**Phase trajectories of carbon in the process of high-energy modes electroexplosion graphite conductor / V.Yu. Baklar, N.I. Kuskova, D.I. Chelpanov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). − С. 5-9. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

***Баклар Віктор Юрійович*** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел..: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

***Бакларь Виктор Юрьевич*** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

***Baklar Viktor Yurjevich*** – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

***Кускова Наталія Іванівна*** – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

***Кускова Наталья Ивановна*** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

***Kuskova Natalya Ivanovna*** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

***Челпанов Дмитро Ілліч*** – аспірант, Інститут імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

***Челпанов Дмитрий Ильич*** – аспирант, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

***Chelpanov Dmitry Illych*** – Postgraduate Student, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 621.3.01:537.311

***М.И. БАРАНОВ***

# НОВЫЙ ПРИНЦИП СОГЛАСОВАНИЯ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА С НАГРУЗКОЙ

Приведені наближені результати теоретичного дослідження узгодженого режиму роботи однорідної двопровідної довгої лінії передачі імпульсів електричної напруги (струму) і підключеного до неї зосередженого електричного навантаження, що розміщені в ізоляційному повітряному середовищі, яке оточує їх. Сформульована нова уточнена умова узгодження даної довгої лінії з вказаним електричним навантаженням, котре враховує вплив хвилевого опору повітряного простору, що оточує їх, на протікання хвилевих електромагнітних процесів в даній повітряній довгій лінії з підключеною до одного з її кінців електричним навантаженням, яке виконано у вигляді зосередженого активного опору. Виконано порівняння отриманих оригінальних результатів за уточненим погодженням довгої лінії з омічним електричним навантаженням з відомими в цій галузі закордонними і вітчизняними даними.

**Ключові слова:** однорідна двопровідна довга лінія передачі імпульсів електричної напруги (струму); зосереджене електричне навантаження; хвилевий опір повітряного простору, що оточує довгу лінію і електричне навантаження; узгоджений режим роботи повітряної довгої лінії з навантаженням; уточнена умова узгодження довгої лінії з електричним навантаженням.

Приведены приближенные результаты теоретического исследования согласованного режима работы однородной двухпроводной длинной линии передачи импульсов электрического напряжения (тока) и подключенной к ней сосредоточенной электрической нагрузки, размещенных в окружающей их изоляционной воздушной среде. Сформулировано новое уточненное условие согласования данной длинной линии с указанной электрической нагрузкой, учитывающее влияние волнового сопротивления окружающего их воздушного пространства на протекание волновых электромагнитных процессов в рассматриваемой воздушной длинной линии с подключенной к одному из ее концов электрической нагрузкой, выполненной в виде сосредоточенного активного сопротивления. Выполнено сравнение полученных оригинальных результатов по уточненному согласованию длинной линии с омической электрической нагрузкой с известными в этой области зарубежными и отечественными данными.

**Ключевые слова:** однородная двухпроводная длинная линия передачи импульсов электрического напряжения (тока); сосредоточенная электрическая нагрузка; волновое сопротивление окружающего длинную линию и электрическую нагрузку воздушного пространства; согласованный режим работы воздушной длинной линии с нагрузкой; уточненное условие согласования длинной линии с электрической нагрузкой.

© М.И. Баранов, 2016

The close results of theoretical research of the concerted mode of operations of homogeneous with dvumy send-offs long to impulses of electric voltage (current) and point electric load connected to it, placed in circumferential their isolating air environment are resulted. The new specified condition of concordance of this long line is formulated with the indicated electric loading, taking into account influence of impendance circumferential their air space on flowing of wave electromagnetic processes in the examined long air-track with connected to one of its ends electric loading, executed as the concentrated active resistance. Comparison of the got original results is executed on the specified concordance of long line with the electric loading with active resistance with known in this area foreign and domestic information.

**Key words:** homogeneous with dvumy send-offs long tl impulses of electric voltage (current); point electric load; impendance circumferential a long line and electric loading of air space; concerted mode of operations of long air-track with loading; specified condition of concordance of long line with the electric loading.

**Введение**. Длинные линии передачи (ДЛП) переменных (импульсных) электрических сигналов к подсоединенному в их конце оконечному устройству − электрической нагрузке (ЭН) нашли широкое применение в радиотехнике, технике сверхвысоких частот, электроэнергетике, электротехнике, радиоэлектронике и вычислительной технике, технике проводной электросвязи, измерительной технике, технике высоких напряжений, сильноточной электронике, технике сильных импульсных электромагнитных полей и технике больших импульсных токов [1-10]. Новой областью практического использования ДЛП в наиболее передовых по уровню развития науки и техники странах мира, обладающих ядерным (термоядерным) оружием, во второй половине 20-го века стали специальные высоковольтные испытательные электроустановки, моделирующие в воздушном пространстве мощный электромагнитный импульс (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ), апериодические импульсы напряженностей электрического и магнитного полей которого могут изменяться в нано- и микросекундном временных диапазонах [11-13]. При воспроизведении ЭМИ ЯВ, непосредственно воздействующего на испытываемую гражданскую и военную технику, в соответствующих электроустановках нашли применение многопроводные воздушные ДЛП с ЭН различного исполнения, габаритные геометрические размеры которых могли составлять десятки и сотни метров [11-14]. Для получения в ДЛП с ЭН требуемых соответствующими отечественными и зарубежными нормативными документами (стандартами и руководящими техническими материалами) амплитудно-временных параметров (АВП) необходим, как правило, их согласованный режим работы, обеспечивающий: во-первых, отсутствие отражений формируемых электрических сигналов (импульсов напряжения, тока и ЭМИ) от ЭН и, во-вторых, эффективные условия передачи по ДЛП электромагнитной энергии от ее мощного источника к ЭН. Согласно [1,2,7,11,15] для достижения такого режима работы ДЛП с ЭН должно выполняться классическое условие:

$$Z_B = Z_H, \qquad (1)$$

где $Z_B$, $Z_H$ − соответственно волновое сопротивление ДЛП и полное сопротивление используемой в электрической цепи передачи электрического сигнала ЭН.

Из (1) при чисто активном сопротивлении ЭН, равном $R_H$, следует, что для согласования ДЛП с указанной нагрузкой должно выполняться соотношение вида $Z_B = R_H$. При практической реализации условия (1) специалисты обычно не учитывают влияния на характер протекания в ДЛП с ЭН волновых электромагнитных процессов волнового сопротивления $Z_0$ изоляционного пространства, окружающего токопроводы ДЛП и ЭН. В этой связи выражение для коэффициента отражения $K_{UI}$ импульсов напряжения (тока) в месте соединения ДЛП (при ее волновом сопротивлении $Z_B$) с ЭН (при ее активном сопротивлении $R_H$) имеет следующий широко известный в электротехнике аналитический вид [1,2,15]:

$$K_{UI} = (R_H - Z_B)/(R_H + Z_B)\,. \qquad (2)$$

Тогда из (2) для режима холостого хода (ХХ) в ДЛП (в случае, когда величина активного сопротивления $R_H$ приобретает бесконечно большое значение) следует известное положение о том, что при режиме ХХ коэффициент отражения $K_{UI}$ равен единице со знаком «плюс». Вот поэтому в этом случае амплитуда импульса напряжения в конце ДЛП увеличивается ровно в два раза [1, 2, 15]. Для режима короткого замыкания (КЗ) в ДЛП (в случае, когда величина активного сопротивления $R_H$ приобретает бесконечно малое значение) из (2) находим, что коэффициент отражения $K_{UI}$ равен единице со знаком «минус». В связи с этим в режиме КЗ амплитуда импульса напряжения в конце ДЛП становится равной нулю [1,2,15]. При согласованном режиме работы ДЛП с ЭН (в случае, когда выполняется равенство $R_H = Z_B$) из (2) получаем, что коэффициент отражения $K_{UI}$ будет равен нулю [1, 2, 15]. Тогда нам становится более понятным тот электрофизический факт, что в таком согласованном режиме функционирования однородной (неоднородной) ДЛП отраженные от ЭН импульсы напряжения (тока) отсутствуют. А раз так, то и никаких искажений передаваемого по ДЛП полезного электрического сигнала (импульсов напряжения, тока и напряженностей поперечного электромагнитного поля) с позиций классического подхода к согласованию ДЛП наблюдаться в этом режиме работы ДЛП с ЭН не будет.

А как влияет на описанные выше в определенной мере идеализированные с электрофизических позиций режимы работы ДЛП с включенной в одном из ее концов сосредоточенной ЭН волновое сопротивление $Z_0$ окружающего их (указанную линию и нагрузку) изоляционного пространства? Ответа на этот вопрос в приведенных нами выше источниках [1-15] не содержится.

Целью статьи является приближенный учет влияния волнового сопротивления $Z_0$ изоляционного пространства, окружающего ДЛП с распределенными электрическими параметрами и включенную в одном из ее концов ЭН, на согласование однородной ДЛП с ЭН, имеющей сосредоточенные электрические параметры.

**1. Постановка задачи по исследованию согласованного режима работы ДЛП с ЭН.** В рамках данного исследования рассмотрим однородную двухпроводную ДЛП с ЭН, реализованной в виде сосредоточенного активного сопротивления $R_H$. Примем, что в исследуемой ДЛП продольное активное сопротивление значительно меньше ее продольного индуктивного сопротивления, а поперечная активная проводимость изоляции для токов утечки существенно меньше ее поперечного емкостного сопротивления. С учетом указанных выше допущений считаем, что рассматриваемая однородная ДЛП без потерь энергии на рассеяние характеризуется волновым (характеристическим) сопротивлением, равным $Z_B$ (рис. 1). В принятом нами случае величина $Z_B$ может быть приближенно рассчитана по следующей формуле [1,15]:

$$Z_B = \sqrt{L_0 / C_0}\ , \qquad (3)$$

где $L_0$, $C_0$ − соответственно погонные значения индуктивности и емкости ДЛП, являющиеся распределенными электрическими параметрами по длине $l_0$ линии.

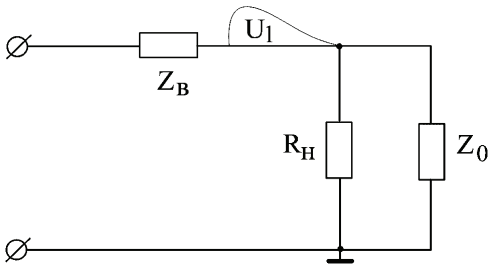


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема однородной двухпроводной ДЛП с активным сопротивлением $R_H$ сосредоточенной нагрузки, включенной в одном из ее концов ($Z_B$ − волновое сопротивление ДЛП; $Z_0$ − волновое сопротивление изоляционного воздушного пространства вокруг ДЛП и ЭН; $U_l$ − амплитуда импульса напряжения, приходящего к ЭН)

Считаем, что одна из частей воздушной ДЛП (в нашем случае согласно рис. 1 ее левая часть) содержит источник импульсного напряжения (тока), а ее другая часть (в соответствии с рис. 1 ее правая часть) − приемник электромагнитной (тепловой) энергии в виде ЭН со сосредоточенными электрическими параметрами. Пусть по токопроводам ДЛП в продольном направлении распространяются волны электрического напряжения (тока), вызывающие появление вокруг них поперечных волн напряженностей переменного (импульсного) электрического и магнитного полей, движущихся вдоль ДЛП от ее источника напряжения (тока) к ЭН. Для определенности далее остановимся на волне напряжения и соответственно на волне напряженности поперечного электрического поля с вертикальной поляризацией, имеющей в воздушной среде длину, равную $\lambda_E$. По условиям рассматриваемой нами электротехнической задачи принимаем то допущение, что для исследуемой ДЛП выполняется следующее электродинамическое условие: $\lambda_E < l_0$. Данное условие будет свидетельствовать нам о том, что в исследуемой однородной двухпроводной линии с распределенными электрическими параметрами $L_0$ и $C_0$, в одном из концов которой включена ЭН со сосредоточенным активным сопротивлением $R_H$, возможно протекание волновых электромагнитных процессов [1-5]. Требуется выполнить в электрической цепи рассматриваемой однородной ДЛП с указанной ЭН (см. рис. 1) приближенный учет влияния волнового сопротивления $Z_0$ воздушной среды на протекающие в ней (этой цепи) волновые электромагнитные процессы.

**2. Основные расчетные соотношения для уточненного согласования ДЛП с ЭН.** Используя (1) и данные рис. 1, нам можно сформулировать следующее *уточненное условие согласованного режима работы* исследуемой воздушной ДЛП со сосредоточенной ЭН, содержащей в этом случае активное сопротивление $R_H$:

$$Z_B = R_H Z_0 /(R_H + Z_0)\,. \qquad (4)$$

Тогда из (4) для величины активного сопротивления $R_H$, подключаемого в конце исследуемой воздушной ДЛП при ее согласованном режиме работы с принятой ЭН, получаем следующее расчетное соотношение:

$$R_H = Z_0 Z_B /(Z_0 - Z_B)\,. \qquad (5)$$

Из (5) при выполнении неравенства вида $Z_B << Z_0$ вытекает ранее приведенное нами классическое условие (1) для согласования рассматриваемой воздушной ДЛП со сосредоточенной ЭН, имеющее следующий канонический вид: $R_H = Z_B$. Это может косвенно указывать на достоверность предлагаемого условия (4) для уточненного согласования исследуемой воздушной ДЛП с ЭН.

Что касается коэффициента отражения $K_{UI}$ формируемых импульсов напряжения (тока) в электрической цепи рассматриваемой воздушной ДЛП от сосредоточенной и чисто активной ЭН при предлагаемом подходе ее (линии) согласованного режима работы, то для него с учетом (2) и (5) в приближенном виде можно записать следующее расчетное аналитическое соотношение:

$$K_{UI} = [R_H(Z_0 - Z_B) - Z_0 Z_B][R_H(Z_0 + Z_B) + Z_0 Z_B]^{-1}\,. \qquad (6)$$

Из (6) следует, что в частном случае, когда специалисты в соответствующей области импульсной техники значение активного сопротивления $R_H$ нагрузки выбирают из общепринятого классического условия $R_H = Z_B$, выражение для расчетного коэффициента отражения $K_{UI}$ волн напряжения (тока) в месте состыковки исследуемой ДЛП с принятой ЭН принимает следующий вид:

$$K_{UI} = -Z_B /(2Z_0 + Z_B)\,. \qquad (7)$$

Из (7) видно, что при подобном расчетном выборе значения активного сопротивления $R_H = Z_B$ сосредоточенной ЭН даже учет влияния волнового сопротивления $Z_0 = 120\pi$ Ом $\approx 377$ Ом воздушного пространства на протекание волновых электромагнитных процессов в электрической цепи рассматриваемой ДЛП с достаточно распространенной на практике омической нагрузкой не обеспечивает хорошего согласования исследуемой линии. Беглый анализ приведенного соотношения (7) показывает, что в этом случае (например, при $Z_B = 75$ Ом) переколебания на

«столе» формируемого импульса напряжения (тока) за счет отражения падающих электромагнитных волн от подобной ЭН могут достигать 9 %.

Из (6) следует, что при расчетном выборе значения активного сопротивления $R_H$ подключенной в конце однородной двухпроводной воздушной ДЛП нагрузки в соответствии с (5) обеспечивается требуемое согласование ДЛП с ее ЭН. В данном случае согласно (6) коэффициент отражения $K_{UI}$ волн напряжения (тока) от места подсоединения ЭН к ДЛП будет точно равным нулю.

Для режима ХХ исследуемой воздушной ДЛП, когда $R_H >> Z_0$, а нагрузочное сопротивление линии для электромагнитных волн в краевой зоне размещения ЭН стремится к значению волнового сопротивления $Z_0$ воздушного пространства, из (6) для коэффициента отражения $K_{UI}$ волн напряжения (тока) от разомкнутого конца ДЛП следует следующее расчетное соотношение:

$$K_{UI} = (Z_0 - Z_B)/(Z_0 + Z_B)\,. \qquad (8)$$

При поверхностном анализе формулы (8) на этом этапе теоретического исследования ограничимся электротехническим случаем, когда $Z_0 >> Z_B$. При этом из (8) следует, что рассматриваемый коэффициент отражения принимает численное значение, равное примерно $K_{UI} \approx 1$.

Для режима КЗ исследуемой воздушной ДЛП, когда значение активного сопротивления $R_H$ стремится к нулю, из (6) вытекает, что указанный коэффициент отражения волн напряжения (тока) от замкнутого накоротко конца такой воздушной ДЛП в этом предельном (экстремальном) случае принимает численное значение, равное $K_{UI} = -1$. Приведенные нами выше электротехнические данные по предельным режимам работы рассматриваемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП и соответствующим переходам в (6) исследуемых электрических параметров $Z_B$, $R_H$ и $Z_0$ указывают на достоверность этого полученного приближенного расчетного соотношения для коэффициента отражения $K_{UI}$ импульсов напряжения (тока) в зоне сосредоточенной ЭН, учитывающего влияние на волновые электромагнитные процессы в линии волнового сопротивления $Z_0$ изоляционной воздушной среды, окружающей металлические токопроводы ДЛП и элементы омической ЭН.

**3. Некоторые оценочные результаты при использовании предложенного электродинамического подхода к согласованию воздушной ДЛП с активной ЭН.** Используя представленные выше во вводной части и разделе 2 этой работы приближенные расчетные соотношения, выполним для ряда частных случаев практической реализации электрических схем формирования коротких волн напряжения (тока) количественную оценку результатов согласования рассматриваемой воздушной ДЛП со сосредоточенной омической ЭН по известному классическому и предлагаемому подходам.

**3.1. Расчетные результаты выбора омического сопротивления $R_H$ нагрузки для ДЛП с волновым сопротивлением $Z_B$.** Для этого вначале остановимся на простейшей однородной двухпроводной воздушной ДЛП, характеризующейся волновым сопротивлением, равным $Z_B = 75$ Ом, подключенной на одном из своих концов к ЭН с чисто омическим сопротивлением $R_H$. Пусть по тонким медным токопроводам данной ДЛП длиной $l_0 = 50$ м в их продольном направлении распространяются волны напряжения (тока) апериодической временной формы и соответственно вблизи них в воздухе (газовом диэлектрике) поперечные электромагнитные ТЕМ-волны, имеющие в окружающей указанные медные провода воздушной среде длины, примерно равные $\lambda_E = c{\cdot}\tau_p = 3{\cdot}10^8$ м/с х $50{\cdot}10^{-9}$ $c = 15$ м, где $c$, $\tau_p$ − соответственно скорость распространения электромагнитного поля в воздухе и длительность формируемых импульсов напряжения (тока) или электромагнитных ТЕМ-волн на их полуспаде. Так как в нашем случае $\lambda_E < l_0$, то в рассматриваемой воздушной ДЛП будут протекать волновые электромагнитные процессы, требующие для получения в рабочем воздушном объеме на участке ДЛП длиной $l_0$ неискаженного из-за отражения от используемой омической нагрузки ЭМИ заданных АВП соответствующего согласования между величинами $Z_B$ и $R_H$. Согласно классическому принципу согласования указанной ДЛП с омической ЭН и в соответствии с (1) активное сопротивление используемой в этом случае нагрузки должно численно составлять величину, равную $R_H = 75$ Ом. Напомним, что такой количественный выбор величины $R_H$ не учитывает влияния воздушной среды, окружающей ДЛП и ЭН и характеризующейся волновым сопротивлением $Z_0 = 120\pi$ Ом $\approx 377$ Ом.

По предлагаемому же принципу согласования рассматриваемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП ($Z_B = 75$ Ом) с омической ЭН и в соответствии с (5) величина активного сопротивления используемой при этом сосредоточенной нагрузки должна численно составлять около $R_H = 93{,}7$ Ом. Как видим, для рассматриваемого нами электротехнического случая различие между численными значениями величины активного сопротивления $R_H$ согласующей нагрузки, найденными по известному классическому согласно [1, 2, 7, 11, 15] и предлагаемому нами подходам составляет примерно 25 %. Следует заметить то, что при расчетном выборе величины активного сопротивления ЭН по предлагаемому уточненному принципу согласования ДЛП с ЭН имеет место следующее неравенство: $R_H > Z_B$. Данное неравенство указывает на то, что при таком выборе величины $R_H$ на «столе» формируемого в ДЛП апериодического ЭМИ будут отсутствовать наложенные колебания [1,2].

**3.2. Расчетные оценки коэффициента отражения $K_{UI}$ волн в ДЛП с ЭН.** Далее свое внимание более пристально обратим на расчетные соотношения (6) и (8), определяющие для нового принципа согласования исследуемой однородной ДЛП с омической ЭН значения коэффициента отражения $K_{UI}$ волн напряжения (тока) и соответственно поперечных электромагнитных ТЕМ-волн от конца линии, подключаемой к нагрузке. Из (6) для принятых нами в подразделе 3.1

исходных данных ($Z_B$ = 75 Ом; $Z_0$ = 120$\pi$ Ом ≈ 377 Ом) при $R_H$ = 75 Ом находим, что в данном электротехническом случае, численный выбор основных электрических параметров для которого базировался на известном классическом подходе согласно [1, 2, 7, 11, 15] по согласованию однородной двухпроводной воздушной ДЛП с ее омической ЭН, даже при учете влияния на волновые электромагнитные процессы волнового сопротивления $Z_0$ воздушного пространства величина коэффициента отражения численно составляет примерно $K_{UI} \approx -0{,}09$. Такое количественное значение величины $K_{UI}$ для рассматриваемого случая однозначно указывает на наличие переколебаний на «столе» импульсов напряжения (тока) и соответственно формируемых в ДЛП электромагнитных ТЕМ-волн с амплитудой не менее 9 % от амплитуды основного подходящего от линии к ЭН полезного электрического сигнала. Одновременно из (6) при указанных исходных данных ($Z_B$ = 75 Ом; $Z_0$ = 120$\pi$ Ом ≈ 377 Ом) и при $R_H$ = 93,7 Ом, определенном по (5), следует, что в этом электротехническом случае, базирующемся на предлагаемом оригинальном подходе по согласованию исследуемой воздушной ДЛП с омической ЭН, величина коэффициента отражения $K_{UI}$ практически приближается к нулю.

Из расчетной формулы (8) в режиме ХХ принятой для численных оценок вторичных электрических параметров однородной двухпроводной воздушной ДЛП ($Z_B$ = 75 Ом; $Z_0$ = 120$\pi$ Ом ≈ 377 Ом) получаем, что в этом предельном режиме функционирования ДЛП рассматриваемый коэффициент отражения от разомкнутого конца линии импульсов напряжения (тока) и соответственно напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн будет численно составлять около $K_{UI} \approx 0{,}67$. В результате такого количественного значения величины коэффициента отражения $K_{UI}$ амплитуда возникающего в этом режиме работы указанной линии перенапряжения в конце ДЛП будет достигать численного значения, не превышающего $1{,}67 \cdot U_l$, где $U_l$ − амплитуда подходящей от источника напряжения (тока) к разомкнутому концу воздушной ДЛП падающей волны напряжения (тока) и соответственно амплитуды напряженностей набегающей на разомкнутый конец линии поперечной электромагнитной ТЕМ-волны. Здесь следует указать то одно важное и известное в практике эксплуатации ДЛП с ЭН, имеющими сосредоточенные электрические параметры, электрофизическое обстоятельство, что именно такие уровни перенапряжений (а не уровни, равные $2U_l$ по соотношению (2) согласно классическим представлениям в области теории волновых электромагнитных процессов в однородной ДЛП с омической ЭН) реально и наблюдаются для режима ХХ в однородных двухпроводных ДЛП в практических электротехнических случаях (в частности, при $Z_B$=75 Ом), упомянутых в указанных выше литературных источниках [1-10].

**Выводы.** 1. Предложен новый принцип согласования однородной двухпроводной воздушной ДЛП с ЭН, имеющей сосредоточенные электрические параметры. Предложенный подход к реализации согласованного режима работы указанной ДЛП, на одном из концов которой подключена согласующая нагрузка, учитывает влияние окружающего линию и нагрузку волнового сопротивления $Z_0$ воздушного пространства на протекающие в них волновые электромагнитные процессы.

2. Получены основные приближенные аналитические соотношения (4)-(8), позволяющие при заданных первичных и вторичных электрических параметрах исследуемой однородной воздушной ДЛП осуществлять необходимый выбор сосредоточенных электрических параметров подключенной к ней чисто омической ЭН, обеспечивающих согласованный режим работы данной линии передачи импульсов напряжения, тока и напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн.

3. Расчетным путем показано, что известный классический принцип согласования рассматриваемой воздушной ДЛП, характеризующейся волновым сопротивлением $Z_B$, с чисто омической нагрузкой, имеющей активное сопротивление $R_H$, когда используется известное в электротехнике условие $R_H = Z_B$, из-за влияния на протекающие в ДЛП и ЭН волновые электромагнитные процессы волнового сопротивления $Z_0$=120$\pi$ Ом воздушной среды не обеспечивает хорошего согласования ДЛП с омической ЭН. В этом исследуемом случае численное значение активного сопротивления $R_H$ чисто омической сосредоточенной нагрузки оказывается заниженным на величину до 25 %, а рассогласование воздушной ДЛП с подобной ЭН приводит к наличию переколебаний на «столе» формируемых в рабочем воздушном объеме рассматриваемой однородной линии импульсов напряжения (тока) и соответственно напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн.

4. Впервые на основе приближенного электродинамического расчета установлено, что в исследуемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП ($Z_B$ = 75 Ом; $Z_0$ = 120$\pi$ Ом ≈ 377 Ом) при ее работе в режиме ХХ амплитуда перенапряжения на ее разомкнутом конце не может превышать численного значения $1{,}67 \cdot U_l$, а не уровня $2U_l$ (двойной амплитуды $U_l$ приходящего от используемого в ДЛП источника электромагнитной энергии к концу используемой линии импульса напряжения) согласно классической теории волновых электромагнитных процессов в электрических цепях с распределенными электрическими параметрами.

5. Приведенные расчетные данные для согласования однородной двухпроводной воздушной ДЛП с чисто омической ЭН могут быть при незначительной доработке представленного расчетно-аналитического материала соответствующим образом распространены на иные ДЛП (например, на кабельные линии передачи импульсных электрических сигналов с полиэтиленовой изоляцией, широко применяемые в радиотехнике, электротехнике и технике высоких напряжений) и ЭН.

**Список литературы**

**1.** *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / *С.И. Баскаков*.− М.: Высшая школа, 1980. − 152 с.

**2.** *Григорьев А.Д.* Электродинамика и техника СВЧ / *А.Д. Григорьев.*− М.: Высшая школа, 1990. − 335 с.

**3.** *Рюденберг Р.* Переходные процессы в электроэнергетических системах / *Р.Рюденберг*. − М.: Изд-во иностр. лит., 1955. − 714 с.

**4.** *Нейман Л.Р.* Теоретические основы электротехники. Том 1 / *Л.Р. Нейман, Л.Р. Демирчян*. − Л.: Энергоиздат, 1981. − 536 с.

**5.** Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники / Под ред. *Б.Х. Кривицкого, В.Н. Дулина*. Том 1.− М.: Энергия, 1977. −504 с.

**6.** Техника высоких напряжений / Под ред. *М.В. Костенко*. − М.: Высшая школа, 1973. −528 с.

**7.** *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов / *Г.А. Месяц*. − М.: Сов. радио, 1974. − 256 с.

**8.** *Кремнев В.В.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике / *В.В. Кремнев, Г.А. Кремнев*. − Новосибирск: Наука, 1987. − 226 с.

**9.** Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. *В.С. Комелькова*. − М.: Атомиздат, 1970. − 472 с.

**10.** *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля / *Г. Кнопфель*. − М.: Мир, 1972. − 391 с.

**11.** *Рикетс Л.У.* Электромагнитный импульс и методы защиты / *Л.У. Рикетс, Дж.Э. Бриджес, Дж. Майлетта.* Пер. с англ. под ред. *Н.А. Ухина*. − М.: Атомиздат, 1979. − 328 с.

**12.** *Мырова Л.О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / *Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко*. − М.: Радио и связь, 1988. − 296 с.

**13.** *Баранов М.И.* Приближенный расчет нестационарных процессов при разряде коаксиальной формирующей линии на многопроводную воздушную линию / *М.И. Баранов, С.А. Кузнецов* // Электричество.− 1992.− № 12. − С.14−22.

**14.** *Баранов М.И.* Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты / *М.И. Баранов.* Рукопись дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук.− Х.: НТУ «ХПИ», 1999. − 380 с.

**15.** *Каганов З.Г.* Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / *З.Г. Каганов*. − М.: Энергоатомиздат, 1990. − 248 с.

**Bibliography (transliterated)**

**1.** Baskakov S.I. Radiotehnicheskie cepi s raspredelennymi parametrami. Moscow: Vysshaja shkola, 1980, 152 p.

**2.** Grigor'ev A.D. Elektrodinamika i tehnika SVCh. Moscow: Vysshaja shkola, 1990, 335 p.

**3.** Rjudenberg R. Perehodnye processy v elektroenergeticheskih sistemah. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1955, 714 p.

**4.** Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki, Tom 1. Leningrad: Energoizdat, 1981, 536 p.

**5.** Spravochnik po teoreticheskim osnovam radioelektroniki / Pod red. B.Kh. Krivitskogo, V.N. Dulina. Tom 1. Moscow: Energija, 1977,504 p.

**6.** Tehnika vysokih naprjazhenij / Pod red. M.V. Kostenko. Moscow: Vysshaja shkola, 1973, 528 p.

**7.** Mesjats G.A. Generirovanie moshhnyh nanosekundnyh impul'sov. Moscow: Sov. radio, 1974, 256 p.

**8.** Kremnev V.V., Mesjats G.A. Metody umnozhenija i transformacii impul'sov v sil'notochnoj elektronike. Novosibirsk: Nauka, 1987, 226 p.

**9.** Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej / Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970, 472 p.

**10.** Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow: Mir, 1972, 391 p.

**11.** Rikets L.W., Bridzhes J.E., Majletta J. Elektromagnitnyj impul's i metody zashchity / Per. s engl. pod red. N.A. Uhina. Moscow: Atomizdat, 1979, 328 p.

**12.** Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim i elektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988, 296 p.

**13.** Baranov M.I., Kuznetsov S.A. Priblizhennyj raschet nestacionarnyh processov pri razrjade koaksial'noj formirujushhej linii na mnogoprovodnuju vozdushnuju liniju. Elektrichestvo, 1992, No 12, pp.14−22.

**14.** Baranov M.I. Perehodnye processy pri vozdejstvii bol'shih impul'snyh tokov i sil'nyh impul'snyh magnitnyh polej na provodjashchie ob'ekty / Rukopis' diss. na soisk. uch. stepeni doktora tehn. nauk. Kharkiv: NTU «KhPI», 1999, 380 p.

**15.** Kaganov Z.G. Elektricheskie cepi s raspredelennymi parametrami i cepnye shemy. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 248 p.

*Поступила (received) 14.09.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Новий принцип узгодження довгої лінії передачі імпульіов електричної напруги і струму з навантаженням / М.І. Баранов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. − № 36 (1208). − С. 9-14. − Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

**Новый принцип согласования длинной линии передачи импульсов электрического напряжения и тока с нагрузкой / М.И. Баранов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. − № 36 (1208). − С. 9-14. − Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

**New principle of concordance of long tl impulses of electric voltage and current with loading / M.I. Baranov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). − С. 9-14. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0740.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

***Баранов Михайло Іванович*** − доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Науково-дослідницького и проектно-конструкторського інституту «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

***Баранов Михаил Иванович*** − доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «ХПИ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

***Baranov Michail Ivanovich*** − Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of National Technical University «KhPI», tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.