

**МЕТОД СИНТЕЗА МОСТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ И ДАТЧИКОВ
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
АНТЕННЫМИ СОГЛАСУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ**

Статья поступила в редакцию 19.08.2020, в окончательном варианте – 02.09.2020.

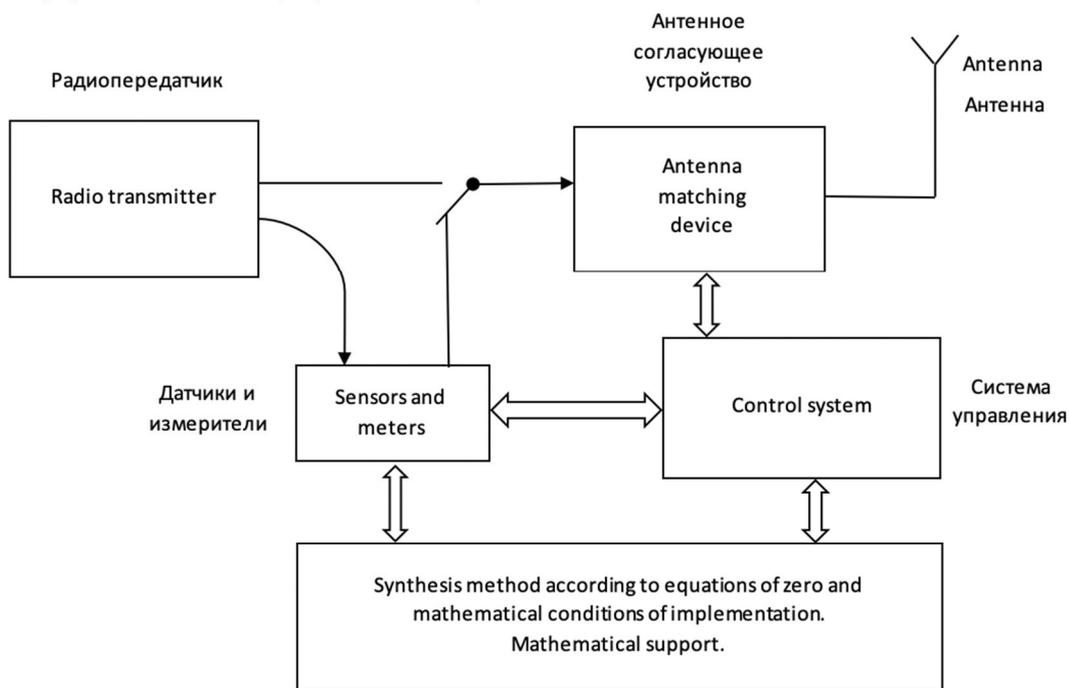
Жуков Валентин Михайлович, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106, кандидат технических наук, e-mail: zhukov.val3ntin@yandex.ru

Муромцев Дмитрий Юрьевич, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106, доктор технических наук, e-mail: mdjur@mail.ru

Разработан метод синтеза мостовых датчиков и измерителей переменного тока, использующихся в информационно-измерительных и управляющих системах антенными согласующими устройствами радиостанций различных диапазонов. Метод заключается в определении уравнений нуля и математических условий реализации датчика или измерителя, по которым разрабатывается электрическая схема прибора и основан на анализе векторных диаграмм напряжений и токов четырех плечевого резистивного моста переменного тока. Синтезированные по данному методу схемы таких устройств конструктивно легче реализуемы в более широком диапазоне частот, в них легче производить обработку информации на промежуточной частоте, в результате чего они более помехоустойчивы и имеют меньшую погрешность. Приводится универсальная схема, в которой на основе резистивного моста реализуются избирательные измерители и датчики, теория которых рассмотрена в статье.

Ключевые слова: активное сопротивление, векторная диаграмма, годограф, комплексный коэффициент отражения, модуль, проводимость, реактивное сопротивление, уравнение нуля, условие реализации, фаза

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Метод синтеза по уравнениям нуля и
математическим условиям реализации.
Математическое обеспечение.

METHOD OF SYNTHESIS OF BRIDGE METERS AND SENSORS FOR INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS WITH ANTENNA MATCHING DEVICES

The article was received by the editorial board on 19.08.2020, in the final version – 02.09.2020.

Zhukov Valentin M., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: zhukov.val3ntin@yandex.ru

Muromtsev Dmitry Yu., Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: mdjur@mail.ru

A method has been developed for the synthesis of bridge sensors and alternating current meters used in information-measuring and control systems with antenna matching devices of radio stations of various ranges. The method consists in determining the equations of zero and the mathematical conditions for the implementation of the sensor or meter, according to which the electrical circuit of the device is developed and is based on the analysis of vector diagrams of voltages and currents of a four-arm resistive AC bridge. The circuits of such devices synthesized by this method are structurally easier to implement in a wider frequency range, it is easier to process information in them at an intermediate frequency, as a result of which, they are more noise-resistant and have a smaller error. A universal circuit is presented, in which selective meters and sensors are implemented on the basis of a resistive bridge, the theory of which is considered in the article.

Key words: active resistance, vector diagram, hodograph, complex reflection coefficient, modulus, conductivity, reactance, zero equation, implementation condition, phase.

Введение. В информационно-измерительных и управляющих системах (ИИУС) антенными согласующими устройствами (АСУ) применяются датчики и измерители, определяющие знаки и величины:

- модуля комплексного сопротивления (ДМ);
- реактивной составляющей комплексного сопротивления (ДФ);
- активной составляющей комплексной проводимости (ДГ);
- активной составляющей комплексного сопротивления (ДР);
- модуля комплексного коэффициента отражения (Ир);
- фазы комплексного коэффициента отражения (ИФ).

Места включения в АСУ датчиков и измерителей, их тип выбираются, руководствуясь соображениями обеспечения автономности различных контуров автоматической настройки в много-связной системе управления.

В схемах датчиков и измерителей чаще всего используются высокочастотные широкополосные трансформаторы. Погрешность нулей измерителей и датчиков в диапазоне частот в основном зависит от равномерности амплитудно-частотных и линейности фазовых характеристик этих трансформаторов [1]. Практическая реализация равномерных амплитудно-частотных и линейных фазовых характеристик трансформаторов в широком диапазоне частот (например, от 1 до 300 МГц) является трудной технической задачей. Для измерения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения обычно применяют направленные ответвители [2], которые в диапазоне коротких волн имеют существенные габариты.

На погрешность обычно применяемых в ИИСУ АСУ измерителей и датчиков, не имеющих избирательных частотных свойств, оказывают сильное влияние наведенные в антенне сигналы от рядом работающих радиостанций [3], поэтому используются они при высоких уровнях излучения несущей частоты сигнала, что позволяет обнаружить радиостанцию еще во время подготовки ее к работе.

Устранить отмеченные недостатки обычно применяемых измерителей и датчиков позволяют устройства, основанные на применении моста переменного тока с четырьмя резистивными плечами. Схемы таких устройств конструктивно легче реализуемы в более широком диапазоне частот, в них легче производить обработку информации на промежуточной частоте, вследствие чего они более помехоустойчивы и имеют меньшую погрешность.

Разработаем метод синтеза мостовых датчиков и измерителей переменного тока, определяя для каждого типа датчика или измерителя уравнение нуля и условие его реализации на основе анализа их векторных диаграмм [4]. Схема моста переменного тока приведена на рисунке 1, где показаны также токи и напряжения в опорных и измерительных плечах.

Полагаем, что величины активных сопротивлений в плечах моста нормированы по отношению к оптимальному входному сопротивлению СУ.

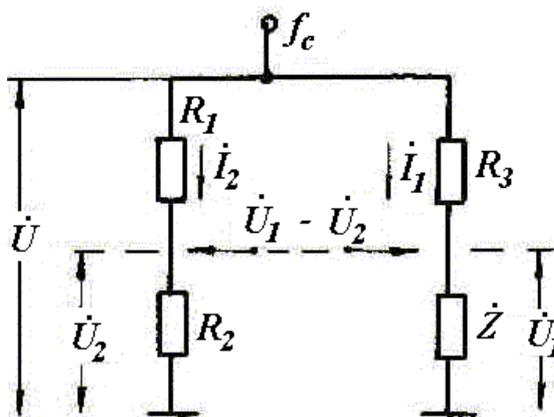


Рисунок 1 – Схема моста переменного тока

Датчик знака отклонения активной составляющей комплексной проводимости от номинальной величины.

Для упрощения будем называть его датчиком активной проводимости.

Значение тока \dot{I}_1 на входе АСУ (в измерительном плече моста):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z}. \quad (1)$$

Значение тока \dot{I}_2 в опорном плече моста:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_2}. \quad (2)$$

Определим значения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 с учетом (1) и (2):

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U} \cdot \dot{Z}}{R_3 + \dot{Z}} = \frac{\dot{U}(r + jx)}{R_3 + r + jx}, \quad (3)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U} \cdot R_3}{R_1 + R_3}. \quad (4)$$

Отметим, что для справедливости формул (3) и (4) необходимо выполнение условий $\dot{Z}_C \gg R_1, \dot{Z}_C \gg R_2, \dot{Z}_C \gg R_3, \dot{Z}_C \gg \dot{Z}$. В данном выражении \dot{Z}_C – сопротивление в диагонали моста. Эти условия необходимо обеспечивать за счет схемных решений.

При делении (4) на (3) после преобразований получим:

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 \cdot r}{r^2 + x^2} + 1 + j \cdot \frac{R_3 \cdot x}{r^2 + x^2} \right) \quad (5)$$

и

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (R_3 g + jR_3 b). \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) значения $g = \frac{r}{r^2 + x^2}$ и $b = \frac{x}{r^2 + x^2}$.

Определим действительную и мнимую части выражения (6):

$$\operatorname{Re} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \cos \varphi = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2} g + \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (7)$$

$$\operatorname{Im} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = j \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \sin \varphi = j \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2} \cdot b. \quad (8)$$

В данных формулах φ обозначает фазовый сдвиг между напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

Независимость действительной части отношения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 от реактивной проводимости в измерительном плече моста очевидна из анализа выражения (7). На рисунке 2 показана векторная диаграмма напряжений моста. Если величину \dot{U}_2 выбрать таким, чтобы выполнялось равенство:

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| = |\dot{U}_2|, \quad (9)$$

то, как следует из диаграммы, годографом вектора \dot{U}_1 будет окружность в процессе изменения нагрузки Z в измерительном плече моста.

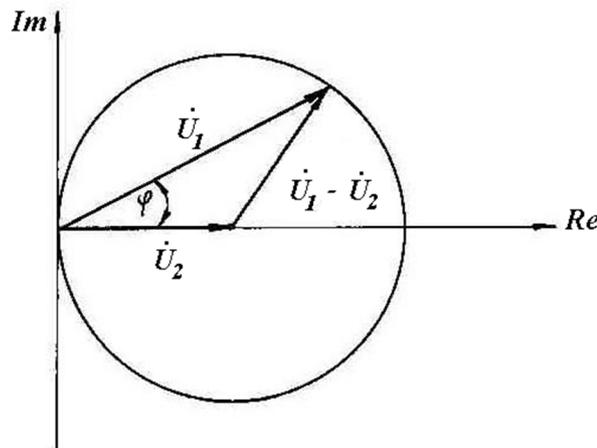


Рисунок 2 – Векторная диаграмма напряжений моста

Из анализа векторной диаграммы вытекает равенство:

$$\frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} \cos \varphi = \frac{1}{2}. \quad (10)$$

Тогда условие реализации ДГ, т.е. вариант схемы резистивного моста, при котором можно использовать его в качестве датчика активной составляющей комплексной проводимости получим из (7) и (10):

$$\frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2} \cdot g + \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2}. \quad (11)$$

При $g = 1$ равенства (9) и (11) справедливы при $R_1 = 1,5; R_2 = 0,5; R_3 = 1$. Уравнением нуля ДГ будет являться равенство (9), причем: если $g > 1$, то

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| < |\dot{U}_2|, \quad (12)$$

а если $g < 1$, то

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| > |\dot{U}_2|. \quad (13)$$

Датчик знака отклонения активной составляющей комплексного сопротивления от номинальной величины. Для упрощения будем называть его датчиком активной составляющей комплексного сопротивления.

Воспользуемся последовательной цепью из R и Z , показанной на рисунке 3, для построения датчика активной составляющей комплексного сопротивления.

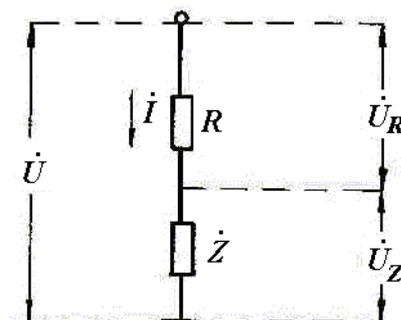


Рисунок 3 – Последовательная цепь из R и Z

Для этой цепи справедливы соотношения:

$$\frac{\dot{U}_z}{\dot{U}_R} = \frac{\dot{Z}}{R} = \frac{r + jx}{R}; \quad (14)$$

$$\operatorname{Re} \frac{\dot{U}_z}{\dot{U}_R} = \frac{|\dot{U}_z|}{|\dot{U}_R|} \cos \varphi = \frac{r}{R}; \quad (15)$$

$$\operatorname{Im} \frac{\dot{U}_z}{\dot{U}_R} = j \frac{|\dot{U}_z|}{|\dot{U}_R|} \sin \varphi = \frac{x}{R}. \quad (16)$$

На рисунке 4 показана векторная диаграмма напряжений и тока для последовательной цепи. Как видно из векторной диаграммы, при выбранной величине R таким образом, что:

$$\frac{|\dot{U}_z|}{|\dot{U}_R|} \cos \varphi = \frac{1}{2}, \quad (17)$$

выполняется равенство:

$$|\dot{U}_R - \dot{U}_z| = |\dot{U}_z|. \quad (18)$$

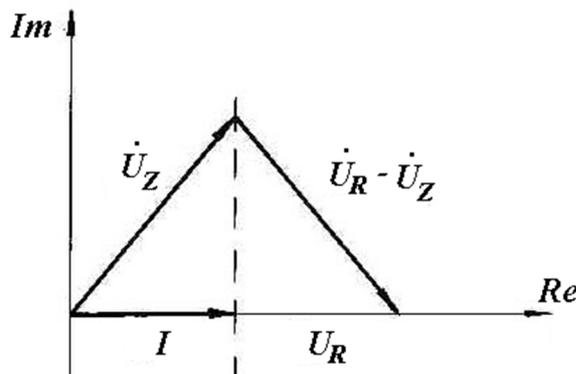


Рисунок 4 – Векторная диаграмма напряжений в последовательной цепи

Условие реализации датчика активной составляющей комплексного сопротивления получается из анализа выражений (15) и (17):

$$\frac{r}{R} = \frac{1}{2}. \quad (19)$$

А уравнение нуля датчика активной составляющей комплексного сопротивления получим, подставив в (18) значение $\dot{U}_R = \dot{U} - \dot{U}_z$:

$$|\dot{U}_z| = |\dot{U} - 2\dot{U}_z|. \quad (20)$$

Датчик знака отклонения модуля комплексного сопротивления от номинальной величины. Для упрощения будем называть его датчиком модуля комплексного сопротивления.

Условие реализации датчика модуля комплексного сопротивления получается из соотношения (14) при равенстве его 1.

$$\frac{|\dot{U}_z|}{|\dot{U}_R|} = \frac{|\dot{Z}|}{R} = \frac{\sqrt{r^2 + x^2}}{R} = 1 \quad (21)$$

Векторная диаграмма напряжений в датчике модуля комплексного сопротивления приведена на рисунке 5.

Из диаграммы рисунка 5 очевидным является уравнение нуля датчика модуля комплексного сопротивления в виде:

$$|\dot{U}_z| = |\dot{U}_R| \quad (22)$$

или

$$|\dot{U}_z| = |\dot{U} - \dot{U}_z|. \quad (23)$$

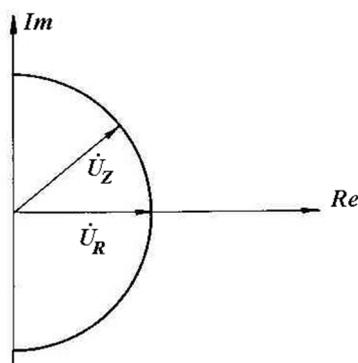


Рисунок 5 – Векторная диаграмма напряжений в датчике модуля комплексного сопротивления

Измерители величин модуля и фазы комплексного коэффициента отражения. Путем несложных преобразований из уравнений (3) и (4) получается равенство:

$$\frac{R_3}{Z} \cdot \dot{U}_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \dot{U}_2 - \dot{U}_1, \quad (24)$$

из которого при $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ (условие реализации измерителя) можно получить выражение:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_1}{2\dot{U}_2 - \dot{U}_1}. \quad (25)$$

Известна формула [1], которая выражает комплексный коэффициент отражения через комплексное сопротивление

$$\dot{p} = \frac{\dot{Z} - 1}{\dot{Z} + 1}. \quad (26)$$

Значение \dot{Z} из (25) подставляем в (26) и получаем:

$$\dot{p} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{U}_2}. \quad (27)$$

Мы выразили комплексный коэффициент отражения через величины напряжений на элементах моста, приведенного на рисунке 1.

Следовательно, из соотношения модулей диагонального и опорного напряжений получим модуль коэффициента отражения:

$$p = \frac{|\dot{U}_1 - \dot{U}_2|}{|\dot{U}_2|}, \quad (28)$$

а фазовая разность напряжений в диагонали и в опорном плече моста равна фазе коэффициента отражения:

$$\arg \dot{p} = \arg(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \arg \dot{U}_2. \quad (29)$$

На рисунке 6 показана универсальная схема, в которой на основе резистивного моста реализуются избирательные измерители и датчики, теория которых рассмотрена в данном разделе.

К схеме необходимо сделать некоторые пояснения.

1. В плечах моста использованы резисторы с нормированной величиной сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3 = 1$, а соответствующее масштабирование информационных сигналов производится на промежуточной частоте.

2. Известные и хорошо отработанные схемные решения приведены упрощенно (например, схема фазового дискриминатора коммутационного типа на дифференциальном каскаде [5]) или показаны функциональными прямоугольниками (ЦИФ, ЦИОН, УПЧ и пр.).

3. Делители из резисторов R_4, R_5, R_6, R_7 служат для исключения возможности влияния на смесители сигналов мощной помехи.

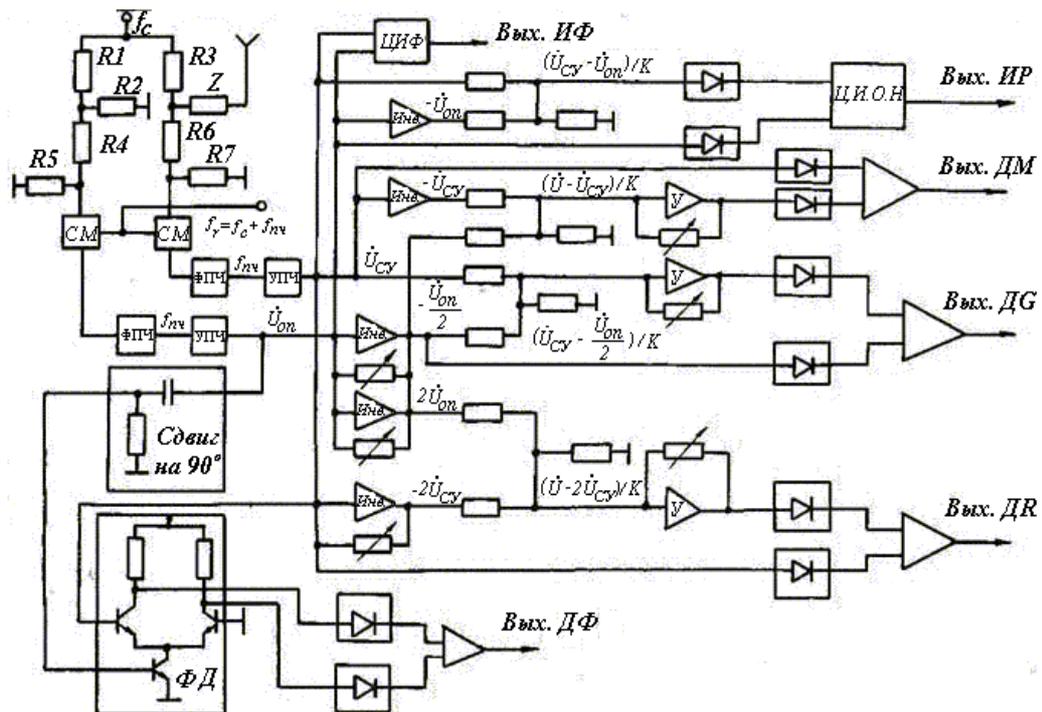


Рисунок 6 – Универсальная схема избирательных датчиков и измерителей

Приняты следующие сокращения и обозначения: Инв. – инвертор; СМ – смеситель; У – усилитель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; ФПЧ – фильтр промежуточной частоты; ЦИОН – цифровой измеритель отношений напряжений; ЦИФ – цифровой измеритель фазы; ФД – фазовый дискриминатор.

Следует отметить, что работоспособность этих датчиков и измерителей сохраняется при очень низких уровнях сигнала.

Библиографический список

1. Лондон С. Е. Широкополосные радиопередающие устройства / С. Е. Лондон. – Ленинград : Энергия, 1970. – 148 с.
2. Фельдштейн А. Л. Синтез четырёхполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – Москва : Связь, 1971. – 388 с.
3. Белоусов Е. Л. Особенности настройки антенного согласующего устройства при действиях стационарной помехи / Е. Л. Белоусов // Техника средств связи. Серия ТРС. – 1976. – № 3. – С. 27–32.
4. Рассел Джесси. Векторная диаграмма / Джесси Рассел. – Москва : VSD, 2012. – 736 с.
5. Жуков В. М. Устройства автоматики в системах радиосвязи : учебно-методическое пособие / В. М. Жуков, А. А. Шилов. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – 95 с.

References

1. London S. Ye. *Shirokopolosnyye radiopereadayushchiye ustroystva* [Broadband radio transmitting devices]. – Leningrad, Energiya Publ., 1970. 148 p.
2. Feldshteyn A. L., Yavich L. R. *Sintez chetyryekhpolyusnikov i vosmipolyusnikov na SVCH* [Synthesis of four-terminal and eight-terminal networks at microwave frequency]. Moscow, Svyaz Publ., 1971. 388 p.
3. Belousov Ye. L. *Osobennosti nastroyki antennoyego soglasuyushchego ustroystva pri deystviyakh stantsionnoy pomexi* [Peculiarities of tuning the antenna matching device under the action of station interference]. *Tekhnika sredstv svyazi, seriya TRS* [Communication Equipment], 1976, no. 3, pp. 27–32.
4. Rassel Dzhessi. *Vektornaya diagramma* [Vector diagram]. Moscow, VSD Publ., 2012. 736 p.
5. Zhukov V. M., Shilov A. A. *Ustroystva avtomatiki v sistemakh radiosvyazi* [Automation devices in radio communication systems]. Tambov, Tambov State Technical University, 2012. 95 p.