспечивающие передачу максимальной мощности сигнала от источника в нагрузку. Они, как правило, оптимальны для комплексных нагрузок с фиксированными значениями параметров. Следует отметить, что импеданс нагрузки, в той или иной степени, изменяется во времени. По этой причине ШСУ обычно не является в строгом смысле оптимальным. Параметры согласуемой радиотехнической системы (РТС) с ШСУ несколько отличаются от оптимальных значений. Это говорит о том, что используемые ШСУ являются квазиоптимальными. В статье предложена методика синтеза широкополосных согласующих устройств, адаптирующих радиотехнические системы к изменяющемуся импедансу нагрузки.

Ключевые слова: адаптация, согласующее устройство, радиоавтоматика, широкополосные устройства.

Введение. Радиосвязь в настоящее время имеет большое значение в вопросах повседневной жизнедеятельности человека. Портативные, автомобильные и стационарные радиостанции успешно используются в строительной отрасли, в службах безопасности, а также в других областях деятельности людей, где требуется дешёвая и простая двухсторонняя связь. Так для обеспечения и организации связи, широкое применение получили радиостанции UHF/VHF диапазона, позволяющие функционировать в широком диапазоне частот (30–512 МГц) [1, с. 5–8]. К примеру, в ранее опубликованной работе [2] было установлено, что штатное ШСУ в антенных устройствах (АУ) AD-44/CW-TA-30-512 и AD-25/CW-3512 [3, 4] не способно обеспечить требуемый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации. Таким образом, возникает необходимость в создании методики реализации ШСУ адаптивных, к изменяющемуся импедансу РТС.

1. Постановка задачи. Для реализации РТС, характеристики которой будут стремиться к оптимальным в процессе эксплуатации (в рамках передачи мощности между каскадами РТС) предлагается использовать системы радиоавтоматики. Данные системы функционируют на основе автоматического измерения и дальнейшего преобразования входного сигнала, в качестве которого могут использоваться импедансные характеристики согласуемых нагрузок. В качестве исполнительного устройства предлагается использовать адаптивные ШСУ, характеристики которых будут изменяться в процессе работы РТС, тем самым оптимизируя систему. Создание подобных устройств требует четкого описания возмущающего воздействия. Для создания адекватной модели возмущающего воздействия, целесообразно провести экспериментальные исследования по оценке влияния изменений условий эксплуатации радиотехнической системы на импедансные характеристики согласуемой нагрузки. Предлагаемый эксперимент позволит определить статические характеристики возмущающих воздействий, действующих на проектируемую систему.

Вместе с этим необходимо сформулировать назначение системы и, на основании заданных технических требований к качеству работы системы, выбрать критерии оптимальности. Также, необходимо найти оптимальную передаточную функцию проектируемой системы и уточнить способы включения устройств адаптации. На конечном этапе реализации системы адаптации следует разработать исполнительное устройство (ШСУ),

присоединение которого к объекту управления позволит получить систему с оптимальной передаточной функцией.

1. Создание модели возмущающего воздействия.

Рассмотрим создание модели возмущающего воздействия на примере широкополосных АУ AD-44/CW-TA-30-512 и AD-25/CW-3512, работающих в VHF/UHF диапазонах. Внешний вид антенн представлен на рисунке 1. Антенны гарантируют работу различных радиостанций в диапазонах частот 30-512 МГц, согласованные на линию с сопротивлением 50 Ом [3, 4] и обеспечивают обмен информацией в различных условиях эксплуатации радиостанций VHF/UHF диапазона.

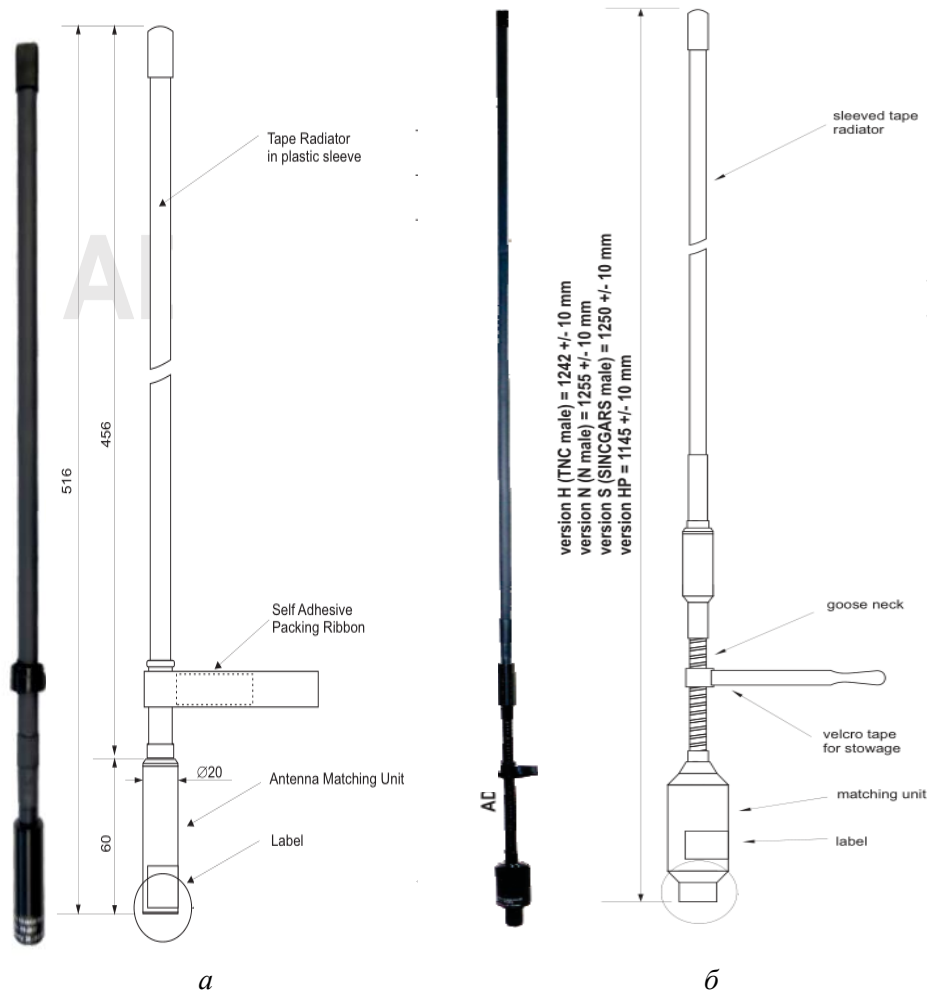


Рисунок 1. Антенные устройства: а) AD-44/CW-TA-30-512, б) AD-25/CW-3512

Экспериментальные исследования проведены согласно [5, 6] в различных условиях эксплуатации радиостанций: в помещении (в условиях многоэтажной застройки), в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой (имитация работы вблизи техники), а также в безэховой камере для получения эталонных значений комплексного сопротивления АУ. Подробный порядок проведения эксперимента описан в [2].

В результате экспериментальных исследований было выявлено следующее:

1. Изменение условий эксплуатации приводит к существенному изменению импеданса рассматриваемых АУ относительно эталонного значения (рисунок 2,3) .

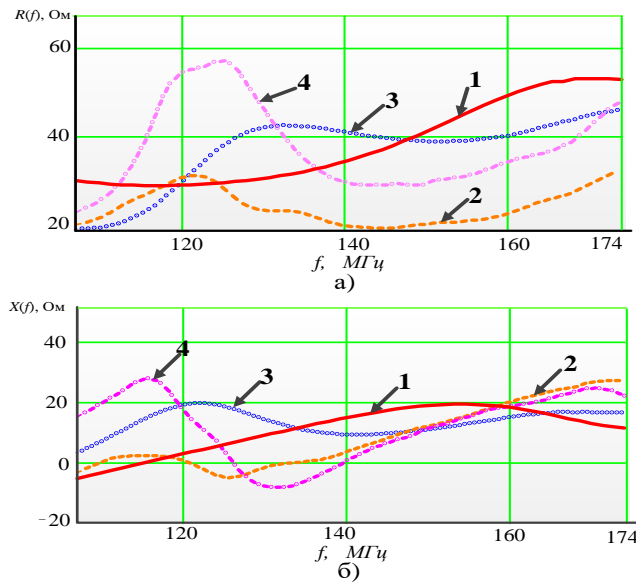


Рисунок 2. Зависимость изменения активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны AD-44/CW-TA-30-512 в рабочей полосе частот :
 1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении;
 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой

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 2). Для антенны AD-25/CW-3512 значительное изменение как активной, так и реактивной составляющей наблюдается в помещении (рисунок 3).

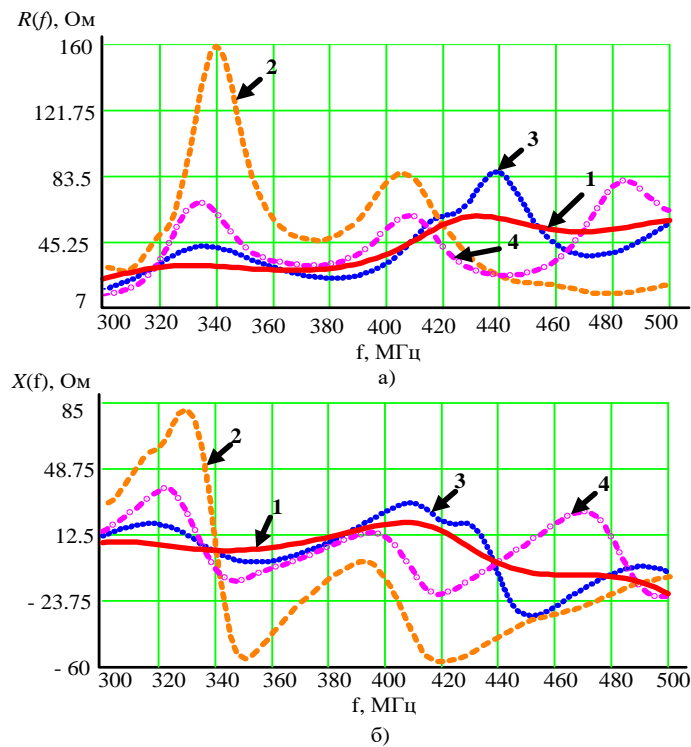


Рисунок 3. Зависимость изменения активной (а) и реактивной (б) частей импеданса антенны AD-25/CW-3512 в рабочей полосе частот:
 1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении;
 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой

2. Существенное изменение импеданса рассматриваемых АУ (для AD-44/CW-TA-30-512, $f = 140\text{--}160$ МГц, для AD-25/CW-3512, $f = 310\text{--}360; 420\text{--}500$ МГц) приводит к изменению функции коэффициента передачи мощности (КПМ) на тех же частотах (рисунок 4).

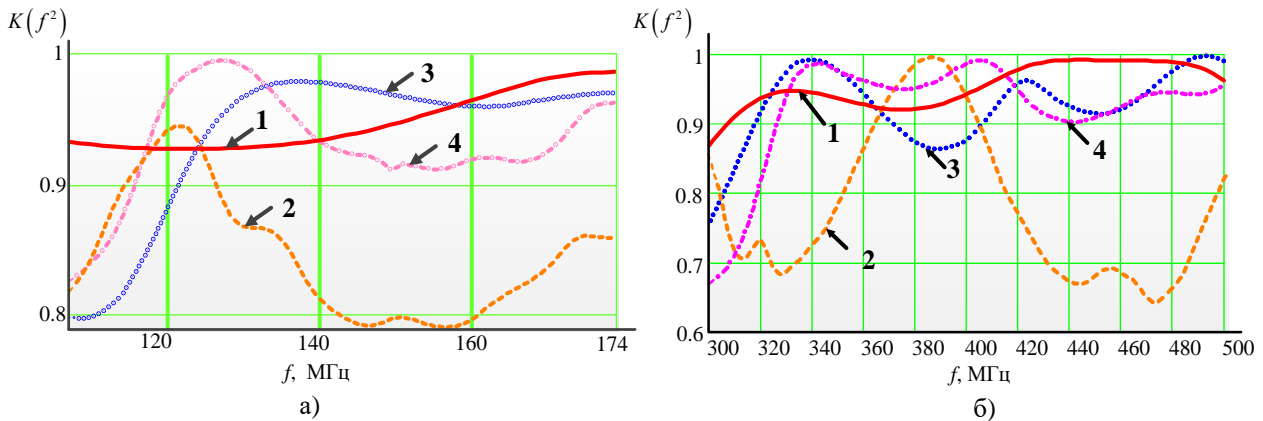


Рисунок 4. Зависимость КПМ антенны AD-44/CW-TA-30-512 (а) и антенны AD-25/CW-3512 (б):

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

Следует отметить, что модели импедансных характеристик были реализованы по методике, представленной в [7].

Исходя из результатов экспериментальных исследований, целесообразно оценить, как будут изменяться технические характеристики радиостанций в рассматриваемых условиях их эксплуатации. А также определить технические требования к адаптивной РТС.

Одной из характеристик радиостанций является потенциально достижимая дальность действия 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 $P_t = P_0 K$ – мощность передаваемая передатчиком в антенну;

K – коэффициент передачи мощности;

P_0 – мощность передатчика;

G_t – коэффициент усиления антенны передатчика;

G_r – коэффициент усиления антенны приемника;

λ – длина волны;

Δf – ширина спектра сигнала;

N_a – спектральная плотность мощности сигнала.

Из выражения (1) следует, что снижение КПМ рассматриваемых АУ (рисунок 4) приводит к снижению мощности отдаваемой передатчиком в антенну и уменьшает потенциально достижимую дальность действия радиолинии на 15,8...22,17%. Наличие штатного ШСУ не позволяет обеспечить постоянный, максимально достижимый уровень КПМ в рабочем диапазоне частот в различных условиях эксплуатации. В связи с этим, для обеспечения заданного уровня КПМ в различных условиях обстановки предлагается реализовать инвариантность ШСУ к изменению импеданса нагрузки. Данный подход позволит обеспечить предъявляемые требования к потенциально достижимой дальности действия радиолинии (в рамках передачи мощности при согласовании приёмо-передающих модулей и антенны). Для реализации данного подхода необходимо предъявить конкретные

требования к ШСУ и задать критерий оптимальности синтеза ШСУ на основе аппарата инварианта чувствительности.

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

Зададим требования к уровню передачи мощности от передатчика к антенне в рабочем диапазоне частот. Он должен быть, в среднем, не хуже уровня, обеспечивающегося штатным ШСУ в полосе рабочих частот. В тоже время адаптивное ШСУ должно обеспечивать минимум чувствительности к вариациям импеданса антенны.

Для синтеза ШСУ, позволяющего обеспечить уровень КПМ не хуже требуемого, при наличии изменяющегося импеданса нагрузки 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. 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 [10, с. 14–15]. Для линеаризованного случая (пренебрегаем 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 .

Выражение (2) используется для описания влияния малых отклонений, оно основано на математическом анализе [10, 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), которое произошло в результате некоторых вариаций одного или нескольких элементов ШСУ [11]. 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)

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

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

Функция КПМ определяется как отношение мощности в нагрузке к максимальной мощности, которая может быть получена генератором или же, исходя из [12, с. 8], через модуль функции коэффициента отражения.

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

где $S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ}) = \frac{Z_H(f) - Z_{CЦ}(-f)}{Z_H(f) + Z_{CЦ}(f)}$ – функция коэффициента отражения (коэффициент рассогласования); $Z_H(f)$ – комплексное сопротивление нагрузки; $Z_{CЦ}(f)$ – 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 $S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ})$ на изменение импеданса нагрузки. Функция $S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ})$ является комплексной величиной и позволяет в полной мере оценить вариации как реальной, так и мнимой составляющей $Z_H(f)$. 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 [10, с. 51]) необходимо минимизировать квадрат модуля относительной чувствительности.

$$\left| R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ}) \} \right|^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Для нахождения относительной чувствительности функции коэффициента отражения воспользуемся инвариантным свойством чувствительности. Оно показывает соответствующие соотношения, связывающие функцию чувствительности по различным параметрам типовых функций цепей [10, с. 41]. Это позволит избавиться от дифференцирования функции коэффициента отражения. Проведя некоторые преобразования, получаем квадрат модуля относительной чувствительности функции коэффициента отражения.

$$\left| R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ}) \} \right|^2 = \left| \frac{2 \operatorname{Re} \{ Z_{CЦ}(f) \} Z_H(f)}{(Z_H(f) + Z_{CЦ}(f))(Z_H(f) - Z_{CЦ}(-f))} \right|^2. \quad (9)$$

Выражение (10) 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 9 по частоте. В результате чего получим

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| R \{ S_{in}(f, Z_H, Z_{CЦ}) \} \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{2 \operatorname{Re} \{ Z_{CЦ}(f) \} Z_H(f)}{(Z_H(f) + Z_{CЦ}(f))(Z_H(f) - Z_{CЦ}(-f))} \right|^2 df, \quad (10)$$

где f_H, f_B – нижняя, верхняя частоты рабочего диапазона. 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 (10) принимает вид

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left[R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right] \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{\left(1 - |S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 \right)^2 \left(|Z_H (f)|^2 - |Z_{ЦЦ} (f)|^2 \right)^2}{|S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 8 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ} (f) \} \operatorname{Re} \{ Z_H (f) \}} \right|^2 df. \quad (11)$$

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

$$\begin{cases} \int_{f_B}^{f_H} \left(K_{\text{треб}} - \left(1 - |S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 \right) \right)^2 df \leq \varepsilon \\ \int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right\} \right|^2 df \rightarrow \min \end{cases}, \quad (12)$$

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

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

Систему уравнений (12) можно использовать в качестве целевой функции (комплексного критерия) в сочетании с одним из существующих численных методов синтеза ШСУ.

3. Алгоритм реализации широкополосных согласующих устройств на основе аппарата инварианта чувствительности.

В качестве метода синтеза ШСУ, исходя из [12], предлагается использовать метод вещественных частот [13]. Данный метод основан на сочетании аналитического и численного подходов к задаче синтеза ШСУ. Основное преимущество данного метода состоит в том, что он не требует аппроксимации импеданса нагрузки, а также в том, что функция КПМ представляется в виде аналитического выражения. ШСУ синтезируется с помощью итеративных подходов поиска вещественной составляющей функции сопротивления.

$$R_{ЦЦ} (f^2) = \frac{A (f^2)}{B (f^2)} = \frac{a_0 2\pi f^{ndc} \prod_{i=1}^{nz} (2\pi f_i^2 - 2\pi f^2)^2}{B_1 2\pi f^{2n} + B_2 2\pi f^{2(n-1)} + \dots + B_n 2\pi f^2 + 1} \geq 0, \forall f, \quad (13)$$

где $R_{ЦЦ} (f^2)$ – 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_n – коэффициенты полинома знаменателя;

n – порядок полинома;

a_0 – нулевой коэффициент полинома знаменателя.

Алгоритм работы метода вещественных частот на основе комплексного критерия (выражение 12) представлен на рисунке.

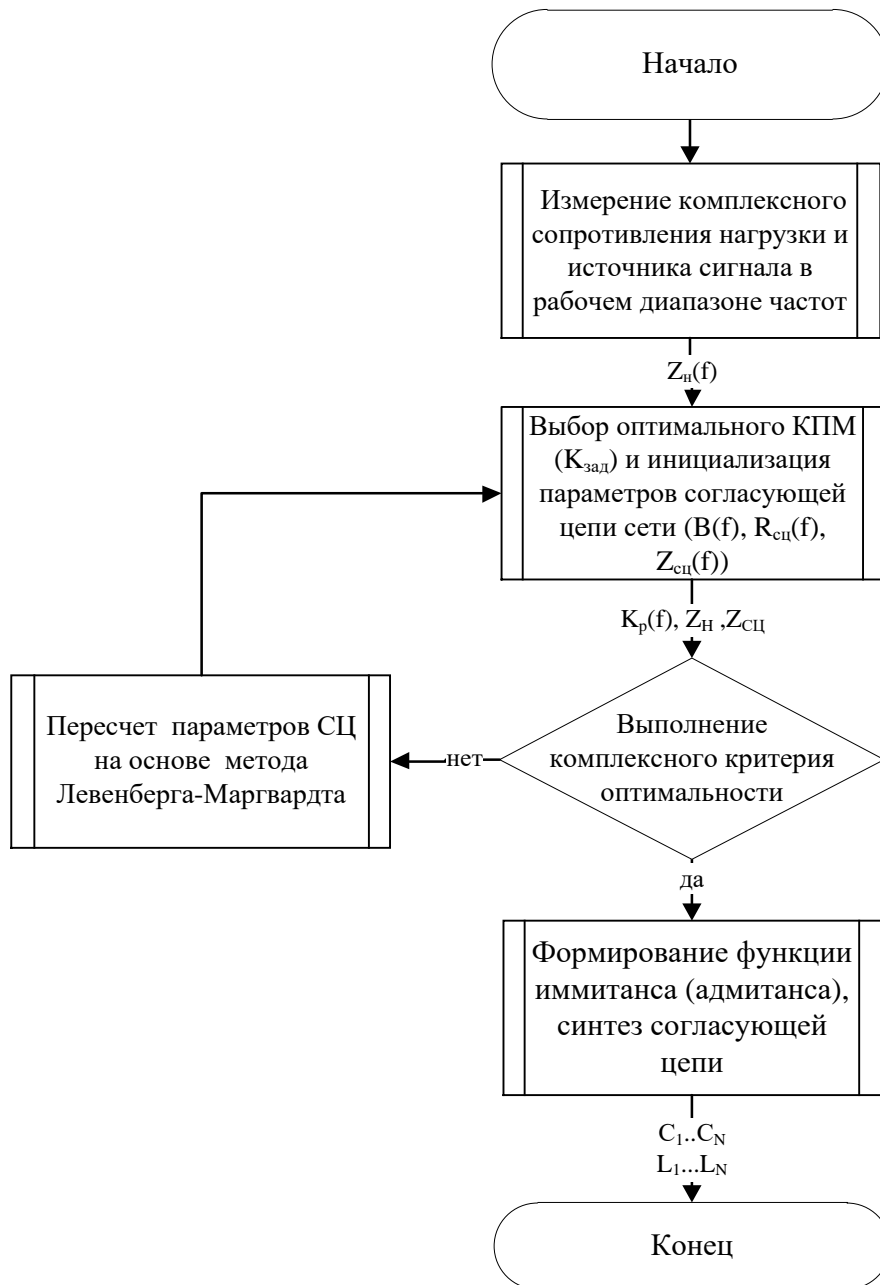


Рисунок 5. Алгоритм работы метода вещественных частот на основе комплексного критерия

Работа алгоритма заключается в нахождении вещественной составляющей функции сопротивления ШСУ, которая обеспечивает выполнение комплексного критерия (выражение 12). 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.

4. Синтез ШСУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512.

Для проверки работоспособности алгоритма (рисунок 5) было синтезировано ШСУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512. Разработанное ШСУ обеспечивает уровень КПМ, в среднем, не хуже уровня, обеспечивающегося штатным ШСУ в различных условиях обстановки (в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой). Нагрузкой является АУ AD-44/CW-TA-30-512, работающая совместно с радиостанцией Р-180 [1, с. 31]. Рабочая

полоса частот $\Delta f = 108\text{--}146$ МГц с допустимым отклонением уровня $\varepsilon = 0,01$ (10 % от максимального значения функции КПМ). Моделирование проведено в AWR Microwave Studio 14 [15]. Схема синтезированного ШСУ (согласно алгоритма на рисунке 5) представлена на рисунке 6, элементы схемы приведены под ряд номиналов E24. Они равны: $C_1=16$ pF; $C_2=39$ pF; $C_3=29$ pF; $L_1=56$ nH; $L_2=50$ nH.

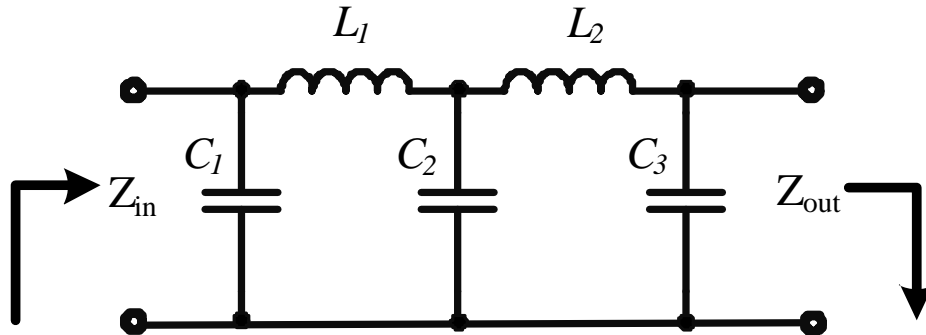


Рисунок 6. Схема ШСУ для АУ AD-44/CW-TA-30-512

Итоговые зависимости КПМ от частоты для различных условий обстановки представлены на рисунке 7. Прерывистыми линиями показаны КПМ АУ с синтезированным ШСУ, а сплошными линиями со штатным ШСУ в различных условиях обстановки.

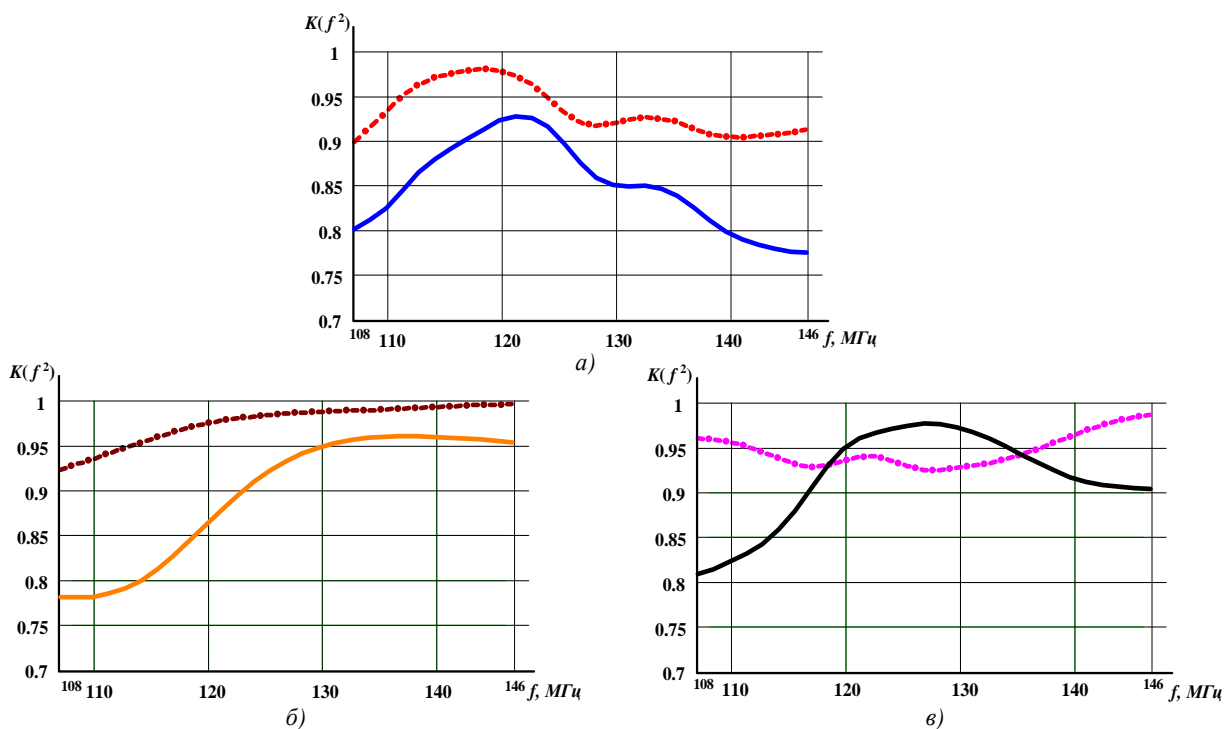


Рисунок 7. Зависимость КПМ от частоты АУ AD-44/CW-TA-30-512: а) в помещении; б) в непосредственной близости с техникой; в) в лесном массиве.

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 потенциально достижимой дальности действия радиолинии для наихудшего случая (расположении АУ в помещении). Потери уровня КПМ относительно максимального значения (исходя из [16, с. 44]) составляют 6,0%, а в

потенциально достижимой дальности действия радиолинии (выражение 2) – 3%. При сравнении с ранее полученными результатами [2] (потери уровня КПМ – 14,9%; потери в потенциально достижимой дальности действия радиолинии – 7,8%). Таким образом, синтезированное ШСУ обеспечивает выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии (2) по сравнению со штатной ШСУ до 5% (в рамках представленных экспериментальных исследований).

Следовательно, использование в качестве критерия выражение (13) в комбинации 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 7). 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 [17, с. 15–16]. В этом можно убедиться исходя из выражения (2) и значений импеданса нагрузки АУ AD-25/CW-3512, 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.

5. Методика синтеза адаптивных широкополосных согласующих устройств на основе аппарата инварианта чувствительности.

Под адаптивным устройством согласования понимают систему с обратной связью, анализирующую качество согласования и подстраивающую свои элементы в сторону улучшения согласования.

Под исполнительным устройством в системе адаптации РТУ будем понимать ШСУ, обеспечивающее наилучшие показатели качества в различных условиях его эксплуатации. Качество данной системы возможно оценивать по критерию (12). В процессе работы РТУ автоматически определяется необходимая информация о текущем возмущающем воздействии и в нужном направлении изменяются параметры адаптивного ШСУ (согласно алгоритму представленного на рисунке 5). Исходя из сказанного, разработан алгоритм работы адаптивного ШСУ (рисунке 8).

Работа алгоритма заключается в нахождении параметров ШСУ, которое обеспечивает выполнение комплексного критерия (выражение 12). В его основе лежит алгоритм, представленный на рисунке 5. Достоинство данного подхода заключается в возможности адаптации ШСУ, которое обеспечивает экстремальное значение критерия оптимальности (12) в различных условиях эксплуатации РТС. Адаптация ШСУ обеспечивается различными структурами цепей и перестройкой (переключением) реактивных элементов в них.

Еще одно немаловажное достоинство подхода – это способность системы согласовывать антенну 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 адаптивное ШСУ, кроме критерия (12), могут накладываться и другие критерии. Например, избирательность ШСУ за полосой согласования или увеличение линейности характеристики группового времени задержки и др.

Следует заметить, что разделение на полосы согласования не может быть безграничным. Ограничения накладывает количество перестраиваемых структур ШСУ, ширина спектра сигнала, а также расположение поддиапазонов работы РТС, внутри которых не могут присутствовать разделения.

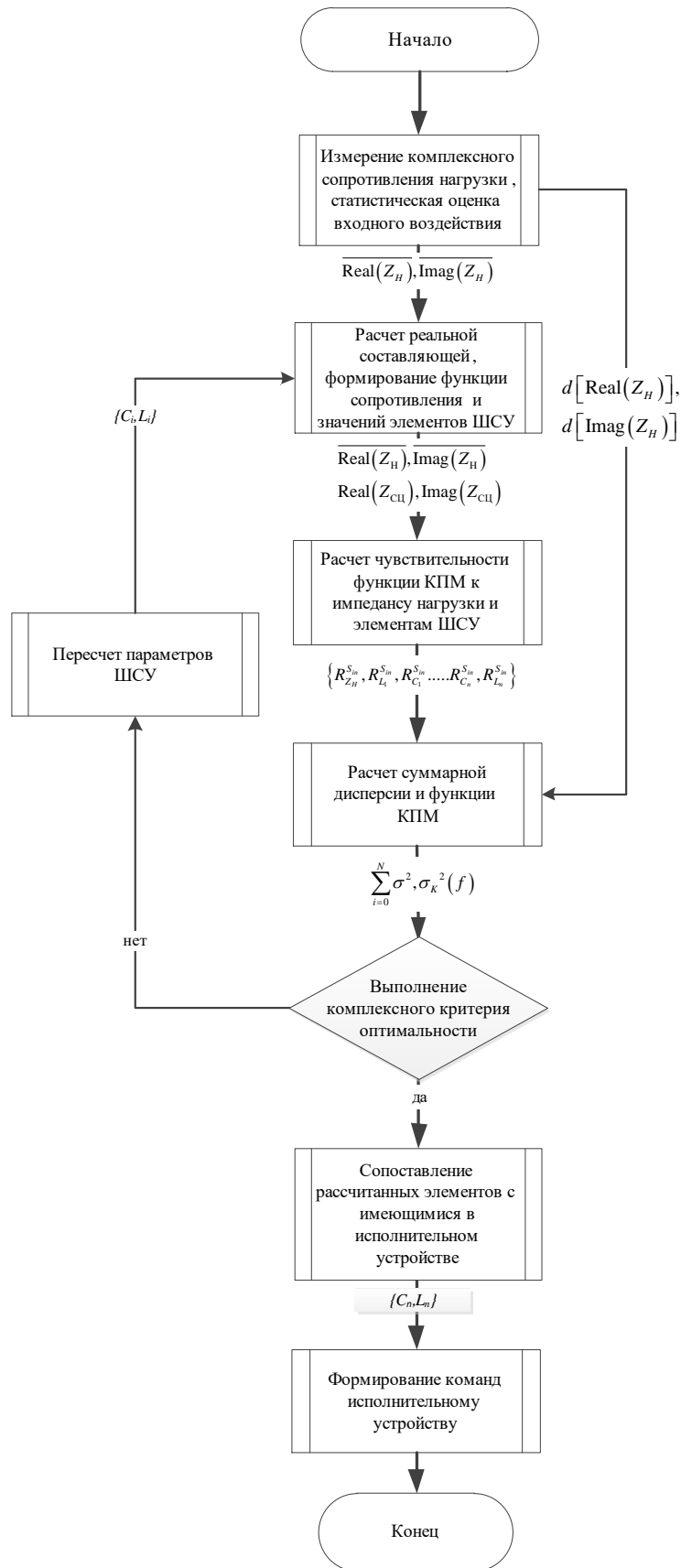


Рисунок 8. Алгоритм работы адаптивного ШСУ

Структурная схема РТС, реализующая алгоритм, представленный на рисунке 8, будет иметь вид.

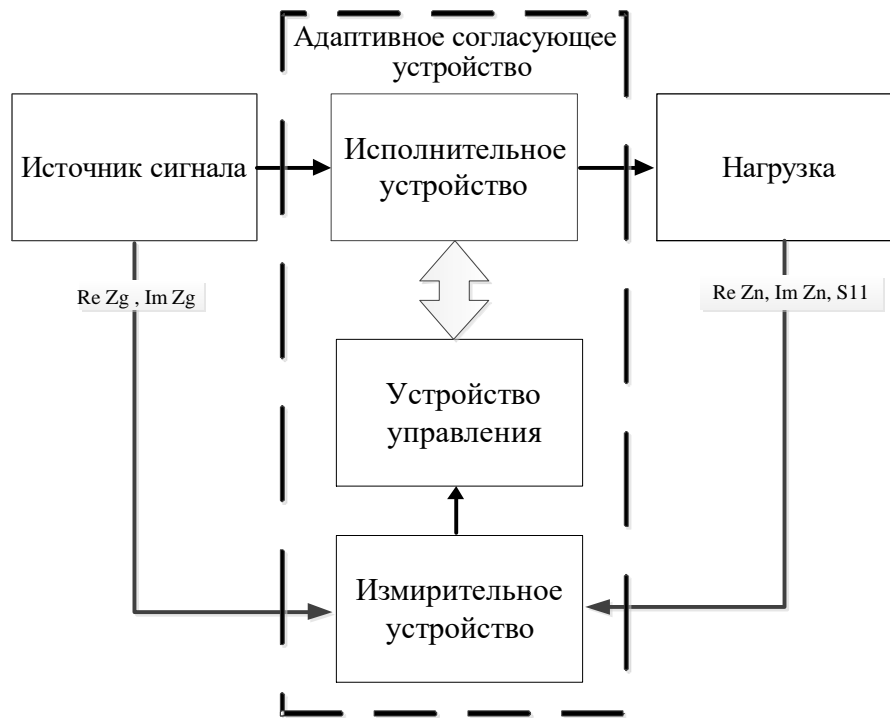


Рисунок 9. Структурная схема РТС с адаптивным ШСУ

Для проверки работоспособности алгоритма (рисунок 8) было синтезировано адаптивное ШСУ, обеспечивающее уровень КПМ, в среднем, не хуже уровня, обеспечивающегося штатным ШСУ в различных условиях обстановки (в помещении, в лесном массиве, в непосредственной близости с техникой). Нагрузкой предлагается использовать АУ AD-25/CW-3512. Для разделения на полосы согласования установим, что АУ работает совместно с радиостанцией Р-181 [1, с. 33]. Рабочие полосы частот: I → от 108 до 146 МГц; II → от 146 до 174 МГц; III → от 220 до 380 МГц; IV → от 380 до 470 МГц; V → от 470 до 512 МГц. Определимся, что структурная схема ШСУ известна и необходимо лишь найти оптимальные значения ее параметров, обеспечивающих экстремальное значение критерия оптимальности (12) в рабочих полосах частот. Моделирование будем проводить в AWR Microwave Studio 14 [15]. Схема исполнительного устройства (ШСУ) представлена на рисунке 10, элементы которого приведены под ряд номиналов E24 и представлены в таблице 1.

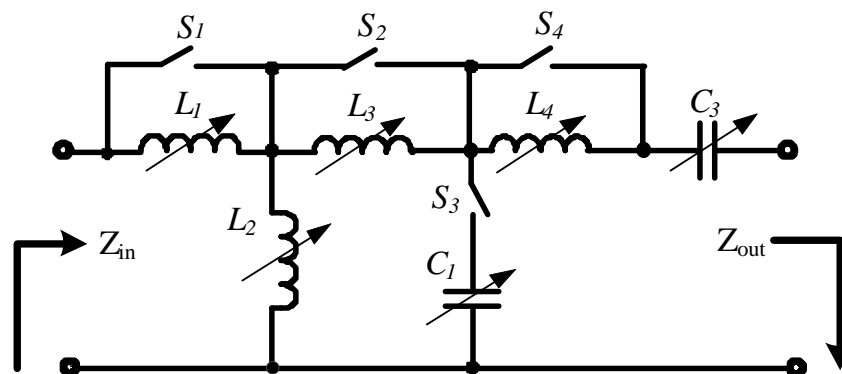


Рисунок 10. Принципиальная схема исполнительного устройства (адаптивного ШСУ)

Таблица 1. Номиналы элементов адаптивного ШСУ

Элементы	Условия эксплуатации														
	В помещении					В лесном массиве					В непосредственной близости с техникой				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
C ₁ ,pФ	680	160	11	220	39	910	360	30	4,7	91	1000	1000	27	130	9.1
L ₁ , пГн	15	11	16	0,15	4,3	36	0,3	0,56	0,2	0,62	33	–	0,47	1,5	8,2
L ₂ , пГн	75	430	27	620	300	270	820	33	1000	430	120	1000	22	27	33
L ₃ , пГн	1.3	0,82	0,43	20	0,82	0,68	36	–	–	0,2	–	–	–	–	0,56
C ₁ , pФ	4.7	33	9,1	7.5	9,1	0,51	27	–	2	0,24	3	20	7,5	8,2	3,3
L ₄ , пГн	1.8	43	–	30	18	2,2	68	–	33	3.9	0,22	36	–	7,5	2,7
C ₂ ,pФ	680	160	11	220	39	910	360	30	4,7	91	1000	1000	27	130	9.1

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

Следует заметить, что принципиальная схема, представленная на рисунке 10, 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 моста измерителя КСВ.

Зависимости КПМ от частоты для различных условий обстановки представлены на рисунке 11. Прерывистыми линиями показаны КПМ АУ со штатным ШСУ, а сплошными линиями с синтезированным ШСУ в различных условиях обстановки.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что представленное адаптивное ШСУ обеспечивает более высокий уровень КПМ при работе радиостанции в различных условиях обстановки. Рассмотрим потери в уровне КПМ и в потенциально достижимой дальности действия радиолинии. Для наихудшего случая (расположении АУ в помещении) потери уровня КПМ относительно максимального значения (исходя из [16, с. 44]) составляют 9,4%, а в потенциально достижимой дальности действия радиолинии (выражение 2) – 4,8%. При сравнении с ранее полученными результатами (потери уровня КПМ – 30,54%; потери в потенциально достижимой дальности действия радиолинии – 16,7%). Таким образом, синтезированное адаптивное ШСУ обеспечивает выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии (2) для радиостанции Р-181 по сравнению со штатной ШСУ до 12% (в рамках представленных экспериментальных исследований).

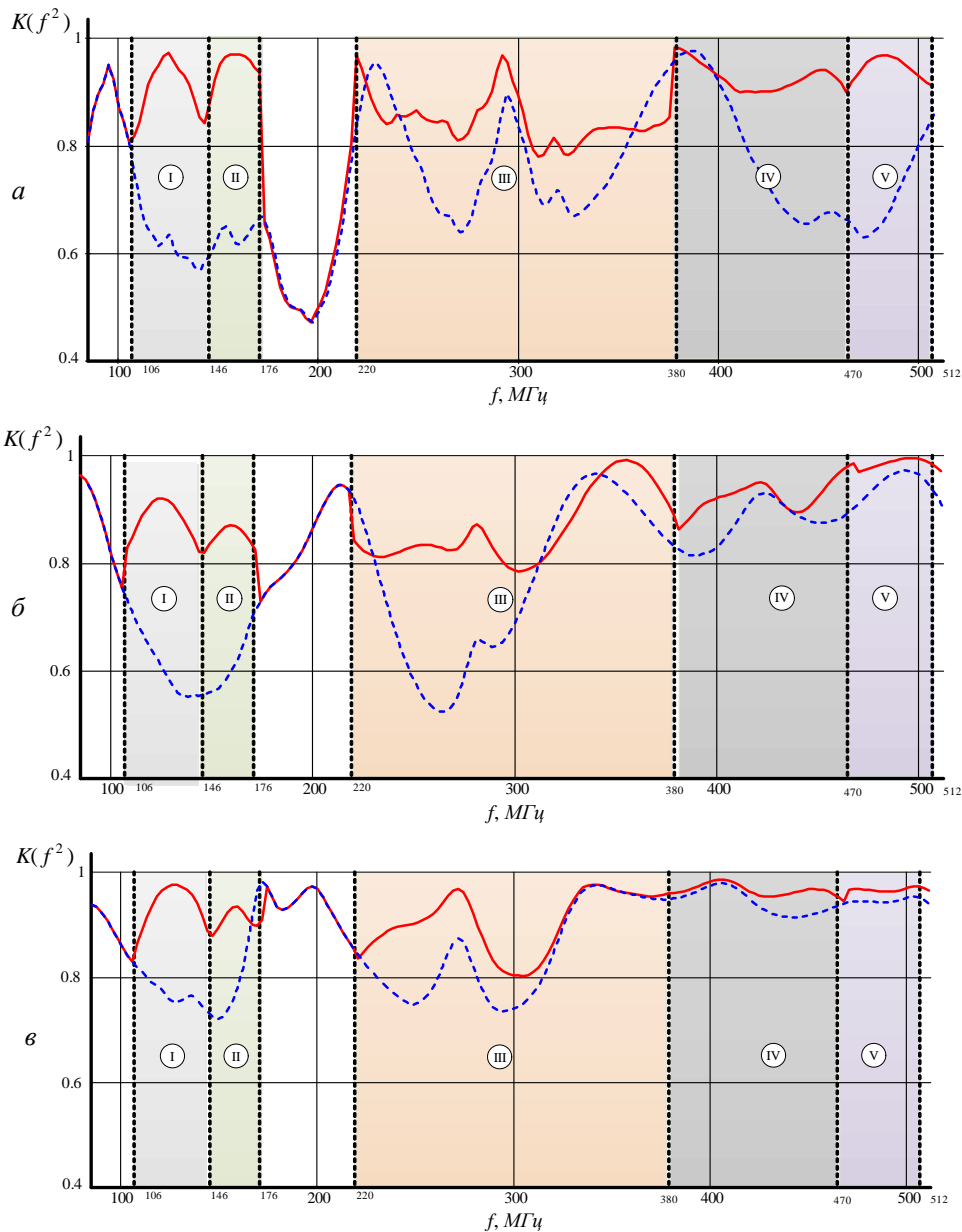


Рисунок 11. Зависимость КПМ от частоты АУ AD-44/CW-TA-30-512: а) в помещении; б) в непосредственной близости с техникой; в) в лесном массиве.

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 данного подхода для АУ AD-44/CW-TA-30-512 было синтезировано ШСУ, обеспечивающее выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии до 5% (для Р-180) по сравнению со штатным ШСУ. Для АУ AD-44/CW-TA-30-512 было синтезировано адаптивное ШСУ, обеспечивающее выигрыш в потенциально достижимой дальности действия радиолинии до 12% (для Р-181) в рабочем диапазоне частот по сравнению со штатным ШСУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дик, А. М. Кашкаров А. В., Макатерчик А. В. Радиостанции малой и средней мощности / А. М. Дик, А. В. Кашмаров, А.В. Макатерчик. – 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] Trival antene. Datasheet AD-44/CW-TA-30-512. – Slovenia, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trival-antennas-masts.com/sites/default/files/brochures/ad-44-cw-ta-30-512ang.pdf> (дата обращения: 05.11.2020).
- [4] Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512. – Slovenia, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trival-antennas-masts.com/sites/default/files/brochures/AD-25-CW-3512%20ANG.pdf> (дата обращения: 05.11.2020).
- [5] Косачев, И. М. Методики расчета показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники / И. М. Косачев, Д. С. Нефедов // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – Минск, 2015. – №1(46). – С. 107–135.
- [6] Антенно-фидерные устройства систем сухопутной подвижной радиосвязи. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерения: ГОСТ 30783-2001. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007.
- [7] XIII Машеровские чтения: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 18 октября 2019 г. – Витебск: ВГУ имени П.М.Машерова, 2019. – С. 18-20.
- [8] Руководство по эксплуатации радиостанции Р-180 КЛСИ.46.464429.002РЭ.
- [9] Гришин, В. П. Радиотехнические системы. / В. И. Гришин, Ю. М. Ипатов, Ю. М. Казаринов: [и др.]. – М., 1990. – 496 с.
- [10] Гехер, К., ред: Ю. Л. Хотунцева. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М. Сов. радио. 1973.
- [11] Хьюдсман Л. П. Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л. П. Хьюдсман, Ф. Е. Аллен. – Будапешт, 1973, 200 с.
- [12] Филиппович, Г. А. Широкополосное согласование сопротивлений / Г. А. Филиппович. – Минск, 2004.
- [13] 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.
- [14] Yarman, B. S. Design of ultra wideband antenna matching networks / B. S. Yarman. – Istanbul: Springer, 2008. – 308 с.
- [15] Руководство по MWO: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA –2018.
- [16] Ланнэ, А. А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей / А. А. Ланнэ. – М. : Связь, 1969. – 294 с.
- [17] Небылов, А. В., Гарантирование точности управлени / А. В. Небылов.– М: Наука. Физматлит, 1998–293 с.

REFERENCES

- [1] Dik, A. M. Kashkarov A. V., Makaterchik A. V. Radiostancii maloj i srednej moshhnosti / A. M. Dik, A. V. Kashmarov, A.V. Makaterchik. – Minsk: BGUIR, 2014. – 108 s.
- [2] Bojkachev, P. V. Rezul'taty issledovanija vlijaniya uslovij jekspluatacii na impedans antennyh ustrojstv radiostancij OVCh/UVCh diapazonov / P. V. Bojkachev, I. A. Dubovik, V. O. Isaev // «Vestnik» VARB. – 2019. – №2(63). – S. 32–40.
- [3] Trival antene. Datasheet AD-44/CW-TA-30-512. – Slovenia, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trival-antennas-masts.com/sites/default/files/brochures/ad-44-cw-ta-30-512ang.pdf> (дата обращения: 05.11.2020).
- [4] Trival antene. Datasheet AD-25/CW-3512. – Slovenia, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trival-antennas-masts.com/sites/default/files/brochures/AD-25-CW-3512%20ANG.pdf> (дата обращения: 05.11.2020).
- [5] Kosachev, I. M. Metodiki rascheta pokazatelej dostovernosti i tochnosti ocenivaemyh taktiko-tehnicheskikh harakteristik vooruzhenija, voennoj i special'noj tehnik / I. M. Kosachev, D. S. Nefedov // Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus'. – Minsk, 2015. – №1(46). – S. 107–135.
- [6] Antenno-fidernye ustrojstva sistem suhoputnoj podvizhnoj radiosvjazi. Tipy, osnovnye parametry, tehnicheckie trebovanija i metody izmerenija: GOST 30783-2001. – Minsk : Gosstandart Respubliki Belarus', 2007.

- [7] XIII Mashеровские chtenija: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Vitebsk, 18 oktjabrja 2019 g. – Vitebsk: VGU imeni P.M.Masherova, 2019. - S. 18-20.
- [8] Rukovodstvo po jekspluatacii radiostancii R-180 KLSI.46.464429.002RJe.
- [9] Grishin, V. P. Radiotekhnicheskie sistemy. / V. I. Grishin, Ju. M. Ipatov, Ju. M. Kazarinov: [i dr.].– M., 1990.– 496 s.
- [10] Geher, K., red: Ju. L. Hotunceva. Teorija chuvstvitel'nosti i dopuskov jelektronnyh cepej. M.Sov. radio. 1973.
- [11] H'judsman L. P. Vvedenie v teoriju i raschet aktivnyh fil'trov / L. P. H'judsman, F. E. Allen. – Budapesht, 1973, 200 s.
- [12] Filippovich, G. A. Shirokopolosnoe soglasovanie soprotivlenij / G. A. Filippovich. – Minsk, 2004.
- [13] Adaptivnoe soglasovanie shirokopolosnyh radiotekhnicheskikh ustrojstv k izmenjajushhemusja impedansu nagruzki / I. A. Dubovik, P. V. Bojkachev, V. O. Isaev, M. A. Jancevich // Mezhdunar. nauch. konf. po voen.-tehn. problemam, problemam oborony i bezopasnosti, ispol'zovanija tehnologij dvojnogo primenenija.: sb. nauch. statej 8-j Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 16–17 maja 2017 g. Minsk, 2019. – C. 50–53.
- [14] Yarman, B. S. Design of ultra wideband antenna matching networks / B. S. Yarman. – Istanbul: Springer, 2008. – 308 c.
- [15] Rukovodstvo po po MWO: NI AWR Design Environment v14 Edition. El Segundo, CA –2018.
- [16] Lannje, A. A. Optimal'nyj sintez linejnyh jelektricheskikh cepej / A. A. Lannje. – M. : Svjaz', 1969. – 294 s.
- [17] Nebylov, A. V., Garantirovanie tochnosti upravleni / A. V. Nebylov.– M: Nauka. Fizmatlit, 1998–293 s.

П.В. Бойкачев, А.А. Ержан*, И.А. Дубовик, В.О. Исаев, А.А. Сутько

Беларусь Республикасының Әскери академиясы

*e-mail: a.erzhan@aes.kz

UHF/VHF ДИАПАЗОНЫНЫҢ КЕҢ ЖОЛАҚТЫ АНТЕННАЛАРЫ ҮШІН АДАПТИВТІ ҮЙЛЕСТІРУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН СИНТЕЗДЕУ ӘДІСІ

Андатпа. Ауқымдардың негізгі артықшылықтары (30-512 МГц) – бұл әсіресе қала сыртында қолданылатын үлкен байланыс. Мұндай диапазондардың радиостанциялары аз оқшауланған жерлерде де, көп қабатты ғимараттарда да жақсы жұмыс істейді. Радиостанцияларда сигналдың ең жоғары қуатын көзден жүктемеге беруді қамтамасыз ететін кең жолақты үйлестіру құрылғылары (кең жолақты басқару жүйелері) пайдаланылады. Олар, әдетте, белгіленген параметр мәндері бар күрделі жүктемелер үшін оңтайлы. Айта кететін жйіт, жүктеме кедергісі белгілі бір дәрежеде уақыт өте келе өзгереді. Осы себепті, КЖЖБ (Кең жолақты жүйелерді басқару) әдетте қатаң мағынада оңтайлы болмайды. КЖЖБ -мен келісілген радиотехникалық жүйенің параметрлері Оңтайлы мәндерден біршама ерекшеленеді. Бұл қолданылатын КЖЖБ квази-оптималды дегенді білдіреді. Мақалада радиотехникалық жүйелерді жүктеменің өзгеретін кедергісіне бейімдейтін кең жолақты үйлестіру құрылғыларын синтездеу әдісі ұсынылған.

Негізгі сөздер: бейімделу, сәйкес құрылғы, радиоавтоматика, кең жолақты құрылғылар.

P.V. Boicachov, A.A. Yerzhan*, I.A. Dubovik, V.O. Isaev, A.A. Sutko

Military Academy of the Republic of Belarus

*e-mail: a.erzhan@aes.kz

METHOD OF SYNTHESIS OF ADAPTIVE MATCHING DEVICES FOR BROADBAND UHF/VHF ANTENNAS

Abstract. The main advantages of the (30-512 MHz) bands are the long communication range, especially used outside the city. Radio stations of such bands work perfectly both in low-terrain areas and in multi-storey buildings. In radio stations, broadband matching devices (Broadband control systems) are used to ensure the transmission of the maximum signal power from the source to the load. They are usually optimal for complex loads with fixed parameter values. It should be noted that the load impedance, to varying degrees, varies over time. For this reason, the BCS is usually not strictly optimal. The parameters of the matched radio engineering system (Radio engineering communications) with the BCS differ slightly from the optimal values. This suggests that the BCS used are quasi-optimal. The article proposes a method for the synthesis of broadband matching devices that adapt radio engineering systems to the changing load impedance.

Keywords: adaptation, matching device, radio automation, broadband devices.