

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА

В.В. Ермолаев, В.М. Жуков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; crems@crems.jesby.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: вычислительный метод; модуль комплексного коэффициента отражения; фаза комплексного коэффициента отражения.

Аннотация: Показано, что время автоматической настройки согласующего устройства существенно уменьшается при использовании в качестве датчиков автонастройки измерителей фазы и модуля коэффициента отражения и применении алгоритма вычислительного типа. Выведены формулы, по которым определяются нормированные значения проводимости входной емкости и электрической длины линии для данного согласующего устройства, погрешности установки проводимости входной емкости и длинной линии, а также формулы, по которым производится коррекция погрешностей. Предложен вариант построения измерителей на основе четырехплечевого моста переменного тока.

В автоматизированных радиопередающих устройствах, используемых в современных средствах связи ультракоротковолнового (УКВ) диапазона, время перехода с частоты на частоту в значительной мере определяется временем автоматического согласования выхода усилителя мощности с антенной. В последнее время применяются, как правило, автоматические согласующие устройства (СУ) с дискретными органами настройки, имеющие наиболее обширные области согласования и частотный диапазон, меньшее время перестройки [1]. Однако даже применение наилучших алгоритмов автонастройки поискового типа при имеющихся в настоящее время высокочастотных коммутационных элементах не позволяет существенно снизить время перестройки согласующих устройств радиопередатчиков большой и средней мощности.

Дальнейшее уменьшение времени перестройки дискретных СУ может быть достигнуто путем использования вычислительного способа настройки, то есть путем измерения параметров нагрузки (антенны), вычисления по ним требуемых величин переменных органов СУ и их одновременного включения. В частности в автоматическом СУ, функциональная схема которого приведена на рис. 1, целесообразно измерять фазу и модуль комплексного коэффициента отражения на его входе и по ним вычислять требуемые величины длинной линии (ДЛ) и емкости C .

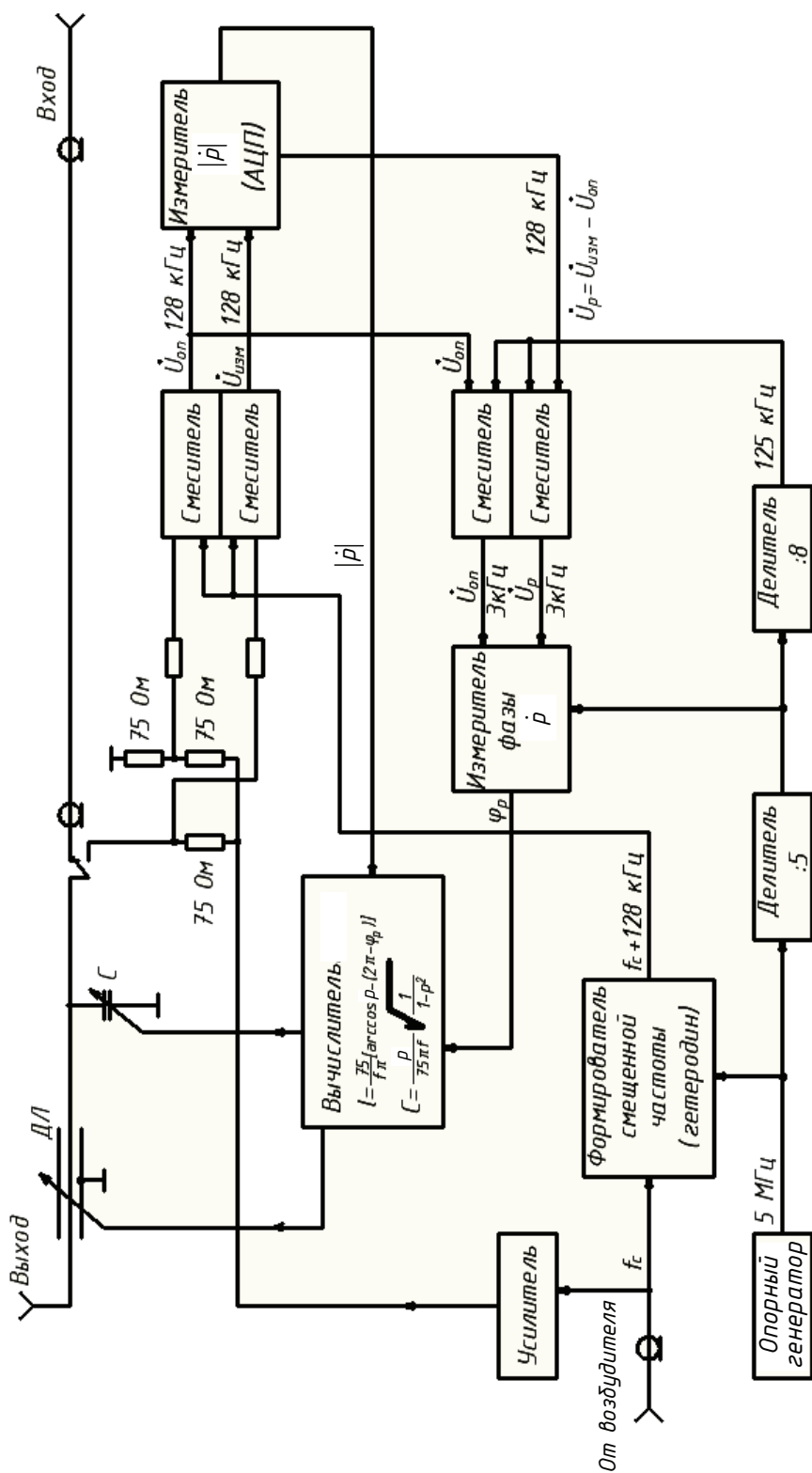


Рис. 1. Функциональная схема цифрового автоматического согласующего устройства

В работе [2] приведены формулы, по которым определяются нормированная величина проводимости входной емкости и электрическая длина линии для данного СУ:

$$b_C = \frac{1-k}{\sqrt{k}}; \quad (1)$$

$$l = \frac{\lambda}{120^\circ} \left(\varphi_p + \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{k}}{1-k} \right), \quad (2)$$

где k – коэффициент бегущей волны (**КБВ**) на выходе СУ; λ – длина волны, м; φ_p – фаза коэффициента отражения на входе СУ при начальных (минимальных) значениях ДЛ и C , рад.

Полагая, что входное сопротивление настроенного СУ должно быть равно 75 Ом, из выражения (1) можно получить формулу для вычисления абсолютной величины емкости [3]:

$$C = \frac{p}{75\pi f} \sqrt{\frac{1}{1-p^2}}, \quad (3)$$

где p – модуль коэффициента отражения на входе СУ при начальных значениях ДЛ и C ; f – частота, МГц. Угол $\arccos p$ показан на рис. 2.

Выражение (2) можно привести к более удобному для вычислений виду

$$l = \frac{75}{\pi f} (\arccos p + \varphi_p), \quad (4)$$

если $2\pi - \varphi_p > \arccos p$; и

$$l = \frac{75}{\pi f} [\arccos p - (2\pi - \varphi_p)], \quad (5)$$

если $2\pi - \varphi_p \leq \arccos p$.

При настройке СУ установку требуемых величин линии и емкости целесообразно проводить последовательно. Сначала точку A , изображающую на круговой диаграмме входную проводимость СУ при начальных (минимально возможных) величинах ДЛ и C с требуемой степенью точности, выводят на окружность единичной активной проводимости (дуга AB на рис. 3). Затем включают требуемую величину C (дуга BH на рис. 3).

Из-за погрешностей, вносимых измерителями и вычислительным устройством, а также погрешностей выполнения дискретных органов СУ, на каждом этапе

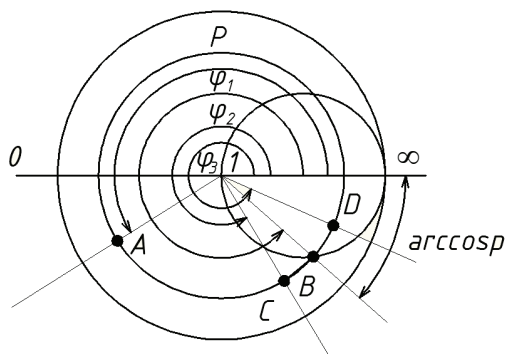


Рис. 2. К определению погрешности настройки по линии

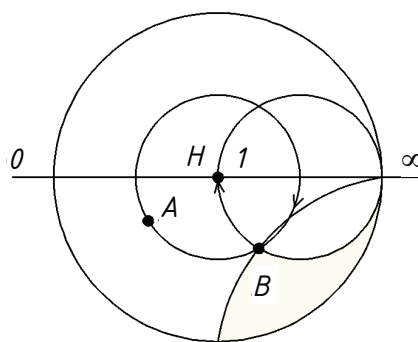


Рис. 3. Годограф входной проводимости СУ в процессе настройки

настройки обычно приходится проводить коррекцию включаемых величин линии и емкостей. На практике погрешность исполнения разрядов линии и емкости значительно превосходит реально достижимую погрешность цифровых измерителей и вычислительных устройств, и в основном данной погрешностью определяется число корректирующих включений на обоих этапах настройки.

Определим число включений по линии и емкости, исходя из необходимой точности настройки и погрешности исполнения дискретных разрядов линии и емкости. Максимально необходимая длина линии равна $0,5\lambda$. Зависимость абсолютной погрешности установки по линии Δl от числа включений n_l определяется следующим образом:

$$\Delta l = 0,5\lambda\delta_l^{n_l}, \quad (6)$$

где δ_l – относительная погрешность величин разрядов линии.

Величина Δl должна быть меньше допустимой $\Delta l_{\text{доп}}$. Тогда максимально необходимое число включений по линии будет определяться выражением

$$n_{l\text{max}} = \frac{\lg \frac{\Delta l_{\text{доп}}}{0,5\lambda}}{\lg \delta_l}. \quad (7)$$

Абсолютная погрешность установки величины проводимости при изменении входной емкости

$$\Delta b_C = b_C\delta_C^{n_C}, \quad (8)$$

где δ_C – относительная погрешность выполнения разрядов емкости; n_C – число включений по емкости.

Величина Δb_C должна быть меньше допустимой $\Delta b_{C\text{доп}}$. Тогда максимально возможное количество включений по емкости

$$n_{C\text{max}} = \frac{\lg \frac{\Delta b_{C\text{доп}}}{b_{C\text{max}}}}{\lg \delta_C}, \quad (9)$$

где $b_{C\text{max}}$ определяется по формуле (1) при минимальном начальном значении k . Общее число включений в процессе настройки равно сумме включений по линии и емкости.

Определим выражения, по которым после включений органов настройки и последующих измерений модуля и фазы коэффициента отражения следует вычислять величины ошибок. В процессе настройки точку A (см. рис. 2), изображающую входную проводимость SU , изменением длины линии необходимо трансформировать в точку B , определяемую параметрами p , φ_1 .

Предположим, что из-за погрешности разрядов линии точка A трансформировалась в точку H с параметрами p , φ_2 . Необходимо скорректировать длину линии на величину Δl , определяемую углом $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\varphi_1 = 2\pi - \arccos p$. Следовательно величина ошибки по линии определяется из выражения

$$\Delta l = \frac{75}{\pi f} (\varphi_2 - 2\pi + \arccos p) = \frac{75}{\pi f} [\arccos p - (2\pi - \varphi_2)]. \quad (10)$$

Отметим, что правые части выражений (10) и (5) идентичны.

По формуле (10) определяется величина ошибки и для случая, когда точка A трансформируется в точку D (см. рис. 2). В этом случае в выражении (10) φ_2 заменяется на φ_3 .

Аналогичными рассуждениями можно показать, что в случае трансформации после первого включения точки A в верхнюю полуплоскость диаграммы (возможно при больших значениях δ_l) вычисление величины ошибки надо проводить по формуле (4). Следовательно, коррекция длины линии проводится в соответствии с той же формулой, что и ее первоначальная установка.

Для определения выражения, по которому необходимо вычислить величину ошибки по емкости, рассмотрим рис. 4.

Точка B , находящаяся на окружности единичной активной проводимости, изображает входную проводимость СУ после установки линии. Для настройки СУ необходимо включить величину C , определяемую по формуле (3).

Предположим, что после включения емкости точка B трансформировалась в точку E . Погрешность ΔC можно определить по формуле (3), измерив величину p_2 :

$$\Delta C = \frac{p_2}{75\pi f} \sqrt{\frac{1}{1-p_2^2}}. \quad (11)$$

Аналогично находится погрешность для точки F . Знак ошибки определяется сравнением фазы коэффициента отражения, измеренной после соответствующего включения емкости, с величиной π . Если $\varphi > \pi$, то знак ошибки отрицательный, то есть включенная емкость мала и ее надо увеличить на величину ΔC . Если $\varphi < \pi$, то знак ошибки положительный, и величину емкости необходимо уменьшить.

Измеритель фазы и модуля комплексного коэффициента отражения можно построить на основе четырехплечего моста переменного тока с сопротивлениями в плечах, равными входному сопротивлению настроенного СУ.

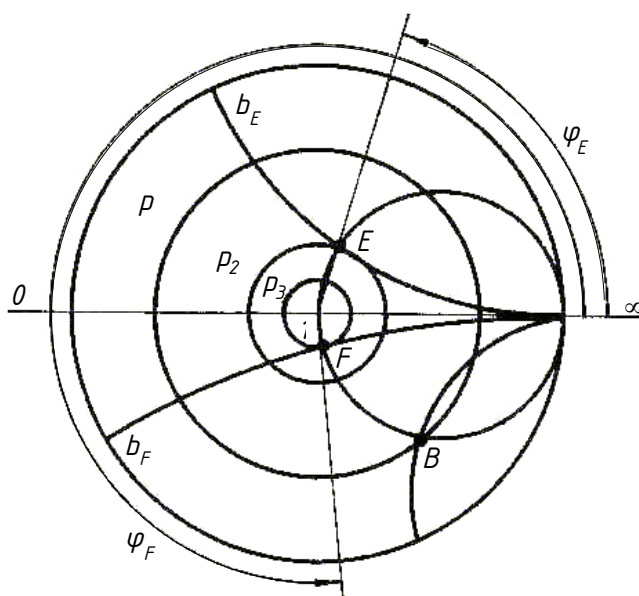


Рис. 4. К определению погрешности настройки по емкости

Покажем, что модуль и фаза напряжения в диагонали моста (рис. 5) однозначно связаны с модулем и фазой коэффициента отражения в измерительном плече моста.

Ток в измерительном плече моста

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}}, \quad (12)$$

где \dot{U}_1, \dot{Z} – комплексные напряжение, В, и сопротивление, Ом, в измерительном плече моста соответственно.

Ток в опорном плече моста

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_2}, \quad (13)$$

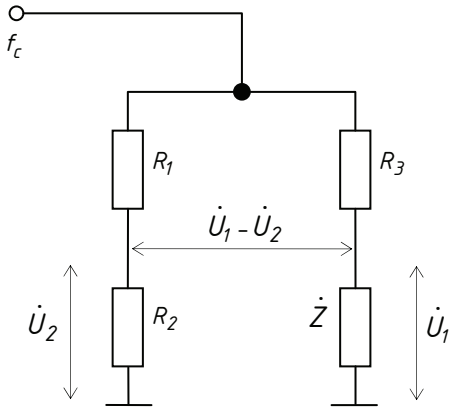


Рис. 5. К измерению \dot{p} с помощью моста

где \dot{U}_2, R_2 – комплексное напряжение, В, и сопротивление, Ом, в опорном плече моста соответственно.

Из уравнений (12) и (13) можно получить равенство

$$\frac{R_3}{\dot{Z}} \dot{U}_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \dot{U}_2 - \dot{U}_1, \quad (14)$$

где R_3 – сопротивление в измерительном плече моста.

Из (14) при $R_1 = R_2 = R_3 = W$ можно получить

$$\dot{Z} = \frac{W \dot{U}_1}{2 \dot{U}_2 - \dot{U}_1}, \quad (15)$$

где W – входное сопротивление настроенного СУ, равное волновому сопротивлению кабеля, подводящего высокочастотную мощность к входу СУ, Ом.

Связь коэффициента отражения с комплексным сопротивлением определяется известным выражением

$$\dot{p} = \frac{\dot{Z} - W}{\dot{Z} + W}. \quad (16)$$

Подставляя в выражение (16) значение \dot{Z} из (15), путем преобразований получим формулу для определения комплексного коэффициента отражения в измерительном плече моста:

$$\dot{p} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{U}_2}, \quad (17)$$

откуда модуль коэффициента отражения равен отношению модулей напряжений в диагонали и в опорном плече моста, то есть

$$p = \frac{|\dot{U}_1 - \dot{U}_2|}{|\dot{U}_2|}. \quad (18)$$

Фаза коэффициента отражения равна разности фаз диагонального и опорного напряжений:

$$\text{Arg } \dot{p} = \text{Arg}(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \text{Arg} \dot{U}_2. \quad (19)$$

Значение \dot{p} в выражении (17) не зависит от величины напряжения питания моста.

Для повышения точности измерений модуля и фазы коэффициента отражения обработку информации, снимаемой с моста, целесообразно проводить на промежуточной частоте. Для получения промежуточной частоты необходим гетеродин, частота которого жестко связана с выходной частотой возбуждателя передатчика (см. рис. 1).

На время настройки согласующий контур, состоящий из линии ДЛ и емкости C , подключается к одному из плеч моста, образованного резисторами с $R = W$. От возбуждателя передатчика на мост подается напряжение с рабочей частотой сигнала f_c .

Напряжения с плеч моста (назовем их опорным и измерительным) подаются на два канала преобразования сигналов рабочей частоты в сигналы первой промежуточной частоты $f_{пр1}$. На смеситель поступает также напряжение гетеродина с формирователя смещенной частоты. Далее сигналы промежуточной частоты, сохранив фазовые и амплитудные соотношения, подаются на измеритель модуля \dot{p} , где формируется разностное напряжение $\dot{U}_p = \dot{U}_{изм} - \dot{U}_{оп}$ ($\dot{U}_{изм}$ – измеренное напряжение, $\dot{U}_{оп}$ – опорное напряжение). Разностное и опорное напряжения детектируются, подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который в цифровой форме выдает величину отношения напряжений $\frac{|\dot{U}_{изм} - \dot{U}_{оп}|}{|\dot{U}_{оп}|}$, равную модулю коэффициента отражения.

Для измерения фазы коэффициента отражения напряжения $\dot{U}_{оп}$ и \dot{U}_p с частотой $f_{пр1}$ поступают еще на одну пару смесителей, где промежуточная частота снижается до величины $f_{пр2}$. На этой частоте цифровым способом измеряется разность фаз двух сигналов, которая равна фазе коэффициента отражения. Величины p и φ_p в цифровой форме подаются на вычислитель, который управляет длиной линии и величиной емкости СУ. Повторное преобразование частоты информационных сигналов при цифровом измерении фазы коэффициента отражения целесообразно осуществлять для уменьшения требуемой частоты тактовых импульсов. В образце автоматического СУ, на котором проверялся описываемый алгоритм настройки, величины $f_{пр1}$ и $f_{пр2}$ равнялись соответственно 128 и 3 кГц.

Отметим, что кроме повышения точности измерений построение избирательных по частоте измерителей преследует еще одну немаловажную цель – обеспечение помехозащищенности системы автонастройки при наличии в антенне сильных мешающих сигналов от других радиостанций [2].

Использование вышеописанного алгоритма вычислительного типа дает существенный выигрыш во времени настройки по сравнению с алгоритмом поразрядного уравнивания, широко применяемым в дискретных автоматических согласующих устройствах [4]. Для проведения такого сравнения выведем выражения, по которым определяются необходимые количества включений по линии и емкости при настройке алгоритмом поразрядного уравнивания.

Величина младшего разряда дискретного органа должна быть меньше или равна удвоенной величине допустимой абсолютной погрешности настройки.

С учетом этого соображения для дискретной длинной линии, разряды которой выполнены по двоичному закону, должно выполняться условие

$$(2^{n_l} - 1)2\Delta l_{доп} = 0,5\lambda, \quad (20)$$

а для двоичного дискретного конденсатора условие

$$(2^{n_C} - 1)2\Delta b_{C_{\text{доп}}} = b_{C_{\text{макс}}} \quad (21)$$

Из равенства (20) получаем выражение, по которому определяется необходимое число включений по линии,

$$n_l = \frac{1}{\lg 2} \lg \left(\frac{0,5\lambda}{2\Delta l_{\text{доп}}} + 1 \right), \quad (22)$$

из равенства (21) – выражение для определения необходимого числа включений по емкости

$$n_C = \frac{1}{\lg 2} \lg \left(\frac{b_{C_{\text{макс}}}}{2\Delta b_{C_{\text{доп}}}} + 1 \right). \quad (23)$$

Таким образом, общее число включений по линии и емкости, рассчитанное по формулам (7) и (9) для алгоритма вычислительного типа при реально достижимых величинах δ_l и δ_C , равных 0,1, приблизительно в три раза меньше числа включений, определенного по формулам (22) и (23) для алгоритма поразрядного уравнивания при одинаковых значениях $b_{C_{\text{макс}}}$, $\Delta l_{\text{доп}}$, $\Delta b_{C_{\text{доп}}}$. Следовательно, время автоматической настройки СУ уменьшается в 3 раза.

Список литературы

1. Сысоев, А.Н. Особенности согласования КФАР при управлении ДН / А.Н. Сысоев, А.Ф. Харин, А.Б. Беседин. – Антенны. – 2010. – № 11. – С. 33–37.
2. Жуков, В.М. Анализ работы дискретного автоматического антенного согласующего устройства с распределенными параметрами / В.М. Жуков. – Техника средств связи. Сер. ТРС. – 1978. – № 3. – С. 95–100.
3. Ермолаев, В.В. Методика расчета автоматического устройства согласования антенн с распределенными параметрами / В.В. Ермолаев, В.М. Жуков // Вестн. Тамб. гос. техн. н-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 863–868.
4. Гусев, В.Г. Методы исследования точности цифровых автоматических систем / В.Г. Гусев. – М. : Наука 1973. – 399 с.

Reducing Auto-Tuning Time for Digital Automatic Matching Device through Computational Method

V.V. Ermolayev, V.M. Zhukov

*Department “Designing of Radio-Electronic and Microprocessor Systems”, TSTU;
crems@crems.jesby.tstu.ru*

Key words and phrases: computing method; modulus of complex reflection coefficient; phase of complex reflection coefficient.

Abstract: It is shown that the time required for auto-tuning of the matching device is significantly reduced when testers of phase and modulus of the reflection coefficient are used as auto-tuning sensors and computational type algorithm is applied. We obtained the formulas to determine normalized values of conductivity of input

capacitance and the electrical length of the line for the matching device; to reveal inaccuracies in the input capacitance and conductivity of a long line, as well as the formulas for error correction. The variant of the construction of measuring instruments based on the four-shoulder AC bridge is proposed.

Kürzung der Zeit der Abstimmung der digitalen automatischen Anpassungseinrichtung mit Hilfe der Rechenmethode

Zusammenfassung: Es ist gezeigt, dass die Zeit der automatischen Abstimmung der Anpassungseinrichtungen bei der Nutzung als Sensoren der Autoabstimmung der Messgeräte der Phase und des Moduls des Koeffizienten der Reflexion und bei der Verwendung des Algorithmus des Rechentyps wesentlich verringert wird. Es sind die Formeln, nach denen die normierten Bedeutungen der Leitungsfähigkeit der Eingangskapazität und der elektrischen Länge der Linie für die angegebenen Anpassungseinrichtungen, des Fehlers der Anlage der Leitungsfähigkeit der Eingangskapazität und der langen Linie, sowie die Formeln, nach denen die Korrektur der Fehler geprüft wird, aufgestellt. Es ist die Variante der Konstruktion der Messgeräte aufgrund der Vierschulterbrücke des Wechselstromes angeboten.

Diminution du temps de l'ajustage du dispositif automatique digital d'adaptation à l'aide de la méthode informatique

Résumé: Est montré que le temps de l'ajustage du dispositif automatique digital d'adaptation diminue sensiblement lors de l'emploi en qualité de capteurs de l'ajustage automatique de la phase de mesure et du module de coefficient de réflexion ainsi que l'application de l'algorithme du type informatique. Sont données les formules pour la définition de la grandeur standardisée de la conductibilité de la capacité d'entrée pour ce dispositif d'adaptation, les erreurs de l'installation de la conductibilité de la capacité d'entrée et la longueur de la ligne ainsi que les formules pour la correction des erreurs. Est proposé un variant pour la construction des mesureurs à la base du pont à quatre bras du courant alternatif.

Авторы: *Ермолаев Владимир Викторович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Жуков Валентин Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
