

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА
АНТЕННЫМ СОГЛАСУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
ЭЛЕМЕНТОВ НАСТРОЙКИ**

В. М. Жуков

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR AN ANTENNA
MATCHING DEVICE WITH DISTRIBUTED PARAMETERS
OF CONFIGURATION ELEMENTS**

V. M. Zhukov

Аннотация. *Актуальность и цели.* Радиопередатчик является самым массогабаритным и энергоемким устройством радиостанции, энергетическая эффективность которой зависит в основном от точности согласования выхода радиопередатчика с антенной, обеспечиваемой информационно-управляющей системой антенным согласующим устройством. Цель работы – повышение точности настройки согласующего устройства при низких коэффициентах бегущей волны в антенном фидере, определение зависимости значений младших разрядов элементов настройки от исходного коэффициента бегущей волны и снижение трудоемкости расчетов при проектировании антенных согласующих устройств и устройств управления ими. *Методы.* Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с распределенными параметрами элементов настройки представляет собой объект исследования. Предмет исследования – точность настройки согласующего устройства. Использован метод круговых диаграмм на плоскости комплексных сопротивлений в полярной системе координат из теорий электрических и радиотехнических цепей. *Результаты и выводы.* Разработаны алгоритм работы и математическое обеспечение информационно-управляющей системы дискретным антенным согласующим устройством с распределенными параметрами элементов настройки. Предложен способ повышения точности настройки антенного согласующего устройства при низких значениях коэффициента бегущей волны в антенно-фидерном тракте. Получены графики, характеризующие связь между минимальным коэффициентом бегущей волны в антенном фидере и допустимой погрешностью установки длинной линии. Параметром кривых на графиках является значение активной проводимости на входе согласующего устройства. Требования к информационно-управляющей системе по погрешности установки длинной линии и шлейфа тем выше, чем ниже коэффициент бегущей волны в антенном фидере.

Ключевые слова: алгоритм поразрядного уравнивания, диаграмма Смита, длинная линия, коэффициент отражения, коэффициент бегущей волны, область согласования, точность настройки, шлейф.

Abstract. *Subject and goals.* The radio transmitter is the most mass-dimensional and energy-intensive device of a radio station, the energy efficiency of which depends mainly on the accuracy of matching the output of the radio transmitter with the antenna provided by the information and control system of the antenna matching device. The purpose of this work is to improve the accuracy of tuning the matching device at low traveling wave coef-

ficients in the antenna feeder, to determine the dependence of the values of the lowest bits of the tuning elements on the initial coefficient of traveling wave, and to reduce the complexity of calculations when designing antenna matching devices and their control devices. *Methods.* The information and control system of an antenna matching device with distributed parameters of tuning elements is an object of research. The subject of the study is the accuracy of setting the matching device. The method of pie charts on the plane of complex resistances in the polar coordinate system is used. *Results and conclusions.* The algorithm of operation and mathematical support of the information and control system by a discrete antenna matching device with distributed parameters of tuning elements are developed. A method for improving the accuracy of tuning an antenna matching device at low values of the traveling wave coefficient in the antenna-feeder path is proposed. Graphs are obtained that characterize the relationship between the minimum traveling wave coefficient in the antenna feeder and the permissible error of setting a long line. The parameter of the curves in the graphs is the value of the active conductivity at the input of the matching device. The lower the traveling wave coefficient in the antenna feeder, the higher the requirements for the information and control system for the installation error of the long line and loop.

Keywords: bitwise balancing algorithm, Smith diagram, long line, reflection coefficient, traveling wave coefficient, matching area, tuning accuracy, loop.

Введение

Дискретные антенные согласующие устройства (АСУ) с распределенными параметрами элементов настройки (АСУ на длинных линиях) применяются при использовании радиостанций в жестких климатических условиях, например при изменениях температуры от минус 50 °С до плюс 50 °С, так как размеры длинной линии и шлейфа, а следовательно, их электрические параметры при температурных колебаниях изменяются незначительно в отличие от АСУ, переменные элементы настройки которых выполнены на дискретных катушках индуктивности и конденсаторах. Это в первую очередь касается конденсаторов с номиналами емкости, имеющими большие значения температурных коэффициентов емкости. Несмотря на увеличение количества высокочастотных коммутаторов, такие АСУ со своими информационно-управляющими системами (ИУС) находят широкое применение [1].

Разработчикам ИУС АСУ указанных радиостанций, в том числе и автору, приходилось достаточно долго экспериментально набирать статистику входных комплексных сопротивлений антенн, чтобы на каждой частоте рассчитать значения элементов настройки АСУ, потом выбрать из них минимальные и максимальные, определить количество рабочих разрядов и исходя из допустимой погрешности настройки рассчитать значения младших разрядов. Полученные формулы позволяют сократить трудоемкость расчета АСУ и определить алгоритм работы ИУС, используя минимально возможное значение коэффициента бегущей волны (КБВ) в антенном фидере.

В теориях электрических и радиотехнических цепей широко применяется круговая диаграмма параметров электрических цепей в полярных координатах, называемая в разных странах именами разных авторов. В Японии это диаграмма Т. Мицухаши [2], в западных странах – диаграмма Р. Смита [3], в России – диаграмма А. Р. Вольперта [4]. Будем называть ее диаграммой Смита, поскольку это самое распространенное название.

Алгоритм управления антенным согласующим устройством

Разработаем алгоритм работы и математическое обеспечение ИУС дискретным АСУ, область согласования которого ограничена окружностью. Полагаем, что значением минимально возможного КБВ k_{\min} в антенном фидере полностью определяются все возможные значения входных сопротивлений антенн, характеризуемые модулем и фазой комплексного коэффициента отражения и нанесенные на круговую диаграмму сопротивлений в полярных координатах (диаграмму Смита) (рис. 1).

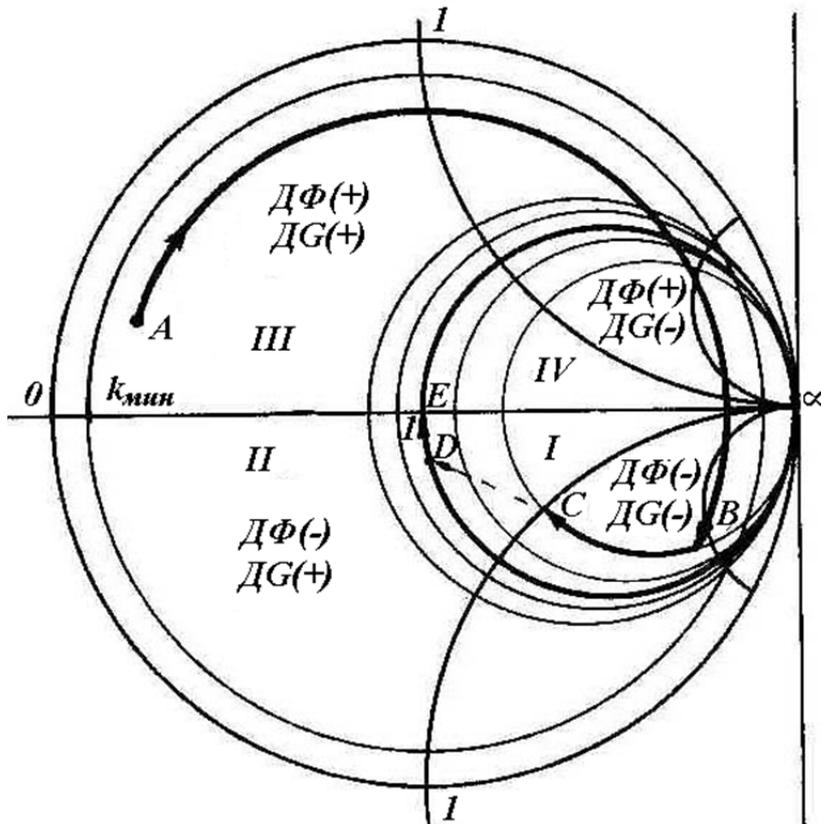


Рис. 1. Диаграмма Смита с алгоритмом работы информационно-управляющей системы антенным согласующим устройством

Согласующий четырехполюсник должен трансформировать любое комплексное сопротивление из этих значений в активное сопротивление нагрузки усилителя мощности. На рисунке 2 приведена упрощенная схема согласующего устройства с распределенными параметрами элементов настройки, у которого зона согласования представляет собой круг на диаграмме Смита, ограниченный окружностью минимального КБВ в антенном фидере.

Переменными дискретными элементами настройки данного АСУ являются длинная линия ДЛ и шлейф ШЛ, который на конце разомкнут и электрическая длина которого менее четверти длины волны на рабочей частоте.

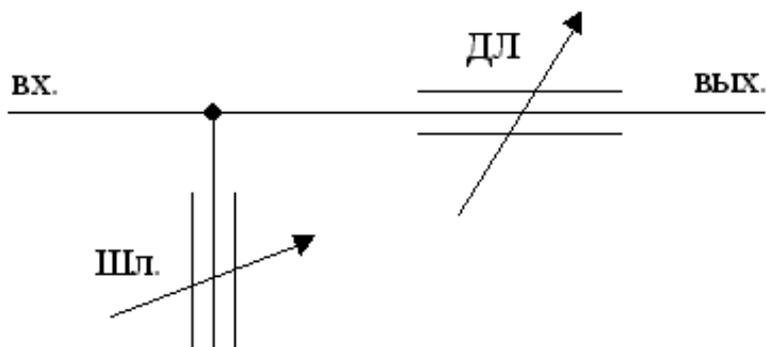


Рис. 2. Принципиальная схема антенного согласующего устройства с распределенными параметрами элементов настройки

В работе [5] показано, что для того, чтобы два кольца регулирования ИУС АСУ работали поочередно автономно, нужно датчик активной проводимости ДГ и датчик фазы ДФ подключать к его входу и осуществлять по ним управление элементами данного АСУ.

Используемая круговая диаграмма Смита может служить инструментом наглядного представления алгоритма работы ИУС в процессе управления АСУ.

Разными комбинациями управляющих сигналов (знаков выходных сигналов датчиков ИУС) область согласования АСУ делится на зоны I, II, III, IV (см. рис. 1) в пределах окружности минимального КБВ k_{\min} . Эти комбинации будут определяться табл. 1 при выполнении условия, что знак значений напряжения ДГ положителен с внешней стороны окружности единичной проводимости, а знак значений напряжения ДФ положителен в верхней полуплоскости диаграммы.

Таблица 1

Датчики	Знаки напряжений датчиков			
	I зона	II зона	III зона	IV зона
ДГ	–	+	+	–
ДФ	–	–	+	+

Точка А, являющаяся входным сопротивлением АСУ, перемещается при переходном процессе ИУС по траектории ABCDE на рис. 1.

Начальные значения элементов настройки – минимальные.

ИУС производит автоматическую настройку АСУ в соответствии с алгоритмом поразрядного взвешивания (уравновешивания) [1, 6]. Сначала осуществляется установка длинной линии по значениям напряжения ДГ и ДФ (участок траектории АВ). В первой зоне ИУС включает разряд шлейфа, который является старшим в рабочем поддиапазоне (траектория ВС). Коэффициент бегущей волны на входе согласующего устройства увеличивается, что приводит к повышению разрешающей способности ДГ при низких КБВ в зоне Q (рис. 3). Это техническое решение по повышению точности согласования выхода радиопередающего устройства с антенной можно отнести к координированным способам управления АСУ [7].

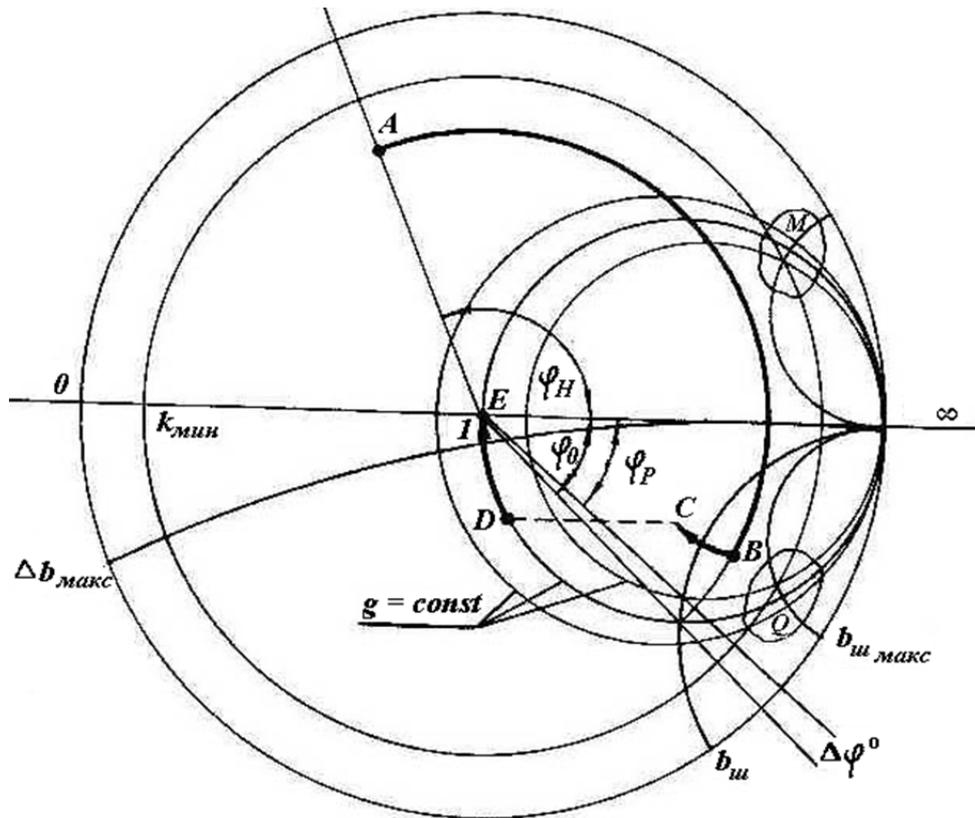


Рис. 3. Способ управления антенным согласующим устройством при низких коэффициентах бегущей волны

Разработка математического обеспечения информационно-управляющей системы антенным согласующим устройством

Разработку математического обеспечения ИУС АСУ начнем с определения минимального количества исходных данных, требуемых для успешного решения поставленной задачи. В нашем случае будет достаточно: 1) диапазона частот радиостанции; 2) минимально возможного значения КБВ в антенно-фидерном тракте; 3) допустимой погрешности настройки.

Связь составляющих комплексной проводимости и модуля коэффициента отражения определяется формулой

$$p = \sqrt{\frac{(g_{\text{вх}} - 1)^2 + b_{\text{вх}}^2}{(g_{\text{вх}} + 1)^2 + b_{\text{вх}}^2}}, \quad (1)$$

где p – модуль комплексного коэффициента отражения; $g_{\text{вх}}$ – активная составляющая проводимости; $b_{\text{вх}}$ – реактивная составляющая проводимости [8].

На круговой диаграмме для окружности $g_{\text{вх}} = 1$ справедлива формула

$$p = \sqrt{\frac{b_{\text{вх}}^2}{4 + b_{\text{вх}}^2}}. \quad (2)$$

Связь модуля коэффициента отражения p и КБВ k выражается следующей формулой [8]:

$$p = \frac{1-k}{1+k}. \quad (3)$$

Заменив в формуле (2) p на k , получим выражение зависимости относительной проводимости шлейфа от величины КБВ антенны:

$$b_{\text{шл}} = \frac{1-k}{\sqrt{k}}. \quad (4)$$

Фаза коэффициента отражения и комплексные составляющие входной проводимости АСУ связаны выражением

$$\varphi_p = \arctg \frac{2b_{\text{вх}}}{g_{\text{вх}}^2 + b_{\text{вх}}^2 - 1}. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) определяется электрическая длина шлейфа l_1 :

$$l_1 = \frac{\lambda}{120^\circ} \left[180^\circ - \arctg \frac{2(1-k)\sqrt{k}}{(1-k)^2 - k} \right]. \quad (6)$$

При КБВ = k_{min} длина шлейфа будет максимальной и определяется формулой

$$l_{1\text{max}} = \frac{\lambda_{\text{max}}}{120^\circ} \left[180^\circ - \arctg \frac{2(1-k_{\text{min}})\sqrt{k_{\text{min}}}}{(1-k_{\text{min}})^2 - k_{\text{min}}} \right], \quad (7)$$

где λ_{max} – длина волны минимальной частоты диапазона.

Когда шлейф отключен и $g = 1$, на входе АСУ фаза коэффициента отражения равна

$$\varphi_0 = \arctg \frac{2}{b_{\text{шл}}} = \arctg \frac{2\sqrt{k}}{1-k}. \quad (8)$$

С учетом формулы (8) находим величину электрической длины линии l_2 :

$$l_2 = \frac{\lambda}{120^\circ} \left(\varphi_H + \arctg \frac{2\sqrt{k}}{1-k} \right). \quad (9)$$

Значение φ_H поясняется рис. 3.

Наибольшая длина длинной линии потребуется на нижней частоте диапазона, где длина волны максимальна:

$$l_{2\text{max}} = \lambda_{\text{max}}. \quad (10)$$

Разряды элементов настройки АСУ являются убывающей со старшего разряда геометрической прогрессией, сумма членов которой

$$\Sigma_p = A(1 + d + d^2 + d^3 + \dots + d^n), \quad (11)$$

при старшем члене A , числе членов n , коэффициенте ряда d .

В убывающем ряде:

$$d_y = \frac{1+\delta}{2}, \quad (12)$$

где d_y – коэффициент убывающего ряда; δ – погрешность разрядов.

Для возрастающего ряда:

$$d_b = \frac{2}{1+\delta}, \quad (13)$$

где d_b – коэффициент возрастающего ряда.

Зависимость точности установки линии по относительной величине $g_{\text{вх}}$ от величины младшего разряда и КБВ антенны определяется следующим образом. Для алгоритма поразрядного уравнивания ИУС максимум погрешности длинной линии равен половине младшего разряда линии, и после регулировки линии входная проводимость АСУ будет близка к выражению

$$b_{\text{вх}} \approx \frac{1-k}{\sqrt{k}}. \quad (14)$$

Подставим данное выражение в формулу (5) и после небольших преобразований получим:

$$\varphi_p \approx \arctg \frac{2(1-k)\sqrt{k}}{kg_{\text{вх}}^2 + (1-k)^2 - k}. \quad (15)$$

Из уравнений (8) и (15) можно получить формулу для определения фазовой погрешности установки длинной линии:

$$\Delta\varphi^0 = \varphi_0 - \varphi_p = \arctg \frac{2\sqrt{k}}{1-k} - \arctg \frac{2(1-k)\sqrt{k}}{kg_{\text{вх}}^2 + (1-k)^2 - k}. \quad (16)$$

Связь между минимальным КБВ в антенном фидере и погрешностью установки длинной линии $\Delta\varphi^0$ (см. рис. 3) показана в виде графиков параметрических кривых (рис. 4). Параметром кривых является заданная по относительной величине g погрешность установки линии.

Исходя из минимальной длины волны диапазона радиостанции $\lambda_{\text{мин}}$ и допустимой фазовой погрешности установки ДЛ определяем электрическую длину младшего разряда:

$$\Delta l_2 = \frac{\Delta\varphi^0 \cdot \lambda_{\text{мин}}}{120^\circ}. \quad (17)$$

Аналогично находится формула для определения минимальной длины младшего разряда шлейфа Δl_1 :

$$\Delta l_1 = \frac{\lambda_{\text{мин}}}{120^\circ} \left[\arctg \frac{2(b_{\text{ш, макс}} - \Delta b_{\text{ макс}})}{(b_{\text{ш, макс}} - \Delta b_{\text{ макс}})^2 - 1} - \arctg \frac{2b_{\text{ш, макс}}}{b_{\text{ш, макс}}^2 - 1} \right], \quad (18)$$

где значение $b_{\text{ш, макс}}$ определяется из выражения

$$b_{\text{ш, макс}} = \frac{1-k_{\text{мин}}}{\sqrt{k_{\text{ макс}}}}. \quad (19)$$

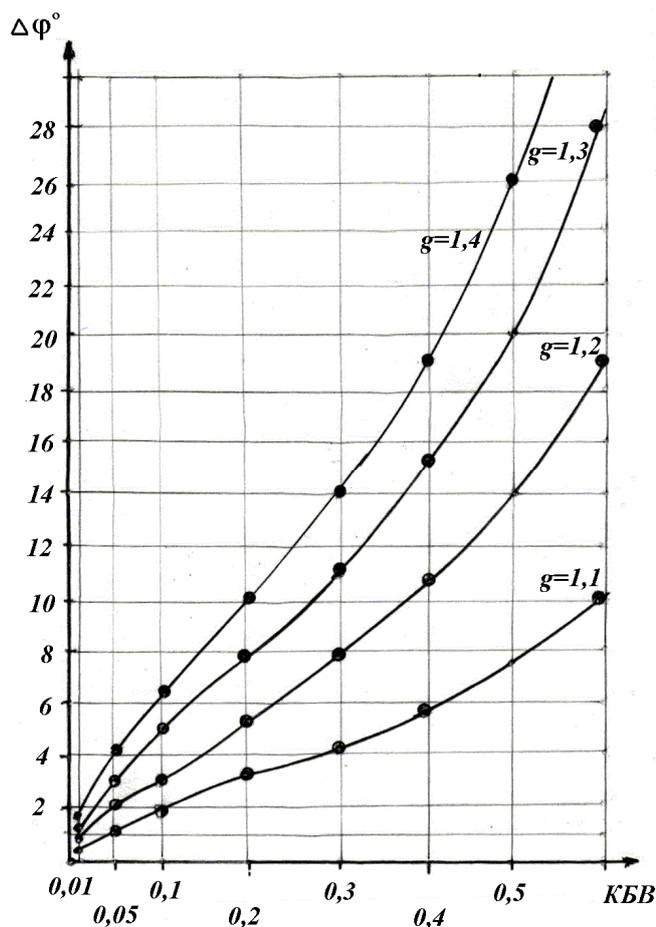


Рис. 4. Графики параметрических кривых

Выводы

Из анализа алгоритма работы, полученных формул, графиков (см. рис. 4), разработанных с применением диаграммы Смита, можно сделать вывод о том, что чем ниже коэффициент бегущей волны в антенном фидере, тем выше требования к ИУС по погрешности установки длинной линии и шлейфа при одной и той же допустимой погрешности настройки антенного согласующего устройства.

Библиографический список

1. Радиостанция P-166. – URL: armsdata.net/russia/0283.html.
2. Mizuhashi, T. Theory of four-terminal impedance transformation circuit and matching circuit / T. Mizuhashi // The Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan. – 1937. – Vol. 20, № 12. – P. 1053–1058.
3. Smith, P. H. Transmission Line Calculator / P. H. Smith // Electronics. – 1939. – Vol. 12, № 1. – P. 29–31.
4. Вольперт, А. Р. Номограмма для расчета длинных линий / А. Р. Вольперт // Производственно-технический бюллетень НКЭП. – 1940. – № 2. – С. 14–18.

5. Жуков, В. М. Структурная схема, принцип работы и датчики автоматизированного согласующего устройства / В. М. Жуков, А. В. Суспицын // Магистратура Тамбовского государственного технического университета : сб. науч. ст. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – В. 26. – С. 251–255.
6. Беседин, А. Б. Способ повышения точности автонастройки фильтро-согласующего устройства / А. Б. Беседин, В. М. Жуков, А. В. Пугин // Антенны. – 2010. – В. 11 (162). – С. 9–11.
7. Кнеллер, В. Ю. Принципы построения и вопросы теории преобразователей параметров комплексных величин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Кнеллер В. Ю. – Москва, 1971. – 32 с.
8. Завражнов, Ю. В. Усилители мощности, автогенераторы, умножители частоты для радиопередатчиков подвижной связи / Ю. В. Завражнов. – Воронеж : ВГТУ, 2007. – 172 с.

References

1. Radiostantsiya R-166 [Radio station R-166]. Available at: armsdata.net/russia/0283.html. [In Russian]
2. Mizuhashi T. *The Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan*. 1937, vol. 20, no. 12, pp. 1053–1058.
3. Smith P. H. *Electronics*. 1939, vol. 12, no. 1, pp. 29–31.
4. Vol'pert A. R. *Proizvodstvenno-tekhnicheskiy byulleten' NKEP* [NCEP Production and Technical Bulletin]. 1940, no. 2, pp. 14–18. [In Russian]
5. Zhukov V. M., Suspitsyn A. V. *Magistratura Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. st.* [Master's degree program of Tambov State Technical University: collection of scientific articles]. Tambov: TGTU, 2012, vol. 26, pp. 251–255. [In Russian]
6. Besedin A. B., Zhukov V. M., Pugin A. V. *Antenny* [Antennas]. 2010, vol. 11 (162), pp. 9–11. [In Russian]
7. Kneller V. Yu. *Printsipy postroeniya i voprosy teorii preobrazovateley parametrov kompleksnykh velichin: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Principles of construction and questions of the theory of converters of parameters of complex quantities: abstract of dissertation of the doctor of technical sciences]. Moscow, 1971, 32 p. [In Russian]
8. Zavrazhnov Yu. V. *Usiliteli moshchnosti, avtogeneratory, umnozhiteli chastoty dlya radioperedatchikov podvizhnoy svyazi* [Power amplifiers, auto generators, frequency multipliers for mobile radio transmitters]. Voronezh: VGTU, 2007, 172 p. [In Russian]

Жуков Валентин Михайлович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: zhukov.val3ntin@yandex.ru

Zhukov Valentin Mikhaylovich
candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of radioelectronic
and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Образец цитирования:

Жуков, В. М. Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с распределенными параметрами элементов настройки / В. М. Жуков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 4 (36). – С. 79–87. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-4-8.