

УДК 621.372; 621.371

**ПРОХОЖДЕНИЕ ЭКСПО-П-ОБРАЗНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ДЛИННУЮ
ОДНОРОДНУЮ ЛИНИЮ БЕЗ ИСКАЖЕНИЙ**

ИВАНИЦКИЙ А.М., РОЖНОВСКИЙ М.В.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**PASSAGE OF THE EXPO-P-TYPE SIGNALS THROUGH THE LONG HOMOGENEOUS
LINE WITHOUT DISTORTIONS**

IVANITSKIY A.M., ROZHNOVSKIY M.V.

Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov

Аннотация. Дано понятие экспо – П - образного сигнала и периодического экспо – П - образного сигнала, рассмотрена проблема учета задержки сигнала проходящего через длинную однородную линию при экспо воздействии, экспериментально доказано способность экспо – П - образного сигнала компенсировать потери в длинной однородной линии.

Summary. The concept of an Expo - P - type signals and periodic Expo - P - type signals is given, the problem of the account of a delay of a signal taking place through a long homogeneous line under expofunctional excitation is considered, ability of an Expo - P - type signals to compensate loss in a long homogeneous line is proved experimentally.

Ограничение длины рабочего участка любой кабельной линии передачи связано с проблемой увеличения затухания полезного сигнала на данном участке. Величина затухания сигнала в линии напрямую зависит от наличия потерь в погонных реактивных элементах кабельной линии.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования электрических цепей при экспофункциональных воздействиях доказали реальность существования и возможность использования явления выделения активной мощности реактивными элементами электрической цепи [1] для компенсации существующих в них потерь. Такие исследования проведены относительно электрических избирательных цепей с сосредоточенными параметрами (см., например, [2...4]). Кроме электрических цепей с сосредоточенными параметрами исследовались электрические цепи с распределенными параметрами при экспофункциональном воздействии. В работе [5] исследованы амплитудно-частотные и переходные характеристики систем, содержащих электрические цепи с распределенными параметрами, эквивалентные коротким однородным линиям без искажений, при экспогармоническом воздействии и исследованы отклики таких систем на последовательность прямоугольных импульсов. В работе [6] рассмотрены телеграфные уравнения однородных линий при экспофункциональных сигналах и исследованы амплитудно-частотные характеристики длинных однородных линий без искажений. Однако исследования прохождения экспо - П-образных сигналов через длинную однородную линию без искажений не проводились. Поэтому цель данной статьи – провести такие исследования.

1. ЭКСПО-П-ОБРАЗНЫЙ СИГНАЛ

Использование единичной функции

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

создает удобство для записи сигналов, имеющих скачки [7]. Так П-образный сигнал, который действует от t_1 до t_2 можно записать в виде $F_m \left[(t-t_1) - 1(t-t_2) \right]$, где $F_m > 0$. Назовем экспо-П-образным сигналом П-образный сигнал, умноженный на экспоненту, т.е. описываемый функцией вида:

$$f(t) = e^{\pm \lambda t} F_m \left[(t-t_1) - 1(t-t_2) \right], \quad (2)$$

где $\lambda > 0$. Используя вид функции (2), можно записать функцию, соответствующую периодическому экспо-П-образному сигналу

$$f_T(t) = F_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{\pm \lambda t(t-nT)} \left[(t-t_1-nT) - 1(t-t_2-nT) \right], \quad (3)$$

где T – период функции; $T \geq t_2 - t_1$. Периодический экспо-П-образный сигнал удобно использовать при натуральных исследованиях, так как его изменения при прохождении через линию можно наблюдать на экране осциллографа. При $F_m = 1$, $t_1 = 0$, $T = t_2$ и нижнем знаке при λ функция (3) совпадает с экспоступенчатой функцией [8].

Исследование длинных однородных линий без искажений обострили проблему учета задержки сигнала при его прохождении по линии. Рассмотрение этой проблемы начато в [8]. Однако при проведении более поздних исследований использовались частотно-избирательные цепи с временем задержки сигнала t_3 значительно меньше, чем период T экспоступенчатой функции, т.е. выполнялось условие:

$$t_3 \ll T. \quad (4)$$

Поэтому каких-либо существенных влияний t_3 не наблюдалось. При исследованиях однородных линий без искажений t_3 становилось соизмеримым с T . И с этим необходимо было считаться.

Рассмотрим указанную выше проблему более подробно. Известно [9], что для T -волны в однородной линии фазовая скорость v_ϕ , групповая скорость v_{gp} и скорость распространения энергии v_s сигнала совпадают и равны фазовой скорости распространения сигнала T -волны в свободном пространстве с параметрами пространства, окружающего линию. Эту скорость можно рассчитать [10]:

$$v_s = v_\phi = v_{gp} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}, \quad (5)$$

где L, C – первичные параметры линии; ε_a, μ_a – параметры пространства, окружающего линию. Отсюда следует формула для расчета группового времени t_{gp} и времени прохождения энергии сигнала t_s вдоль линии длиной l , т.е. t_s :

$$t_3 = t_{zp} = t_3 = l\sqrt{LC} = l\sqrt{\varepsilon_a\mu_a}. \quad (6)$$

Эту же формулу можно получить из соотношения:

$$t_3 = t_{zp} = \frac{dB_c}{d\omega} = \frac{d\beta l}{d\omega} \quad (7)$$

для однородной линии без искажений и однородной линии без потерь при согласованной нагрузке $R_H = \sqrt{\frac{L}{C}}$, подставив в (7) выражение $\beta = \omega\sqrt{LC}$ [7], т.е.:

$$t_3 = t_{zp} = \frac{d\omega\sqrt{LC}l}{d\omega} = l\sqrt{LC}. \quad (8)$$

Для дальнейшего использования введем параметр однородной линии t_n – время задержки линии на единицу длины:

$$t_n = \frac{t_3}{l} = \sqrt{LC} \text{ [с/км] или [с/м]} \quad (9)$$

или на основании формулы (7):

$$t_n = \frac{d\beta}{d\omega}. \quad (10)$$

Отсюда,

$$t_3 = lt_n. \quad (11)$$

Если t_3 удовлетворяет условию (4), то такую линию будем условно называть короткой линией. Если же нарушается условие (4), то – длиной линией.

Для однородной линии без искажений и однородной линии без потерь найдены простые зависимости между временными функциями напряжения в любой точке линии и временными функциями напряжения в начале линии при согласованной нагрузке на выходе линии [11]:

$$u_x(t) = e^{-\sqrt{RG}x} u_0(t - t_{nx}) - \quad (12)$$

для однородной линии без искажений,

$$u_x(t) = u_0(t - t_{nx}) - \quad (13)$$

для однородной линии без потерь.

Когда $x = l$, т.е. для напряжений в конце линий с учетом равенства (11)

$$u_l(t) = e^{-\sqrt{RG}l} u_0(t - t_3), \quad (14)$$

$$u_l(t) = u_0(t - t_3). \quad (15)$$

При экспофункциональном воздействии на однородную линию без искажений появляются особенности, которые рассмотрим ниже. Пусть напряжение на входе однородной линии без искажений при согласованной нагрузке на выходе линии имеет вид:

$$u_0(t) = e^{-\lambda t} \tilde{u}_0(t), \quad (16)$$

где $\lambda > 0$; $\tilde{u}_0(t)$ – ядро экспофункции, преобразуемое по Фурье. В силу свойства консервативности экспофункций [12], все напряжения и токи заданной цепи (в данном случае однородной линии) при экспофункциональном воздействии являются так же экспофункциями с экспоненциальным множителем, совпадающим с экспоненциальным множителем воздействия. Поэтому при воздействии вида (16) достаточно рассчитать ядра экспофункций напряжений и токов [13].

Пусть величина λ удовлетворяет условию полной компенсации потерь линии без искажений [11]:

$$\lambda = \frac{R}{L} = \frac{G}{C}. \quad (17)$$

Тогда ядро экспофункции напряжения в любой точке линии можно найти, используя уравнение (13):

$$\tilde{u}_x(t) = \tilde{u}_0(t - t_{\text{н}x}). \quad (18)$$

А сама искомая функция напряжения в любой точке линии на основании свойства консервативности многомерных экспофункций имеет вид:

$$u_x(t) = e^{-\lambda t} \tilde{u}_x(t) = e^{-\lambda t} \tilde{u}_0(t - t_{\text{н}x}) = e^{-\lambda t_{\text{н}x}} e^{-\lambda(t-t_{\text{н}x})} \tilde{u}_0(t - t_{\text{н}x}) = e^{-\lambda \Delta t} u_0(t - \Delta t) \quad (19)$$

где $\Delta t = t_{\text{н}x}$; когда $x = l$ $\Delta t = t_{\text{н}l} = t_3$, т.е. функция напряжения в любой точке линии совпадает с функцией входного напряжения линии, задержанной на время Δt и уменьшенной в $e^{-\lambda \Delta t}$ раз. Найдем значение:

$$\lambda \Delta t. \quad (20)$$

Подставим в это значение λ из формулы (17) и Δt , используя формулу (9), равенство $\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$ [11] и выражения, согласно которому записывается затухание для однородных линий без искажений [7] $\alpha = \sqrt{RG}$,

$$\lambda \Delta t = \frac{R}{L} \sqrt{LC} x = R \sqrt{\frac{C}{L}} x = R \sqrt{\frac{G}{R}} x = \sqrt{RG} x = \alpha x = \lambda t_{\text{н}x}, \quad (21)$$

то есть,

$$\alpha = \lambda t_{\text{н}}. \quad (22)$$

Таким образом,

$$e^{-\lambda \Delta t} = e^{-\alpha x} . \quad (23)$$

Из формулы (23) видно, сравнивая выражения (19) и (12), что масштабный множитель, появляющийся за счет задержки сигнала на $\Delta t = t_{\text{д.л}}$, равен масштабному множителю, который характеризует ослабление сигнала за счет потерь в линии. Все сказанное выше относительно экспофункционального воздействия вида (16) составляет особенность применения такого вида воздействия на однородную линию без искажений при величине λ , обеспечивающую полную компенсацию потерь в линии (λ рассчитывается по формуле (17)), т.е. ядро экспофункции $\tilde{u}_0(t)$ входного воздействия (16) в любой точке линии задерживается на время Δt без изменения масштаба $\tilde{u}_0(t)$, так как потери линии скомпенсированы, и в любой точке линии экспоненциальный множитель равен экспоненциальному множителю воздействия (16) в силу свойства консервативности экспофункций. Это необходимо учитывать при исследовании линий и избирательных устройств с помощью устройства измерения АЧХ систем, содержащих реактивные элементы, модернизация которого описана в [14]. В указанном устройстве применяется генератор экспоступенчатой функции с периодом T и генератор функции, обратной экспоступенчатой с тем же периодом T , для восстановления формы входного воздействия. В этом устройстве имеется схема задержки сигнала на Δt в цепи управления работой генератора обратной экспоступенчатой функции. С помощью изменения Δt можно вводить задержку в выходную обратную экспоступенчатую функцию по отношению к входной экспоступенчатой функции. При $\Delta t = 0$ указанные генераторы работают синхронно, т.е. когда периоды указанных функций совпадают во времени. В этом случае можно наблюдать процессы, происходящие в испытуемом устройстве в течении времени T . Назовем T – максимальным временем сеанса связи. Если ядро экспофункции входного сигнала линии задерживается на время t_3 , т.е. сигнал к концу линии приходит на время t_3 позже, то время сеанса связи уменьшается на величину, равную t_3 , и составляет $T - t_3$, т.е. время сеанса связи не используется полностью. Это укорачивает время наблюдения процесса на выходе системы. Например, если производится наблюдение временной зависимости П-образных сигналов при передаче их по линии, то это дополнительно ограничивает увеличение длительности испытательного П-образного сигнала. Поэтому требуется увеличивать T . Если на входе линии в течении периода T подан сигнал вида (16), то в этом случае на выходе за тот же период для компенсации экспоненциального множителя $e^{-\lambda \Delta t}$ необходимо иметь множитель $e^{\lambda \Delta t}$. Значение $e^{\lambda \Delta t}$ при $t = T$ является максимальным и ограничено величиной напряжения источника питания.

Если по каким-то причинам необходимо вводить для исследования в схему задержки сигнала $\Delta t \neq 0$, то в множителе на выходе $e^{\lambda t}$ появится задержка Δt , т.е. множитель имеет вид:

$$e^{\lambda(t-\Delta t)} = e^{-\lambda \Delta t} e^{\lambda t} . \quad (24)$$

Из равенства (24) видно, что если в схеме задержки сигнала $\Delta t \neq 0$, то на выходе системы нужно ввести дополнительный усилитель с коэффициентом усиления по напряжению, равным $e^{+\lambda \Delta t}$, для компенсации масштабного множителя $e^{-\lambda \Delta t}$.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭКСПО-П-ОБРАЗНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ОДНОРОДНУЮ ЛИНИЮ БЕЗ ИСКАЖЕНИЙ

Проиллюстрируем изложенные в пункте 1 доказательства с помощью проведения экспериментов в среде Multisim. Для этого будем использовать модели линий описанные в [11]. Определим t_3 линии экспериментально следующим образом: подадим на вход модели линии одиночный П - импульс длительностью 200 мкс, представленный на рис. 1, и будем отслеживать его появление на выходе во временной области. Время появления данного импульса на выходе, а точнее середины его нарастающего фронта, и составляет t_3 линии.

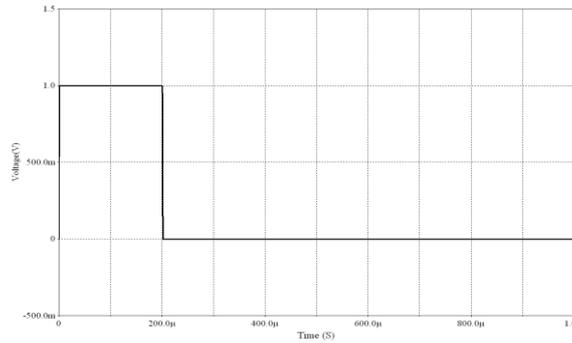


Рисунок 1 П - импульс на входе модели линии

На рисунках 2 – 4 показаны П - импульсы на выходе различных линий.

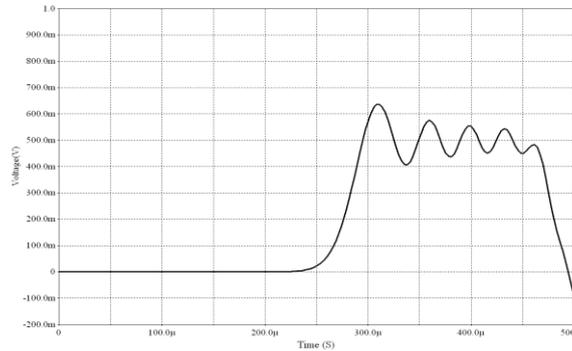


Рисунок 2 П - импульс на выходе линии без потерь длиной 40 км ($n = 40$)

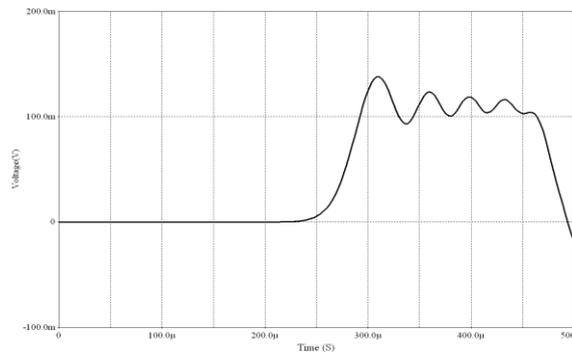


Рисунок 3 П - импульс на выходе линии с потерями длиной 40 км ($n = 40$)

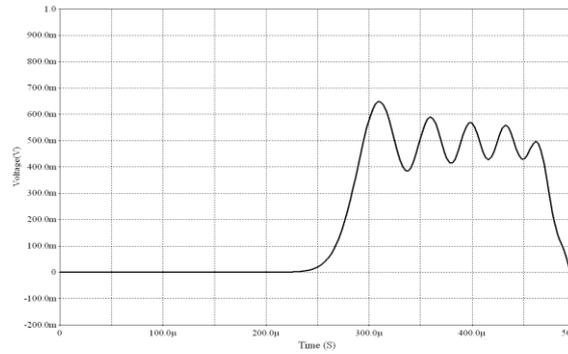


Рисунок 4 П - импульс на выходе линии с потерями длиной 40 км при экспофункциональном воздействии ($n = 40$)

Полученные результаты показывают, что t_3 линии длиной 40 км во всех случаях составляет 273 мкс, что совпадает с расчетным значением согласно формуле (8), а $t_{д}$, согласно формуле (9), составляет 6,825 мкс/км.

Дальше проведем эксперименты по прохождению экспо - П-образного сигнала через модель линии. Для этого возьмем две модели линии длиной по 40 км при условии, что в каждой количество звеньев $n = 40$ ($t_3 = 273$ мкс). Одна из этих линий будет идеальная (без потерь), а другая – реальная (с потерями) [11]. Через идеальную линию будем пропускать обычный П - импульс, а через реальную – экспо - П-образны импульс (максимальная длительность сеанса связи $T = 500$ мкс) и сравнивать их на выходе. Подав на вход обеих линий одиночные импульсы длительностью 100 мкс, наблюдаем следующую картину на выходе (рис. 5). На рис. 5 видим, что импульсы одинаковы по амплитуде, а также видим, что время

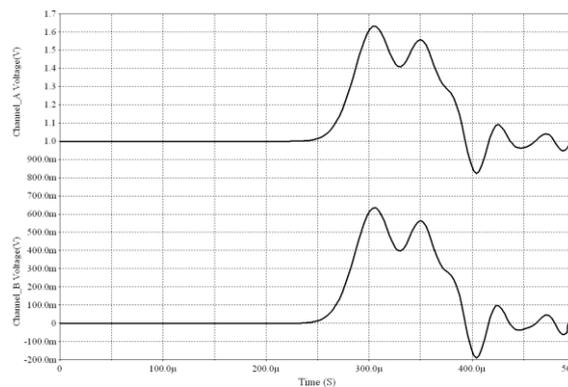


Рисунок 5 П - импульс длительностью 100 мкс на выходе линии без потерь (канал А) и с потерями при экспофункциональном воздействии (канал В) длиной 40 км ($n = 40$)

задержки $t_3 = 273$ мкс, следовательно, реальная длительность сеанса связи составляет $T - t_3 = 227$ мкс. Увеличим длительность П - импульса на 100 мкс и опять подадим на вход линий. П- импульс на выходе линии показан на рис. 6. На этом рисунке видим, что:

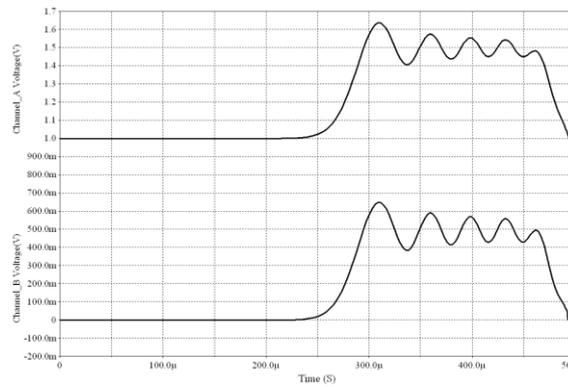


Рисунок 6 П- импульс длительностью 200 мкс на выходе линии без потерь (канал А) и с потерями при экспофункциональном воздействии (канал В) длиной 40 км ($n = 40$)

длительность П - импульса увеличилась до 200 мкс и еще укладывается в реальную длительность сеанса связи. На следующем этапе увеличим длительность П - импульса еще на 100 мкс, что уже выходит за рамки сеанса связи (рис. 7). В результате, на рис. 7 видим, что конец сеанса связи обрывает восстановленный экспо - П-образный импульс.

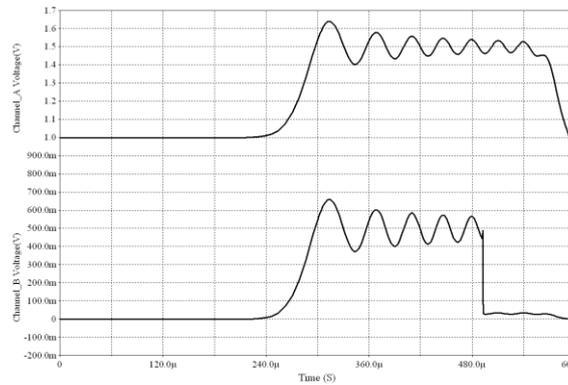


Рисунок 7 П - импульс длительностью 300 мкс на выходе линии без потерь (канал А) и с потерями при экспофункциональном воздействии (канал В) длиной 40 км ($n = 40$)

Продлим сеанс связи за счет внесения Δt на приемном конце линии (рис. 8). Результат

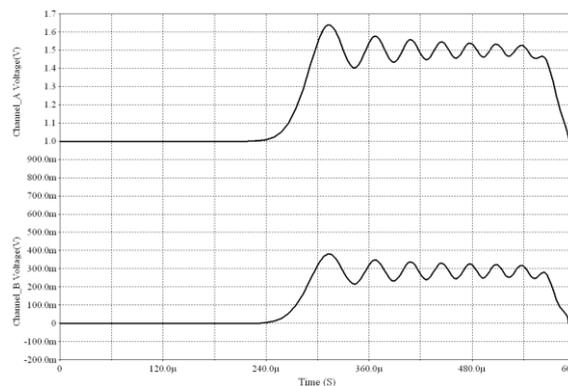


Рисунок 8 П - импульс длительностью 300 мкс на выходе линии без потерь (канал А) и с потерями при экспофункциональном воздействии (канал В) длиной 40 км с введенным $\Delta t = 100$ мкс ($n = 40$)

на рис. 8 показано, что длительность восстановленного экспо- П-образного импульса такая же, как и длительность П - импульса на выходе идеальной линии, однако амплитуда восстановленного экспо - П-образного импульса значительно меньше. Восстановим амплитуду экспо - П-образного импульса, усилив его на величину $e^{\lambda\Delta t}$ (рис. 9). На рис. 9 видно, что

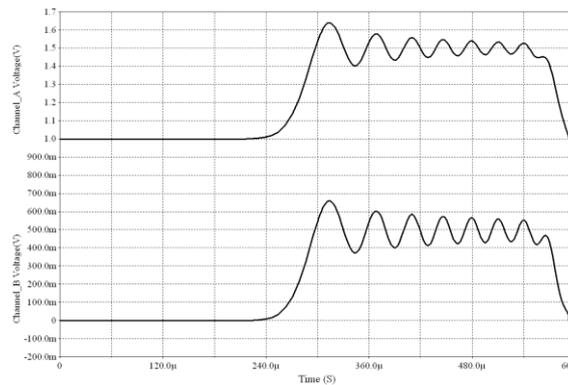


Рисунок 9 П - импульс длительностью 300 мкс на выходе линии без потерь (канал А) и с потерями при экспофункциональном воздействии (канал В) длиной 40 км с введенным $\Delta t = 100$ мкс и усилением $e^{\lambda\Delta t}$ ($n = 40$)

введенное усиление полностью восстановило амплитуду экспо - П-образного импульса, а результаты проведенных экспериментов полностью отражают изложенную теорию в пункте 1 данной статьи.

Таким образом, в статье дано понятие экспо - П-образного сигнала и периодического экспо - П-образного сигнала, рассмотрена проблема учета задержки сигнала, проходящего через длинную однородную линию при эксповоздействии, экспериментально подтверждены теоретические умозаключения относительно расчета времени задержки сигнала при его прохождении через длинную однородную линию, доказана способность экспо - П-образного сигнала компенсировать потери, существующие в длинной однородной линии.

Литература

1. Іваницький А.М. Явище виділення активної потужності реактивними елементами електричного кола / Диплом на відкриття НВ №3, зареєстровано 12.01.99; пріоритет від 30.11.94 // Винахідник України. – 2' 1999/ 1' 2000. – С.121-126.
2. Іваницький А.М. Устройство измерения амплитудно-частотных характеристик систем, содержащих реактивные элементы при периодических экспогармонических воздействиях / А.М. Іваницький, Д.Г. Паску // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 2005. – № 2. – С. 66 – 70.
3. Іваницький А.М. Улучшение амплитудно-частотных характеристик LC-фильтров высокого порядка / А.М. Іваницький, Д.Г. Паску, Е.Н. Катречко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. - №1. – С. 80 – 86.
4. Іваницький А.М. Исследование прохождения периодических экспофункциональных сигналов через LC-фильтры / А.М. Іваницький, Д.Г. Паску // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. - №2. – С 12 – 21.
5. Іваницький А.М. Исследование прохождения экспофункциональных сигналов через линейные электрические цепи с распределенными параметрами / А.М. Іваницький, Д.Г. Паску // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 2008. – № 2. – С.
6. Іваницький А.М. Телеграфные уравнения однородных линий при экспофункциональных сигналах/ А.М. Іваницький, М.В. Рожновский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 2009. – № 1. – С.
7. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Атабеков Г.И. – М.: Энергия, 1969. – 424с.
8. Іваницький А.М. Применение экспофункциональных воздействий в электросвязи и электроэнергетике / А.М. Іваницький // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 1999. – № 2 – С. 53-57.
9. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны / Вайнштейн Л.А. – М.: Радио и связь, 1988. – 440с.
10. Семенов Н.А. Техническая электродинамика / Семенов Н.А. – М.: Связь, 1973. – 480 с.

11. Иваницкий А.М. Моделирование однородных линий / А.М. Иваницкий, Д.Г. Паску, М.В. Рожновский // Элементы практического применения экспосинусоидальных сигналов: Отчет по НИР (Шифр «Застосування») / Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова; ГР №0107U001778. – Одесса, 2007. – С. 20 – 60.
12. Иваницкий А.М. Зависимость третьего и четвертого уравнений Максвелла от первых двух при произвольном возбуждении электромагнитного поля / А.М. Иваницкий // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – №2. – С. 2 – 7.
13. Иваницкий А.М. Реактивные элементы при экспофункциональных воздействиях / А.М. Иваницкий // Информатика и связь: Сб. научн. тр. УГАС им. А.С. Попова. – Одесса. – 1996. – №1. – С. 236 – 240.
14. Паску Д.Г. Модернизация макета устройства измерения АЧХ / Д.Г. Паску, М.В. Рожновский // Элементы практического применения экспосинусоидальных сигналов: Отчет по НИР (Шифр «Застосування») / Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова; ГР №0107U001778. – Одесса, 2007. – С. 6 – 18.