

ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА С УЧЕТОМ МЕЖКАСКАДНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ В АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В. А. Сафаралеев

Для аналогового сигнала мощность является не менее важным параметром, чем амплитуда, но вопросам передачи мощности в радиоэлектронной аппаратуре внимания в литературе уделяется крайне мало. Известно, что коэффициент передачи по напряжению определяется в режиме холостого хода, при котором мощность на нагрузке равна нулю. Коэффициент передачи мощности определяется при работе с нагрузкой и зависит от количественных параметров и характера её сопротивления. В ходе расчетных экспериментов установлено, что коэффициент передачи мощности отличается от коэффициента передачи по напряжению, возведённого в квадрат, не только по величине, но и по форме, что приводит к существенному отличию спектра сигнала, измеренному в нагрузке и рассчитанному с применением коэффициента передачи по напряжению. В данной работе исследовано влияние сопротивления нагрузки на величину передаваемой мощности в заданной полосе частот.

Ключевые слова: четырёхполюсник, нагрузка, согласование, мощность, коэффициент передачи, граничная частота, полоса пропускания.

Введение

В настоящее время при необходимости разработать новое электронное или электротехническое устройство проектирование начинается с просмотра каталогов продукции различных фирм (большинство из которых расположено в Китайской Народной Республике). Подобранные субблоки объединяются в готовое изделие. Сами субблоки или устройство целиком не разрабатываются. Такой подход имеет свои плюсы: не надо делать повторно уже сделанную работу. Но с другой стороны полная зависимость от чужих достижений делает развитие науки и техники уязвимыми перед различными международными событиями.

Данная работа посвящена особенностям энергетического расчета цепей из четырехполюсников и предназначена специалистам по разработке аналоговых радиотехнических устройств и отдельных узлов.

В ряде случаев при разработке и моделировании различных электрических и электронных устройств в качестве основной семантической единицы удобно использовать четырехполюсник. Основной внешней характеристикой четырехполюсника является коэффициент передачи. Он определяет сигнал на выходе при известном сигнале на входе. Если сигналы описываются напряжением, то эта характеристика называется коэффициентом передачи по напряжению (определяется в режиме холостого хода (ХХ)). Этот режим не имеет практической направленности и подразумевает нулевую мощность сигнала в нагрузке. Если сигнал характеризуется мощностью (энергетическим спектром), то нужно применять коэффициент

передачи мощности. В учебных материалах при описании этого вопроса приводится противоречивая информация. Так, в [1] указывается, что коэффициент передачи мощности $K_p(\omega) = |K_U(j\omega)|^2$.

А в [2] указано, что $K_p = |K_U| |K_I|$. И то и другое выражение не доказываются, но из курса физики известно, что мощность в электрической цепи равна произведению тока на напряжение $P = IU$, или, учитывая что $I = U/Z$ можно записать $P = U^2/Z$. Кроме того, в главах, посвященных характеристическим параметрам четырехполюсника, говорится, что для обеспечения передачи максимальной мощности комплексные значения выходного сопротивления и сопротивления нагрузки должны быть равны: $Z_{\text{вых}} = Z_{\text{н}}$ [3 – 5]. В то время как в [3] доказываются, что эти сопротивления должны быть комплексно сопряженными:

$$Z_{\text{вых}} = Z_{\text{н}}^* \quad (1)$$

Последнее согласуется с положениями электротехники о повышении коэффициента мощности путем подключения к нагрузке реактивного сопротивления противоположного характера (чаще всего батарея конденсаторов для индуктивной нагрузки – двигателей).

В работе применяются следующие обозначения: $Z_i = R_i + jX_i$ – полное сопротивление i -й¹ цепи; R_i и jX_i – активная и реактивная составляющие

¹Здесь под значением « i » понимается не только численные индексы, но и обозначения нагрузки («Н») и источника сигнала («И.С.»).

полного сопротивления; j – мнимая единица; Z^* – комплексно-сопряженное значение: $Z_i^* = R_i - jX_i$.

Известно, что значения мнимых (реактивных) частей сопротивлений имеют разный характер зависимости величины от частоты: индуктивная возрастает (с увеличением частоты), а емкостная – уменьшается. Из этого следует, что обеспечить выполнение требований (1) можно только на одной частоте. Необходимо отметить, что способы синтеза согласующих четырехполюсников, обеспечивающих согласование с нагрузкой в широкой полосе частот, существуют. В [6] приведены примеры схем и соответствующие им коэффициенты передачи мощности таких согласующих звеньев. Однако такие схемы содержат большое количество реактивных элементов, что во многих случаях будет не целесообразно.

Применение коэффициента передачи по напряжению оправдано для цифровых устройств, в которых информация передается высоким или низким значением напряжения ($U^{<0>}$, $U^{<1>}$), при этом для сохранения в допустимых пределах зоны переключения (интервал напряжений между пороговыми значениями логического нуля и логической единицы $U_{пор}^{(0)} \div U_{пор}^{(1)}$) и повышения коэффициента разветвления стремятся максимально увеличить входное сопротивление следующего каскада.

В свою очередь, в аналоговых цепях сигнал, передающийся от одного каскада (четырёхполюсника) к другому, характеризуется мощностью. Так, например, мы говорим об отношении сигнал/шум как об отношении мощности сигнала к мощности шума. Мы говорим о защитном отношении как об отношении мощности сигнала к мощности помехи (при определённых условиях). О мощности идет речь и в теореме Шеннона и во многих других основополагающих законах.

Вследствие вышеназванных причин при расчете проектируемых устройств, в частности, при компьютерном моделировании, отдельных узлов и радиотехнических систем в целом, возникла потребность определить коэффициенты передачи мощности $K_p(\omega)$ отдельных четырехполюсников, включенных в общую цепь.

В качестве выходных показателей могут использоваться:

- коэффициент передачи мощности, как отношение мощности в нагрузке к мощности на входе четырехполюсника (при этом потери из-за рассогласования на входе не учитываются, вследствие чего значение указанного коэффициента для пассивных четырехполюсников может превышать значение «0,5» и приближаться к единице);

- мощность в нагрузке при постоянной амплитуде напряжения источника (не учитывается ток на входе и, соответственно, выходная мощность источника);

- вносимое затухание (отличие мощности в нагрузке при непосредственном соединении источника сигнала и нагрузки и при их соединении через исследуемый четырехполюсник).

Сравнение этих показателей² показывает, что при наличии незначительных количественных отличий качественно характеристики совпадают. Далее в статье в качестве основной характеристики будет применяться коэффициент передачи мощности.

1. Влияние сопротивления нагрузки на передаваемую мощность

T-образная схема замещения четырехполюсника с источником сигнала и нагрузкой представлена на рис. 1.

Исследуем влияние рассогласования нагрузки на коэффициент передачи мощности. Последний равен $K_p = \frac{P_H}{P_{вх}}$, где $P_H = U_H I_H = \frac{U_H^2}{Z_H}$ – мощность, выделяемая на нагрузке; $P_{вх} = U_{вх} I_{вх}$ – мощность на входе четырехполюсника (не равна мощности источника сигнала).

Выразим U_H через входное напряжение:

$$U_H = U_{вх} \frac{Z_3 Z_H}{Z_1 (Z_2 + Z_3 + Z_H) + Z_3 (Z_2 + Z_H)}$$

Тогда

$$K_p = \frac{Z_3^2 Z_H}{(Z_1 (Z_2 + Z_3 + Z_H) + Z_3 (Z_2 + Z_H))(Z_2 + Z_3 + Z_H)} \quad (2)$$

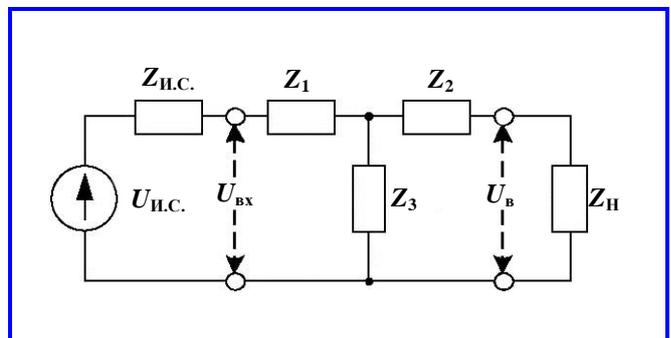


Рис. 1. Эквивалентная T-образная схема замещения четырехполюсника

² Ввиду ограниченности объема статьи результаты расчета указанных характеристик не приводятся.

Часть сопротивлений, входящих в выражение (2), имеют реактивные составляющие. Поэтому его можно представить в виде:

$$K_P = \frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega) + jD(\omega)} \quad (3)$$

где $A(\omega)$, $B(\omega)$, $C(\omega)$ и $D(\omega)$ – многочлены от частоты, коэффициенты которых зависят от характера реактивности (ёмкостная или индуктивная). Поэтому представить эти многочлены в общем виде не представляется возможным.

Известно, что в цепях, содержащих реактивные элементы, возникает сдвиг фаз между напряжением и током, что приводит к уменьшению активной (полезной) мощности. Поэтому в данной работе рассчитываются значения только активной мощности, следовательно, выражение (3) следует записать в виде:

$$K_{P, \text{акт}} = \operatorname{Re} \left(\frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega) + jD(\omega)} \right) = \frac{A(\omega)C(\omega) - B(\omega)D(\omega)}{C^2(\omega) + D^2(\omega)} \quad (4)$$

Рассмотрим влияние рассогласования на примере конкретных цепей.

2. Передача мощности в цепях с реальными элементами

Рассмотрим влияние согласования/рассогласования выходного сопротивления четырёхполюсника и нагрузки на величину передаваемой мощности на примере интегрирующего RC звена, в котором учтены потери: добавлено сопротивление потерь в цепи конденсатора и активное сопротивление в правом (по схеме) плече. В левом плече аналогичное сопротивление суммируется с сопротивлением R_1 .

2.1. Аналитическое выражение коэффициента передачи мощности

Реальные элементы, в отличие от идеальных, обладают не только заданной физической величиной (активное сопротивление, индуктивность или ёмкость), но и всеми другими – активными сопротивлениями проводников и потерь изоляции, паразитными ёмкостью и индуктивностью. Однако, если паразитные ёмкости и индуктивности в большинстве случаев достаточно малы и их реактивные сопротивления на рабочих частотах значительно меньше рабочих со-

противлений, то ими можно пренебречь. В то же время нежелательные активные сопротивления, даже значительно меньшие рабочих, часто вносят существенные изменения в режим работы цепи, поэтому не учитывать их нельзя.

При определении коэффициента передачи мощности будем считать амплитуду источника сигнала $U_{\text{и.с.}}$ постоянной, входной мощностью – произведение входного тока на напряжение на входе, выходной мощностью – мощность на нагрузке.

Схема интегрирующего звена с потерями представлена на рис. 2.

Для этой схемы $Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$. Нагрузка (согласованная) имеет индуктивный или активный характер. Для определения параметров цепи Z_3 необходимо учитывать, что в типовых схемах замещения конденсатора сопротивление утечки (потерь) R^{II} подключается параллельно идеальной ёмкости. Но, так как в расчётах применяется величина $Z_3 = R_3 + jX_3$ (последовательное соединение), то необходимо провести пересчёт параллельного соединения в последовательное:

$$R_3 = \frac{R_3^{\text{II}}}{1 + (\omega C R_3^{\text{II}})^2};$$

$$X_3 = -\frac{\omega C (R_3^{\text{II}})^2}{1 + (\omega C R_3^{\text{II}})^2} \approx -\frac{1}{\omega C}.$$

Так как величина R_3^{II} сама зависит от частоты, то для упрощения расчётов далее будем считать значение R_3 постоянной величиной, рассчитанной на частоте определения R_3^{II} .

Подставим в выражение (2) указанные выше значения сопротивлений. Так как реактивность ёмкостного характера имеет обратную зависимость от частоты ($X_C = -\frac{1}{\omega C}$), то целесообразно X_3 в максимальной степени вынести за скобки, а слагаемые с меньшей степенью домножить на величину $Y_3 = -\omega C_3$. Тогда многочлены будут иметь вид:

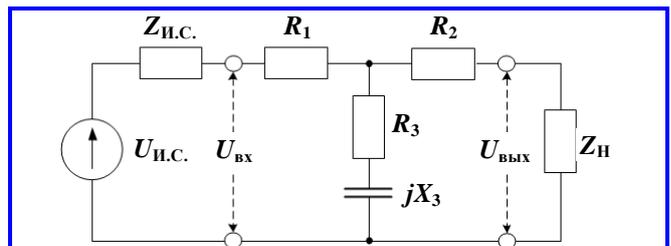


Рис. 2. Схема интегрирующего звена на элементах с потерями

$$A(\omega) = X_3^2 (R_3^2 Y_3^2 R_H - 2R_3 Y_3 X_H - R_H);$$

$$B(\omega) = X_3^2 (R_3^2 Y_3^2 X_H - 2R_3 Y_3 R_H - X_H);$$

$$C(\omega) = X_3^2 (-R_1 Y_3^2 X_H^2 - R_3 Y_3^2 X_H^2 + R_1 R_2^2 Y_3^2 + R_1 R_3^2 Y_3^2 + R_1 R_H^2 Y_3^2 + R_2 R_3^2 Y_3^2 + R_3 R_H^2 Y_3^2 - 2R_3 Y_3 X_H - 2R_1 Y_3 X_H + R_2^2 R_3 Y_3^2 + R_3^2 R_H Y_3^2 - 2R_2 Y_3 X_H - 2R_H Y_3 X_H + 2R_1 R_2 R_3 Y_3^2 + 2R_1 R_2 R_H Y_3^2 + 2R_1 R_3 R_H Y_3^2 + 2R_2 R_3 R_H Y_3^2 + R_1 + R_2 + R_H);$$

$$D(\omega) = X_3^2 (2R_1 R_3 Y_3 + 2R_1 R_H X_H Y_3^2 + R_2^2 Y_3 + 2R_2 R_3 Y_3 + R_3^2 X_H Y_3^2 + 2R_3 R_H Y_3 + 2R_1 R_2 Y_3 + 2R_1 R_3 X_H Y_3^2 + R_H^2 Y_3 + 2R_1 R_H Y_3 + 2R_2 R_H Y_3 + 2R_1 R_2 X_H Y_3^2 + 2R_2 R_3 X_H Y_3^2 + 2R_3 R_H X_H Y_3^2 - Y_3 X_H^2 - X_H).$$

Анализируя выражения в скобках получаем, что высшая степень частоты (определяется суммарной степенью Y и X) в выражениях $A(\omega)$ и $B(\omega)$ – вторая, в $D(\omega)$ – третья, а в $C(\omega)$ – четвёртая. Подставляя эти значения в (4) и сокращая на X_3^4 , получаем в числителе многочлен седьмой степени, а в знаменателе – восьмой.

Так как подобные преобразования необходимо выполнять для каждого возможного сочетания активных, индуктивных и ёмкостных сопротивлений, то целесообразно для расчета коэффициента передачи мощности использовать формулу (2) в математических пакетах, поддерживающих комплексные числа.

2.2. Расчётное определение коэффициента передачи мощности

Проведем исследование³ зависимости мощности, выделяемой на нагрузке, от частоты при различных условиях согласования:

- нагрузка согласована на частоте среза⁴, а также в нагрузке увеличено активное сопротивление;
- нагрузка и источник имеют только активные составляющие;
- нагрузка имеет реактивность того же характера, что и $X_{\text{вых}}$. При этом были рассмотрены варианты равенства нагрузки выходному сопротивлению на частоте среза и на частоте F_{cp} и на частоте $F_{\text{cp}}/5$. Кроме того, при последнем значении X_H дополнительно увеличивали значение активной составляющей нагрузки.

³ В виде расчетного эксперимента.

⁴ Частота среза – граница полосы пропускания.

На рис. 3 приведены графики указанных зависимостей мощности при различных значениях активной составляющей сопротивления нагрузки. На всех рисунках также присутствует, приводимый во всех учебниках, график передаточной функции по напряжению в режиме холостого хода, возведённой в квадрат (K_U^2). Расчет производился для четырехполюсника с параметрами $Z_1 = 10^3$, $Z_2 = 10^{-1}$, $C_3 = 10^{-9}$, $R_3 = 10^{-4}$. Частота среза для указанных параметров составляет 10^6 рад/с.

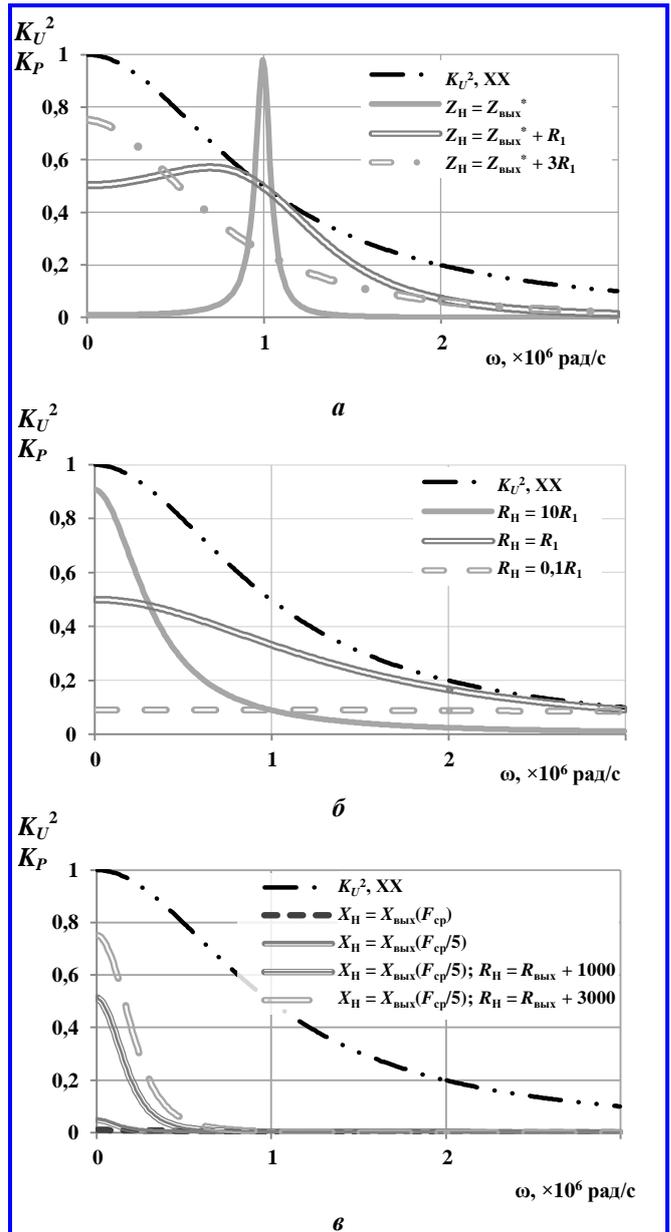


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи мощности при различных условиях согласования/рассогласования нагрузки: согласованная на частоте среза (а), активная (б) и емкостная (в) нагрузки

На приведенных графиках хорошо видно, что коэффициент передачи мощности имеет выраженную частотную зависимость, отличающуюся от коэффициента передачи по напряжению не только амплитудой, но и формой. Причем, при больших значениях активной составляющей нагрузки имеет место корреляция с коэффициентом передачи по напряжению, но со значительным снижением по максимальному значению.

Для случаев с согласованной (имеющей реактивную составляющую) нагрузкой наблюдается ярко выраженный максимум передаточной характеристики. Частота, соответствующая максимуму, совпадает с частотой согласования при малом активном сопротивлении в цепи нагрузки или снижается при повышении этой активной составляющей. Для случаев с активной нагрузкой максимума нет, но максимальное значение и полоса пропускания обратно пропорциональны: при увеличении активной составляющей нагрузки максимум коэффициента передачи мощности стремится к единице, а полоса пропускания – к нулю; и наоборот: при ее уменьшении максимум уменьшается в разы, а полоса пропускания растет. В случае наличия в нагрузке реактивной составляющей одного знака с реактивной составляющей выхода и максимальное значение и полоса пропускания многократно уменьшаются.

Выводы

1. Характер зависимости коэффициента передачи мощности от частоты в значительной степени зависит от характера реактивности сопротивления нагрузки, а также от соотношения величин сопротивлений нагрузки и четырехполюсника. Так, эта зависимость может быть монотонной, а может иметь экстремумы.

2. Максимальное значение мощности в нагрузке P_H в согласованном режиме составляет $\frac{1}{2}$ мощности источника сигнала $P_{ис.с.}$, и при рассогласовании уменьшается. Но так как в цепи присутствуют реактивные элементы разных типов, то возникают

резонансные явления, приводящие к повышению мощности в нагрузке.

3. Граничная частота пропускания четырехполюсника, определяемая с помощью параметра «коэффициент передачи по напряжению» по уровню 0,707 на нормированной амплитудно-частотной характеристике, (что соответствует уровню мощности 0,5) не равен частоте, на которой уровень мощности в нагрузке четырехполюсника снижается до уровня 0,5. В большинстве случаев для фильтра нижних частот эта частота значительно ниже частоты среза.

4. При одинаковом характере реактивности выходного сопротивления и нагрузки целесообразно ставить согласующее звено с реактивностью противоположного характера.

Литература

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / С. И. Баскаков. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2003. – 462 с. : ил.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1986. – 512 с. : ил.
3. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г. И. Атабеков. – Москва : Энергия, 1969. – 424 с. : ил.
4. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. [В 3-х т.] Том 2. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин [и др.]. – 4-е изд., дополненное для самостоятельного изучения курса. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 576 с. : ил.
5. Теоретические основы электротехники : учебное пособие для студентов электротехнических специальностей. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2013. – 201 с. : ил.
6. Воропаев Ю. П. Синтез широкополосных согласующих устройств с использованием среднего гармонического значения коэффициента преобразования мощности / Ю. П. Воропаев, А. Д. Васильев, И. М. Мещеряков // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54. – № 7. – С. 853–862.

Поступила в редакцию 13.06.2023

*Василий Арифович Сафаралеев, преподаватель, т. 8 (905) 234-30-34, e-mail: vsafaraleev@yandex.ru.
(Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации).*

THE PROCEDURE FOR CALCULATING THE POWER TRANSMISSION COEFFICIENT OF A FOUR-POLE DEVICE, TAKING INTO ACCOUNT THE INTERSTAGE MATCHING OF RESISTANCE IN ANALOG INFORMATION PROCESSING DEVICES

V. A. Safaraleev

For an analog signal, power is no less important parameter than amplitude. But very little attention is paid in the literature to the issues of power transmission in electronic equipment. It is known that the voltage transmission coefficient is determined in the idle mode, at which the

power on the load is zero. The power transfer coefficient is determined when working with a load and depends on the quantitative parameters and the nature of its resistance.

In the course of computational experiments, it was found that the power transmission coefficient differs from the voltage transmission coefficient squared, not only in magnitude, but also in shape, which leads to a significant difference in the signal spectrum measured in the load and calculated using the voltage transmission coefficient.

In this paper, the influence of load resistance on the amount of transmitted power in a given frequency band is investigated.

Keywords: quad-pole, load, matching, power, transmission coefficient, boundary frequency, bandwidth.

References

1. Baskakov S. I. Radio circuits and signals : Textbook for universities in the specialty 'Radio engineering' / S. I. Baskakov. – 4th edition, revised and updated. – Moscow : Vysshaya Shkola Publishers, 2003. – 462 p. : with figures.
2. Gonorovsky I. S. Radio circuits and signals : Textbook for universities. – 4th edition, revised and updated. – Moscow : Radio and communications, 1986. – 512 p. : with figures.
3. Atabekov G. I. Circuit Theory Basics. Textbook for universities / G. I. Atabekov. – Moscow : Energia, 1969. – 424 p. : with figures.
4. Theoretical foundations of electrical engineering : textbook for universities. [In 3 volumes] Volume 2. / K. S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin [et al.]. – 4th edition, updated for self-study of the course. – Saint-Petersburg : Piter, 2003. – 576 p. : with figures.
5. Theoretical foundations of electrical engineering : textbook for students studying in electrical engineering specialties. – Minsk : Belarusian National Technical University, 2013. – 201 p. : with figures.
6. Voropayev Yu. P. Synthesis of wideband matching devices using the harmonic mean value of the power conversion factor / Yu. P. Voropayev, A. D. Vasilyev, I. M. Meshcheryakov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2009. – V. 54. – No. 7. – P. 853–862.

*Vasily Arifovich Safaraleev, Lecturer, tel.: 8 (905) 234-30-34, e-mail: vsafaraleev@yandex.ru.
(Federal State Budgetary Military Education Institution of Higher Education «Mozhaisky
Military Aerospace Academy» of the Ministry of Defense of the Russian Federation).*