УДК 621.372; 621.371

СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ АЧХ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ

Рожновский М.В.
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
mixail_exp@list.ru

СПОСІБ УСУНЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ АЧХ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ

Рожновський М.В.
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
mixail_exp@list.ru

METHOD OF ELIMINATION OF HOMOGENEOUS LINE FREQUENCY RESPONSE IRREGULARITY

Rozhnovskiy M.V.
O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.
mixail_exp@list.ru

Аннотация. Предложен способ устранения неравномерности АЧХ однородной линии, основанный на симметрировании распределенных в линии потерь при гармоническом и экспогармоническом воздействии.

Ключевые слова: схема замещения, однородная линия, четырехполюсник, математическая модель, матрица.

Анотація. Запропоновано спосіб усунення нерівномірності АЧХ однорідної лінії, заснований на симетруванні розподілених у лінії втрат при гармонічних та експогармонічних діях.

Ключові слова: схема заміщення, однорідна лінія, чотириполюсник, математична модель, матриця.

Abstract. The method of elimination of homogeneous line frequency response irregularity based on the symmetrization of distributed line losses under harmonic and expoharmonic actions is presented.

Key words: equivalent circuit, homogeneous line, four-pole, mathematical model, matrix.

Линии связи имеют широкое применение в различных отраслях телекоммуникаций, электроники и средствах связи. Развитие электротехники и средств связи обуславливает тенденцию повышения требований к характеристикам проводных линий связи, в частности к их амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ). Известно [1], что неравномерность АЧХ линии приводит к сужению эффективно используемой полосы частот при передаче сигналов по данной линии. Ограничение полосы частот и неравномерность АЧХ линии приводит к тому, что различные частотные составляющие спектра сигналов данных, передаваемых по каналу связи, приходят на выход линии с изменением своих амплитуд. Таким образом, искажается форма принимаемого сигнала, что затрудняет его правильную регистрацию на приемном конце канала связи.

При исследованиях цепей с распределенными параметрами при экспофункциональных воздействиях, основное внимание уделялось компенсации существующих в линиях потерь [1…4], а вопросы уменьшения неравномерности АЧХ в полосе пропускания линии не рассматривались, так как получаемая в среде Multisim [5] характеристика не отображала полную картину. Однако после проведенного анализа математической модели линии при экспофункциональных воздействиях в работе [6] выявлена неравномерность АЧХ модели линии. Поэтому **цель данной статьи** дать способ устранения неравномерности АЧХ линии.

В работе [2] подробно рассмотрены и проанализированы модели однородной линии без искажений. Анализируя результаты работы [2], видно, что на низких частотах неравномерность АЧХ моделей линии действительно отсутствует, но с увеличением частоты на АЧХ появляются колебания, что связано с неточностью модели линии в Multisim. Моделирование той же линии в MathCad с помощью математической модели даст АЧХ в виде прямой линии. Отсутствие неравномерности АЧХ модели однородной линии без искажений связано с симметричностью распределенных потерь в данной линии.

Перед тем как говорить о симметричности или несимметричности распределенных потерь в линии, необходимо раскрыть смысл данных понятий. В работе [7] дано понятие симметричных и несимметричных потерь в электрических LC-фильтрах. Потери в LC-фильтрах называются симметричными, когда добротности катушек индуктивности и конденсаторов равны между собой и, наоборот, потери в LC-фильтрах называются несимметричными в случае, когда добротности катушек индуктивности и конденсаторов не равны между собой.

Так как схема замещения модели линии представляет собой многозвенный фильтр нижних частот типа «*к*» [2], то применительно к цепям с распределенными параметрами можно сказать, что потери в линии симметричны, когда добротности распределенной индуктивности и распределенной емкости равны между собой (однородные линии без искажений [8]) и, соответственно, потери несимметричны, когда добротности распределенной индуктивности и распределенной емкости не равны между собой (однородные линии с произвольными потерями).

Рассмотрим Т-образную схему замещения однородной линии с произвольными потерями (рис. 1).

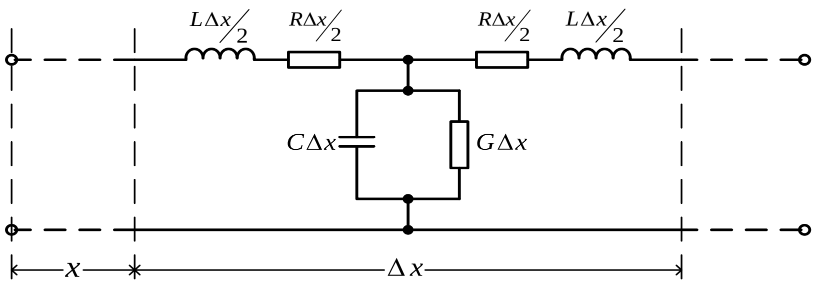

Рисунок 1 – Т-образная схема замещения однородной линии
с произвольными потерями

На рис. 1 представлена Т-образная схема замещения однородной линии с произвольными потерями, где Δx – длина элементарного участка линии; $R\Delta x / 2$ – половина сопротивления элементарного участка линии; $L\Delta x / 2$ – половина индуктивности элементарного участка линии; $C\Delta x$ – емкость элементарного участка линии; $G\Delta x$ – проводимость элементарного участка линии (R, L, C, G – первичные параметры линии).

Известно, что добротность распределенной емкости в линии всегда больше, чем добротность распределенной индуктивности. Один из способов уравнять добротности распределенных индуктивности и емкости в линии – это введение дополнительной проводимости изоляции G_1 между проводниками линии (рис. 2).

На рис. 2 видно, что дополнительная проводимость G_1 разбивает длину элементарного участка Δx на две части. Такое разделение обусловлено тем, что дополнительная проводимость G_1 представляет собой сосредоточенный элемент с определенной величиной проводимости.

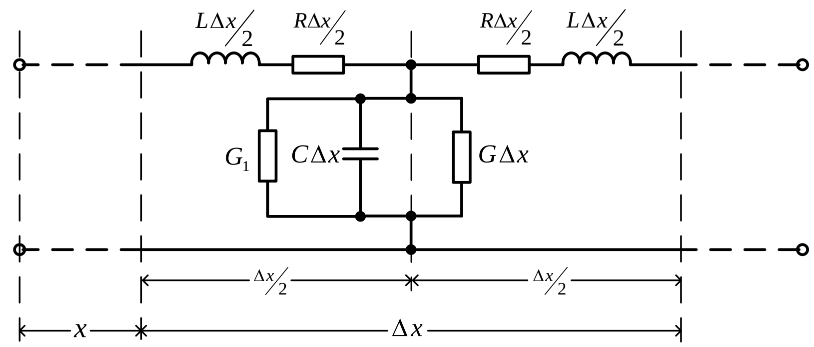

Рисунок 2 – Т-образная схема замещения однородной линии
с произвольными потерями с введенной дополнительной проводимостью

Величину дополнительной проводимости изоляции для симметрирования распределенных потерь в линии определяем исходя из следующих рассуждений: определим добротности распределенной емкости и индуктивности в линии, опираясь на известные формулы для цепей с сосредоточенными параметрами [8]

$$Q_{L\Delta x} = \frac{\omega \cdot L\Delta x}{R\Delta x}, \tag{1}$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота,

$$Q_{C\Delta x} = \frac{\omega \cdot C\Delta x}{G\Delta x}. \tag{2}$$

Для симметричности потерь в линии необходимо, чтобы выполнялось следующее условие

$$Q_{C\Delta x} = Q_{L\Delta x}, \tag{3}$$

а это невозможно для линии с произвольными потерями. Выполнение равенства (3) возможно в случае, когда выражение (2) имеет вид

$$Q_{C\Delta x1} = \frac{\omega \cdot C\Delta x}{G_{\Sigma}}, \tag{4}$$

где G_{Σ} – суммарная величина проводимости изоляции, необходимая для выполнения равенства (3), которая определяется по формуле:

$$G_{\Sigma} = G\Delta x + G_1. \tag{5}$$

Подставив выражения (1) и (4) ($Q_{C\Delta x1}$ вместо $Q_{C\Delta x}$) в выражение (3), получим равенство

$$\frac{\omega \cdot C\Delta x}{G\Delta x + G_1} = \frac{\omega \cdot L\Delta x}{R\Delta x}. \tag{6}$$

Преобразовав выражения (6), можно получить дополнительную сосредоточенную проводимость изоляции G_1, необходимую для того, чтобы распределенные потери в линии были симметричны

$$G_1 = \frac{C\Delta x \cdot R\Delta x}{L\Delta x} - G\Delta x. \tag{7}$$

Далее, зная величину дополнительной сосредоточенной проводимости изоляции линии G_1, определим величину значения сопротивления необходимого для реализации данной проводимости по известной формуле

$$R_1 = \frac{1}{G_1}. \tag{8}$$

На следующем этапе для подтверждения вышесказанных доводов необходимо создать математическую модель линии с учетом дополнительной симметрирующей проводимости G_1.

Рассмотрим элементарный участок линии длиной Δx с учетом симметрирующей проводимости G_1 как каскадное соединение симметричных четырехполюсников [8, 9] (рис. 3): четырехполюсник A_1 – отрезок линии длиной $\frac{\Delta x}{2}$; четырехполюсник A_2 – простейший одноэлементный четырехполюсник.

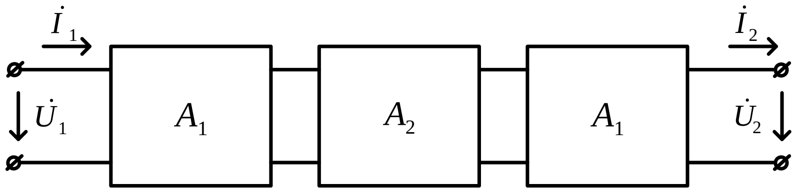

Рисунок 3 – Каскадное соединение четырехполюсников

Запишем отдельно математические модели для каждого четырехполюсника рис. 3.

Математическая модель симметричного четырехполюсника A_1 – это матрица $[A_1]$, которая для отрезка однородной линии длиной $\Delta x/2$ выглядит следующим образом [8, 9]

$$[A_1]=\begin{bmatrix} ch\left(\gamma\frac{\Delta x}{2}\right) & Z_{\text{в}}sh\left(\gamma\frac{\Delta x}{2}\right) \\ \frac{1}{Z_{\text{в}}}sh\left(\gamma\frac{\Delta x}{2}\right) & ch\left(\gamma\frac{\Delta x}{2}\right) \end{bmatrix}. \tag{9}$$

В данной матрице γ – это коэффициент распространения линии, который рассчитывается по формуле [8]

$$\gamma=\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}, \tag{10}$$

$Z_{\text{в}}$ – это волновое сопротивление линии, которое рассчитывается по формуле [8]

$$Z_{\text{в}}=\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}. \tag{11}$$

В свою очередь, значение Δx определяется по формуле:

$$\Delta x=\frac{l}{n}, \tag{12}$$

где l – длина отрезка линии; n – количество элементарных участков, на которое разбита длина отрезка линии l.

На следующем шаге рассмотрим четырехполюсник A_2. Этот четырехполюсник представляет собой простейший одноэлементный четырехполюсник, состоящий из параллельного двухполюсника [9] (рис. 4).

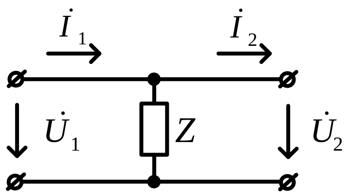

Рисунок 4 – Одноэлементный четырехполюсник

Запишем матрицу $[A_2]$ для четырехполюсника, показанного на рис. 3 [8, 9]

$$[A_2]=\begin{bmatrix}1 & 0\\ \dfrac{1}{Z} & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ G_1 & 1\end{bmatrix}. \tag{13}$$

Согласно рис. 3 эквивалентная матрица $[A_{экв}]$ одного элементарного участка линии записывается в следующем виде

$$[A_{экв}]=[A_1]\cdot[A_2]\cdot[A_1]. \tag{14}$$

После несложных математических преобразований эквивалентную матрицу $[A_{экв}]$ можно записать в следующем виде

$$[A_{экв}]=\begin{bmatrix} ch(\gamma\cdot\Delta x)+\dfrac{G_1\cdot Z_в\cdot sh(\gamma\cdot\Delta x)}{2} & G_1\cdot Z_в{}^2\cdot sh\left(\dfrac{\gamma\cdot\Delta x}{2}\right)^2+sh(\gamma\cdot\Delta x)\cdot Z_в\\ \dfrac{G_1}{2}+\dfrac{sh(\gamma\cdot\Delta x)}{Z_в}+\dfrac{G_1\cdot ch(\gamma\cdot\Delta x)}{2} & ch(\gamma\cdot\Delta x)+\dfrac{G_1\cdot Z_в\cdot sh(\gamma\cdot\Delta x)}{2}\end{bmatrix}, \tag{15}$$

где G_1 – это значение дополнительно вносимой величины проводимости изоляции, которое рассчитывается по формуле (7).

Так как отрезок линии длиной l состоит из n элементарных участков, то его модель соответствует следующему виду, показанному на рис. 5.

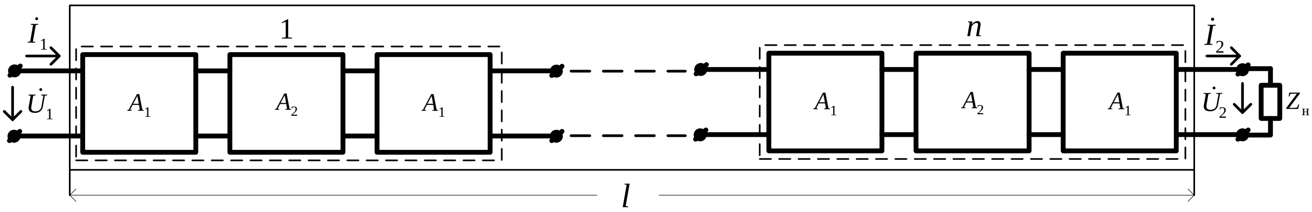

Рисунок 5 – Модель отрезка линии длиной l
на примере каскадного соединения n четырехполюсников

Согласно рис. 5 эквивалентную матрицу $[A_{экв}]$ (15) для всего отрезка линии необходимо записать в следующем виде

$$[A_{экв}]^n=\begin{bmatrix} ch(\gamma\cdot\Delta x)+\dfrac{G_1\cdot Z_в\cdot sh(\gamma\cdot\Delta x)}{2} & G_1\cdot Z_в{}^2\cdot sh\left(\dfrac{\gamma\cdot\Delta x}{2}\right)^2+sh(\gamma\cdot\Delta x)\cdot Z_в\\ \dfrac{G_1}{2}+\dfrac{sh(\gamma\cdot\Delta x)}{Z_в}+\dfrac{G_1\cdot ch(\gamma\cdot\Delta x)}{2} & ch(\gamma\cdot\Delta x)+\dfrac{G_1\cdot Z_в\cdot sh(\gamma\cdot\Delta x)}{2}\end{bmatrix}^n, \tag{16}$$

где значение степени n равно количеству элементарных участков, на которое разбита длина отрезка линии l.

Оперируя матрицей (16) в программном математическом пакете MathCad, с учетом того, что эквивалентный четырехполюсник, изображенный на рис. 5, нагружен на $Z_н$, можно построить передаточную функцию по напряжению в следующем виде [8, 9]

$$\dot{K}_U(\omega)=\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}=K(\omega)\cdot e^{-j\varphi(\omega)}=\frac{Z_н}{A_{11}Z_н+A_{12}}, \tag{17}$$

где $K(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазочастотная характеристика (ФЧХ); A_{11}, A_{12} – элементы матрицы $[A_{экв}]^n$; $Z_н$ – сопротивление нагрузки.

Для подтверждения полученных результатов проведем эксперимент в программном математическом пакете MathCad, в ходе которого отсимметрируем потери в однородной линии с произвольными потерями.

Рассмотрим модель линии со следующими параметрами: длина линии $l = 40$ км, количество элементарных участков $n = 40$ (следовательно, $\Delta x = 1$ км), первичные параметры соответствуют следующим значениям: $R = 42{,}9$ Ом/км, $G = 0{,}14\times10^{-6}$ См/км, $L = 7{,}77\times10^{-3}$ Гн/км, $C = 6\times10^{-9}$ Ф/км, сопротивление нагрузки $R_н = 1137{,}98$ Ом, значение дополнительно вносимой величины проводимости изоляции $G_1 = 0$ См. Параметр λ, который характеризует экспофункциональное воздействие для полной компенсации потерь в линии, рассчитан по формуле [4]

$$\lambda = \frac{RC + GL}{2LC} \tag{18}$$

и равен (для данной линии) $\lambda = 2772$ с$^{-1}$.

АЧХ данной модели линии с несимметричными потерями представлено на рис. 6

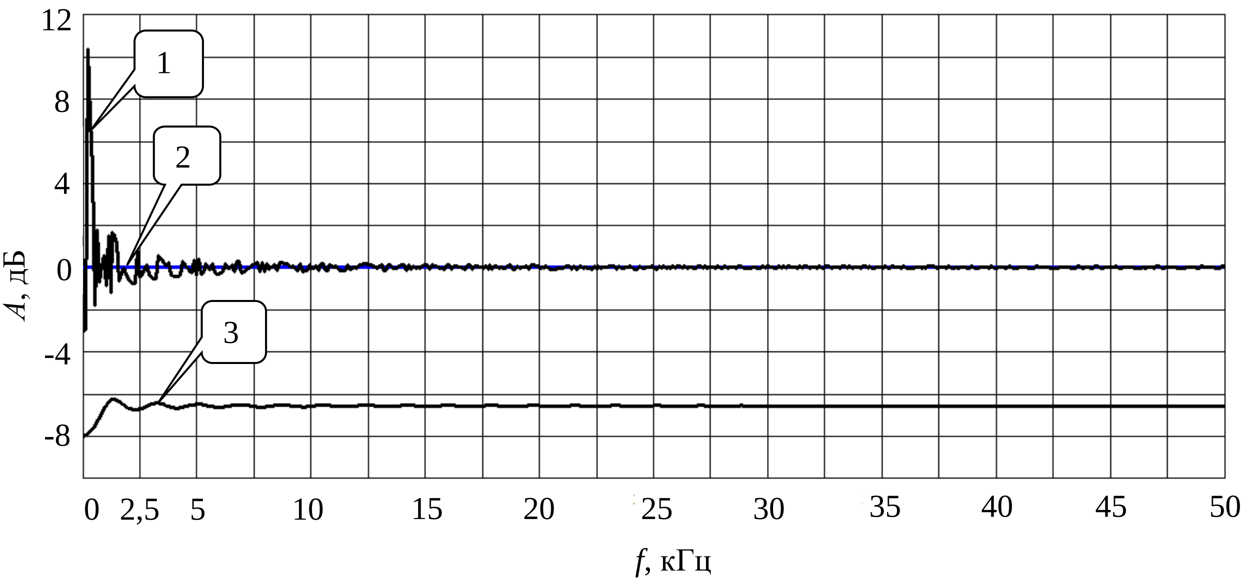

Рисунок 6 – АЧХ моделей однородной линии с несимметричными потерями в пакете MathCad

На рис. 6 показаны характеристики, полученные в MathCad, для модели однородной линии с произвольными потерями: кривая под номером 1 – это АЧХ модели линии при экспофункциональном воздействии; кривая под номером 2 – это АЧХ модели линии без потерь ($R = 0$, $G = 0$); кривая под номером 3 – это АЧХ модели линии с потерями.

На следующем шаге эксперимента проведем симметрирование потерь в данной линии. Для этого определим необходимую дополнительную проводимость изоляции линии по формуле (7) $G_1 = 3{,}299\times10^{-5}$ См. Подставим полученное значение G_1 в математическую модель однородной линии с произвольными потерями и построим кривые АЧХ в MathCad рис. 7.

На рис. 7 показаны характеристики, полученные в MathCad, для модели однородной линии с симметричными потерями: кривая под номером 1 – это АЧХ модели линии при экспофункциональном воздействии; кривая под номером 2 – это АЧХ модели линии без потерь ($R = 0$, $G = 0$); кривая под номером 3 – это АЧХ модели линии с потерями.

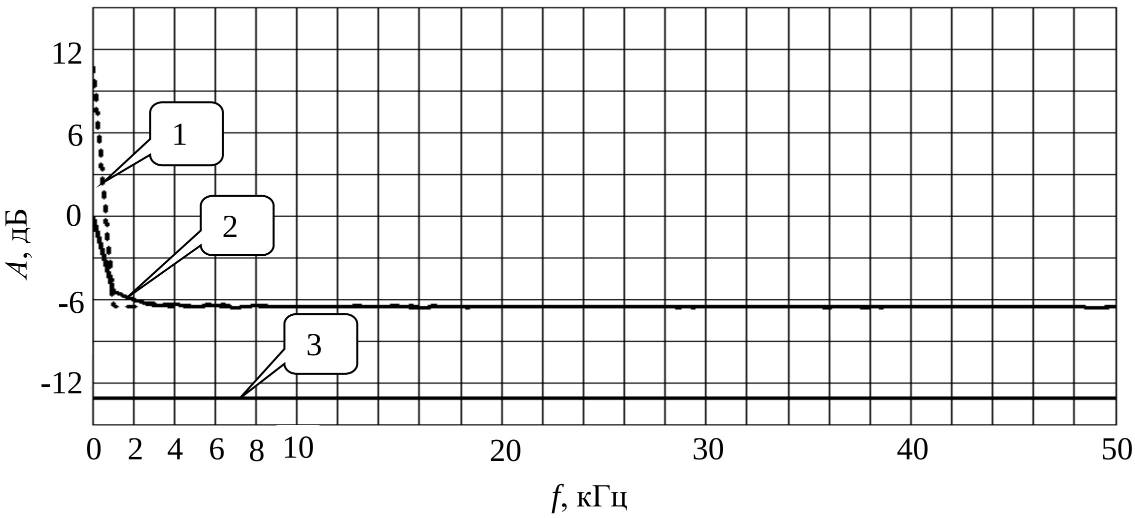

Рисунок 7 – АЧХ моделей однородной линии с симметричными потерями в пакете MathCad

Сравнивая и анализируя кривые на рис. 6 и 7, можно увидеть, что:

1. Неравномерность АЧХ под номером 1 (АЧХ при экспофункциональном воздействии) на рис. 7 значительно уменьшилась по отношению к неравномерности той же кривой на рис. 6. Из рис. 7 и рис. 6 видно, что неравномерность в диапазоне частот 0…1 кГц практически не изменилась, однако в диапазоне частот 1…2,5 кГц неравномерность после симметрирования потерь в линии уменьшилась на 3 дБ. В результате, после симметрирования потерь в линии, кривая АЧХ (рис. 7) не содержит неравномерностей в диапазоне частот от 1 кГц и выше по всему диапазону.

2. Кривая АЧХ под номером 3 на рис. 7 приобрела вид прямой линии, а на рис. 6 та же кривая содержит значительную неравномерность на низких частотах (до 5 кГц).

3. АЧХ под номером 2 на рис. 7 приобрела неравномерность (величиной в 6 дБ) на частотах до 2 кГц по отношению к той же кривой на рис. 6.

Необходимо отметить, что в результате симметрирования потерь в цепи с распределенными параметрами за счет введения дополнительной проводимости изоляции линии была исключена неравномерность АЧХ линии на всем диапазоне частот, начиная с 1 кГц. В то же время, все характеристики, показанные на рис. 7, получили дополнительное затухание, равное 6,5 дБ по отношению к тем же характеристикам на рис. 6. Данное затухание можно скомпенсировать, если включить на выходе линии усилитель с коэффициентом усиления, который равен 2,1.

Таким образом, в данной статье предложен способ устранения неравномерности АЧХ однородной линии при условии возбуждения данной линии гармоническим и экспогармоническим воздействием. Предложенный способ основан на методе симметрирования потерь в однородной линии. Полученные результаты позволят расширить полосу частот сигналов, в том числе и экспофункциональных, передаваемых по однородным линиям. Недостатком предложенного способа является внесение дополнительного затухания сигнала в линии.

К направлениям дальнейших исследований в данной области следует отнести анализ возможности компенсации внесенного дополнительного затухания сигнала в линии с помощью экспофункционального воздействия.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иваницкий А.М. Исследование прохождения экспофункциональных сигналов через линейные электрические цепи с распределенными параметрами / А.М. Иваницкий, Д.Г. Паску // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одесса. – 2008. – № 2. – С. 5 – 9.

2. Иваницкий А.М. Телеграфные уравнения однородных линий при экспофункциональных сигналах / А.М. Иваницкий, М.В. Рожновский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одесса. – 2009. – № 1. – С. 56 – 63.
3. Иваницкий А. М. Прохождение экспо-П-образных сигналов через длинную однородную линию без искажений / А.М. Иваницкий, М.В. Рожновский // Цифровые технологии. – 2008. - № 4. – С. 93 – 102.
4. Ivanitckiy, A. M., and M. V. Rozhnovskiy. "The General Form of Secondary Parameters of Uniform Line under Expofunctional Actions."Radioelectronics and Communications Systems 54.6 (2011): 37-42.
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и Matlab. – [5-е изд., перераб. и доп.] / Карлащук В.И. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 799 с.
6. Иваницкий А.М. Компенсация потерь в линиях с частотнозависимыми первичными параметрами *R* и *G* с помощью экспофункциональных сигналов / А.М. Иваницкий, М.В. Рожновский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. — С. 93 – 101.
7. Иваницкий А. М. Метод исследования *LC*-фильтров с различными величинами добротностей катушек индуктивности и конденсаторов при экспофункциональных сигналах / А.М. Иваницкий, Д.Г. Паску, М.В. Рожновский // Радиотехника. – Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 154. – С. 74 – 80.
8. Атабеков Г.И. Основы теории цепей: учебник для вузов / Атабеков Г.И.– М.: Энергия, 1969. – 424 с.
9. Зелях Э.В. Основы общей теории линейных электрических схем / Зелях Э.В. – М.: АН СССР, 1951. – 236 с.

REFERENCES:

1. Ivanitckiy, A. M., and D. G. Pascu. "Investigation of Expofunctional Signals Passage through Linear Electric Circuits with Distributed Parameters." Proc. of the O.S. Popov ONAT 2 (2008): 5-9.
2. Ivanitckiy, A. M., and M. V. Rozhnovskiy. "The Telegraph Equations of Homogeneous Lines under Expofunctional Signals." Proc. of the O.S. Popov ONAT 1 (2009): 56-63.
3. Ivanitckiy, A. M., and M. V. Rozhnovskiy. "Passage of the Expo-П-Type Signals through the Long Homogeneous Line without Distortions." Digital Technologies 4 (2008): 93-102.
4. Ivanitckiy, A. M., and M. V. Rozhnovskiy. "The General Form of Secondary Parameters of Uniform Line under Expofunctional Actions."Radioelectronics and Communications Systems 54.6 (2011): 37-42.
5. Karlaschuk, V. I. Electronic Laboratory on IBM PC. Laboratory Practicum on the Base of Workbench and Matlab. 5th ed. Moscow: Solon-Press, 2004.
6. Ivanitckiy, A. M., and M. V. Rozhnovskiy. "Losses Compensation in Lines with Frequency-Dependent Primary Parameters R and G by Means of the Expofunctional Signals." Proc. of the O.S. Popov ONAT 1 (2010): 93-101.
7. Ivanitckiy, A. M., D. G. Pascu, and M. V. Rozhnovskiy. "Research Method of LC-filter with Different Values of the Quality Factor of Inductances and Capacitors under Expofunctional Signals." Radiotechnics. 154 (2008): 74-80.
8. Atabecov, G. I. Basics of Circuit Theory. Moscow: Energy, 1969.
9. Zelyah, E.V. Basics of the general theory of linear electric circuits. Moscow: USSR SA, 1951.