

DETERMINATION OF SHIPBOARD CABLES PARAMETERS FOR CALCULATING THE PULSE NOISE PROPAGATION AND CALCULATION ACCURACY ESTIMATION

M. A. Akhrestin¹, A. A. Vorshevsky², P. A. Vorshevsky²

¹ — St. Petersburg Maritime Bureau of Mechanical Engineering “Malachite”,
St. Petersburg, Russian Federation

² — St. Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

Nanosecond pulse noise in shipboard electrical system is generated by switching operations. The voltage pulses can lead to malfunction of electrical and electronic equipment with digital circuits. Pulse noise propagates in cables from the generation point to the equipment. It is important to estimate the pulse noise parameters on the sensitive equipment for obtaining electromagnetic compatibility. The purpose of this work is determination of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation and calculation accuracy estimation. Distributed cable parameters are required for nanosecond propagation model. The parameters can be calculated on the base of proposed approach taking into account the neighbouring cables (conductors) influence. The neighbouring cables (conductors) leads to increasing the distributed capacitance and decreasing the wave resistance. Wave resistances of propagation channels can be measured with pulse reflectometer on the base of measurement of voltage step reflection from the examined circuit. The travelling wave technique is used for nanosecond pulse propagation calculation. It can use ideal line and real cable model. Experimental measurements of pulse propagation can be performed with bursts (IEC61000-4-4) generator IPP-4000 and surge (IEC61000-4-5) generator IPP-1000. Pulses are generated in different circuits of cables. Voltage curves of initial pulse at the ends of the cable circuit are analyzed. The results of calculation and measurement lead to conclusion that it is enough to take into consideration only nearest cables (conductors) for wave resistance determination. Calculation inaccuracy is less than 10 %. Microsecond pulses do not fade in 100 m cables. At the end of the cable, doubling of the pulse amplitude is possible. Propagation of nanosecond pulses gives decreasing the amplitude, increasing the rise time and duration. This effect is less for cable with large cross sections of conductors. The results of wave resistances and pulse propagation calculation are useful for estimation of pulse noise influence on shipboard equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, pulse noise, propagation, shipboard cable, wave resistance, distributed parameter.

For citation:

Akhrestin, Mikhail A., Alexander A. Vorzhevsky, and Petr A. Vorzhevsky. “Determination of shipboard cables parameters for calculating the pulse noise propagation and calculation accuracy estimation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-582-591.

УДК 621.316.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ КАБЕЛЕЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА

М. А. Ахрестин¹, А. А. Воршевский², П. А. Воршевский²

¹ — АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследованы наносекундные импульсные помехи, возникающие в судовой сети при коммутациях, способные вызвать сбои в работе электронного оборудования с цифровыми схемами, и импульсные поме-

хи, которые распространяются от точки возникновения по судовым кабелям. Отмечается, что при проведении работ по обеспечению электромагнитной совместимости важно иметь возможность оценить параметры импульсных помех, воздействующих на оборудование. Целью работы является определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета. Распределенные параметры кабелей предлагается определять расчетным путем с учетом влияния соседних проводников (кабелей), которое в первом приближении проявляется в увеличении распределенной емкости канала распространения и уменьшении волнового сопротивления. Измерять волновые сопротивления каналов распространения удобно методом импульсной рефлектометрии по величине ступеньки напряжения, отраженной от точки соединения штатного кабеля измерителя с исследуемой цепью. Экспериментальное исследование распространения импульсных напряжений заключается в подаче импульсов от имитаторов ИПП-4000 (IEC 61000-4-4), ИИП-1000 (IEC 61000-4-5) в выбранную цепь кабеля, а также осциллографирования напряжений в этой цепи и в соседних цепях, на ближнем и дальнем концах кабеля. В качестве расчетной модели распространения импульсных помех выбран метод распространяющихся волн. Результаты расчета и экспериментального исследования подтверждают, что достаточно учитывать только ближайшие к цепи распространения проводники, при этом погрешность расчета не превышает 10 %. Микросекундные импульсные помехи практически не затухают при распространении по кабелям длиной до 100 м. На конце кабеля возможно удвоение амплитуды помех. Для наносекундных импульсов наблюдается уменьшение амплитуды, увеличение длительности фронта и длительности импульсов. Для кабеля с большими сечениями проводников изменение фронта импульса меньше.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, импульсная помеха, распространение, судовой кабель, волновое сопротивление, распределенный параметр.

Для цитирования:

Ахрестин М. А. Определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения импульсных помех, и оценка погрешности расчета / М. А. Ахрестин, А. А. Воршевский, П. А. Воршевский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 582–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-582-591.

Введение (Introduction)

Импульсные помехи возникают в электрической сети при коммутации потребителей электроэнергии, работе полупроводниковых преобразователей электроэнергии и другого электронного оборудования, при аварийных процессах. Длительность импульсов напряжения может составлять от десятков наносекунд до миллисекунд, а амплитуда (максимальное отклонение от рабочего напряжения) может превышать 1 кВ. Наносекундные импульсные помехи способны вызвать сбои цифровой техники, а микросекундные и миллисекундные импульсы могут разрушить электронные элементы. Импульсные помехи распространяются от точки возникновения по судовым силовым кабелям, вызывая наведенные напряжения в соседних информационных кабелях и воздействуя на электронное оборудование по цепям питания и передачи информации.

В процессе проведения работ по обеспечению электромагнитной совместимости важно иметь возможность оценить параметры импульсных помех, воздействующих на оборудование. Длительность фронта наносекундных помех может быть менее 5 нс, что предопределяет необходимость рассматривать кабели как длинные линии с распределенными параметрами. Общий подход к расчету описан в источнике [1]. Математические модели расчета распространения напряжений по многопроводным линиям в частотной и временной области даны в источнике [2]. Новый подход к расчету распространения электромагнитной волны по кабелям приведен в источнике [3], а расчет во временной области с учетом *скин-эффекта* — в источнике [4]. В статье [5] показана реализация SPICE модели на основе применения функции Грина. Расчеты в линиях с сосредоточенными элементами, новые модели и подходы в расчетах даны в источниках [6]–[8]. Принципиально новое представление о распространении импульсных высоких напряжений и токов по кабелю намечено в работе [9].

Для использования всех указанных ранее подходов к расчету импульсных напряжений в точке размещения электронного оборудования требуется знание волновых параметров судовых кабелей и особенности их прокладки. Волновые сопротивления силовых кабелей и кабелей

управления не регламентированы, так как эти кабели не предназначены для передачи сигналов с наносекундными фронтами и других высокочастотных сигналов. Параметры затухания импульсных напряжений в этих кабелях также неизвестны. Некоторые требуемые параметры кабелей могут быть рассчитаны на основе формул, приведенных в источниках [1], [10]–[12]. Однако погрешности расчета параметров применительно к судовым кабелям не определены.

Целью работы является экспериментальное определение параметров судовых кабелей, необходимых для расчета распространения наносекундных импульсных помех и оценка погрешности существующих формул расчета этих параметров. Также важно проверить применимость методов расчета распространения импульсов напряжения для реальных судовых кабелей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Волновое сопротивление каждой пары жил кабеля и всех каналов распространения может быть определено методами импульсной рефлектометрии. Измеритель неоднородностей линии (рефлектометр) P5-12 содержит импульсный генератор с внутренним сопротивлением $R_r = 50$ Ом и штатный кабель длиной $l = 1,6$ м с волновым сопротивлением $Z = 50$ Ом. Встроенный осциллограф позволяет наблюдать напряжение в точке 0. Генератор создает ступеньку напряжения с фронтом менее 1 нс или импульс регулируемой длительности в начале кабеля прибора. Волна напряжения и тока распространяется по кабелю прибора до точки подключения исследуемого кабеля l , где отражается и возвращается через время t_3 в точку 0. Выходное сопротивление генератора $R_r = Z$ и отражения в точке 0 не возникает. Частично волна переходит на исследуемый кабель и распространяется по нему до точки 2, где отражается от нагрузки (рис. 1).

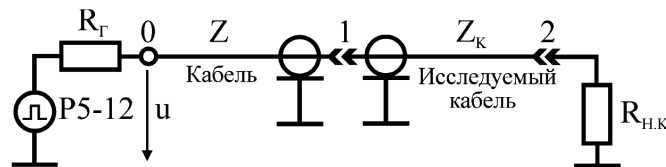


Рис. 1. Схема установки при исследовании волнового сопротивления кабеля

Первый скачок напряжения соответствует зондирующей ступеньке напряжения u (рис. 2), второй скачок a — волне, отраженной от точки соединения кабелей 1 на рис. 1, а скачок b , наблюдаемый через время $t_{3-к}$, соответствует возвращению волны, отраженной от нагрузки исследуемого кабеля и преломившейся в точке 1 с коэффициентом $2Z/(Z + Z_k)$.

Определив по осциллограмме (см. рис. 2) коэффициент отражения от точки 1:

$$\alpha_{отр} = \frac{u_{отр}}{u},$$

можно рассчитать волновое сопротивление исследуемого кабеля Z_k по формуле

$$Z_k = Z \frac{1 + \alpha_{отр}}{1 - \alpha_{отр}}. \quad (1)$$

Скорость распространения волны по исследуемому кабелю определяется по следующей формуле, если подставить в нее длину этого кабеля и время задержки $t_{3-к}$ из рис. 2:

$$v = \frac{2l}{t_{3-к}}. \quad (2)$$

Волновое сопротивление можно также определить по значению сопротивления $R_{н.к}$, при котором отсутствует отражение в точке 2 на рис. 1, т. е. по отсутствию ступеньки b на осциллограмме рис. 2. Измерения волнового сопротивления требуется повторить для каждой пары жил кабеля, для жилы относительно экрана (корпуса для неэкранированного кабеля), для группы жил относительно экрана (корпуса).

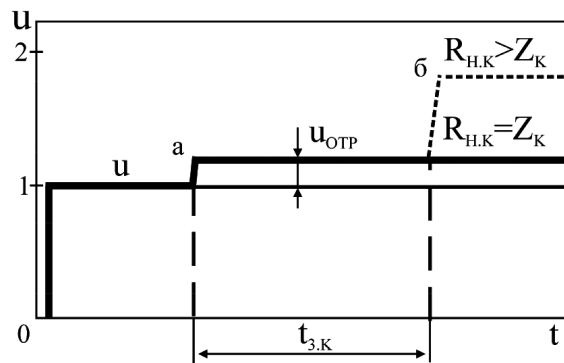


Рис. 2. Осциллограмма напряжения с исследуемым кабелем

Расчет распределенных параметров линии может быть выполнен по формулам, приведенным в источниках [1], [10]:

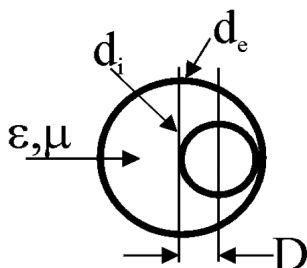
– для двух проводников диаметром d , оси которых разнесены на D , можно рассчитать коэффициент

$$K_w = \frac{1}{\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{D}{d} \right); \quad (3)$$

– для проводника диаметром d над проводящей поверхностью на высоте h

$$K_w = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{2h}{d} \right); \quad (4)$$

– для конфигурации проводника диаметром d_i внутри проводящего экрана диаметром d_e , смещенного на D (рис. 3) относительно центра, расчетная формула следующая:



$$K_w = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arccosh} \left(\frac{d_e^2 + d_i^2 - 4D^2}{2d_e d_i} \right). \quad (5)$$

С помощью рассчитанного коэффициента K_w можно определить погонные параметры линии L , Гн/м, C , Ф/м, и волновое сопротивление Z , Ом:

$$L = K_w \mu_0 \mu_r;$$

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r / K_w; \quad (6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = K_w \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = K_w Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}, \quad (7)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377$ Ом — волновое сопротивление свободного пространства.

Взаимная индуктивность двух линий M_{12} , Гн/м, образованных проводами 1 и 2 на высоте h над проводящей поверхностью с расстоянием D между осями проводов определяется по формуле

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{D^2 + 4h^2}}{D} \right).$$

В многожильном кабеле на распространение импульсов вдоль линии, образованной парой проводов (жил), оказывают влияние остальные проводники кабеля и его экран. В первом приближении влияние заключается в увеличении емкости C между парой проводов и уменьшении волнового сопротивления Z этого канала распространения симметричных помех. Волновое сопротивление

ние каналов распространения для несимметричных помех по пути *провод – земля* или *провод – экран* также уменьшается из-за влияния рядом расположенных проводов. Учесть такое влияние можно упрощенно путем расчета емкостей между проводником и соседними проводами, экраном и увеличением емкости C проводника на эти добавочные емкости. Реальные кабели имеют конструкцию более сложную, чем описанные ранее случаи. Требуется оценка погрешности формул для расчета распределенных параметров кабелей и получение экспериментальных данных об этих параметрах.

Экспериментальное исследование распространения импульсных напряжений в кабельной трассе заключается в подаче импульсов в выбранную цепь кабеля от генератора и осциллографировании напряжений в этой цепи и в соседних цепях на ближнем и дальнем от генератора концах кабелей. При этом в качестве источников импульсных напряжений используются имитаторы импульсных помех наносекундной длительности по ГОСТу 30804.4.4 (ИПП-4000) и микросекундной длительности по ГОСТу 51314.4.5 (ИИП-1000). Это позволяет оценить распространения помех со стандартными параметрами. Имитатор пачек помех ИПП-4000 создает импульсные напряжения амплитудой до 4000 В длительностью 50 нс с фронтом 5 нс. Имитатор импульсных помех ИИП-1000 создает импульсные напряжения амплитудой до 1000 В длительностью 50 мкс с фронтом 1 мкс, позволяя оценить влияние увеличения длительности на изменение напряжения при распространении.

Необходимо проверить распространение как симметричных помех, подаваемых между жилами кабеля, так и несимметричных помех, подаваемых на жилу относительно экрана или земли (корпуса судна). В качестве расчетной модели распространения импульсных помех выбран *метод распространяющихся волн*. Для оценки максимально возможных значений амплитуды импульсных помех расчет выполняется при отсутствии потерь в диэлектрике и жилах кабеля. При этом амплитуда на дальнем конце будет определяться неоднородностями линии, а также соотношением сопротивления нагрузки и волнового сопротивления кабеля. Амплитуда помехи на ближнем конце определяется соотношением волнового сопротивления цепи кабеля и источника импульсных напряжений. Расчет распространения с учетом затухания выполняется на основе полной схемы замещения кабеля как длинной линии с потерями. Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль кабеля, уменьшается по величине от начала к концу линии. Уменьшение или затухание энергии происходит вследствие потерь на нагревание жил и поляризацию молекул изоляции. С ростом частоты потери увеличиваются. Коэффициент распространения

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

где α — коэффициент затухания; β — коэффициент фазы.

Сравнение расчетного затухания с результатами измерений позволяет уточнить параметры реальных кабелей: L , C , R , G .

Результаты (Results)

Расчет параметров для пары уединенных проводников, одиночного проводника над проводящей поверхностью или внутри цилиндрического экрана достаточно точно выполняется по формулам (3)–(7). Расчет влияния соседних проводников демонстрируется на рис. 4. Диаметр проводника $d = 0,002$ м, расстояние между проводами $D = 0,004$ м, высота проводников над листом или экраном $h = 0,0045$ м, диаметр оплетки $d_c = 0,018$ м.

Проведенные расчеты для различных условий и результаты расчета (см. рис. 4) показывают, что на практике при определении волнового сопротивления каналов распространения достаточно учитывать только ближайšie к линии проводники.

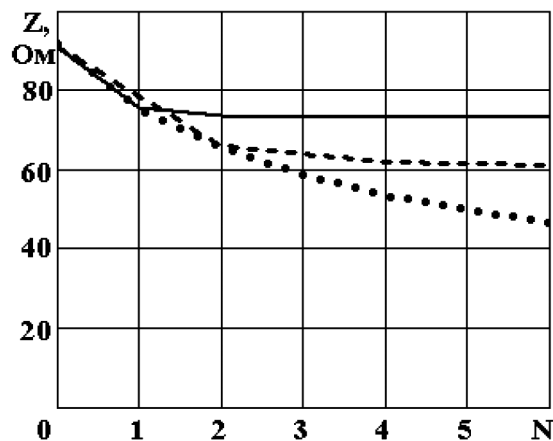


Рис. 4. Зависимость волнового сопротивления проводника над проводящей плоскостью от количества N параллельно проложенных с ним проводников
 Условные обозначения: ————— — N проводников с одной стороны на той же высоте;
 - - - - - — N проводников с двух сторон от основного проводника;
 ••••• — проводник в центре экрана кабеля при наличии вокруг него N соседних проводников

Результаты экспериментально измерения волновых сопротивлений Z_3 каналов распространения импульсов напряжения в кабеле КМПВЭ 7×2,5 и результаты расчета Z без учета влияния соседних проводников и экрана и с их учетом приведены в следующей таблице:

Волновое сопротивление каналов распространения в кабеле КМПВЭ 7×2,5

| Цепь — канал распространения | Z , Ом, без учета соседних проводников | Z , Ом, с учетом соседних проводников | Z_3 , Ом, измеренное |
|--|--|---|------------------------|
| Соседние жилы наружного слоя | 108 | 74 | 78–80 |
| Жилы наружного слоя через одну | 160 | 86 | 93 |
| Жилы наружного слоя противоположные | 172 | 89 | 97 |
| Жила центральная — жила наружного слоя | 108 | 76 | 78 |
| Жила наружного слоя — экран | 82 | 60 | 54–56 |
| Жила центральная — экран | 92 | 54 | 61 |

Расчет волнового сопротивления с учетом соседних проводников и экрана имеет погрешность менее 10 %, что приемлемо для расчетов распространения импульсных помех по кабелям. Формулы (3)–(7) для одиночного провода над экраном или одиночной пары проводов не учитывают влияние соседних проводников, поэтому не пригодны для прямого расчета параметров распространения в многожильных кабелях и кабельных трассах. Для судового кабеля КНР расчетное значение волнового сопротивления уменьшается от 105 Ом для кабеля КНР с сечением 3×1 мм² до 30 Ом для кабеля КНР с сечением 3×240 мм².

Сравнение результатов расчета и измерения волнового сопротивления канала распространения *проводник – проводящий лист* (корпус судна) приведены на рис. 5. Подтверждается возможность расчета Z с учетом только соседних кабелей (проводников) в трассе.

Результаты расчета на основе модели кабеля с потерями и осциллографирования напряжения в начале кабеля КМПВЭ 7×2,5 длиной 50 м и на его разомкнутом конце при подаче между соседними жилами импульсов от имитатора пачек помех ИПП-4000 (выходное сопротивление 50 Ом) представлены на рис. 6.

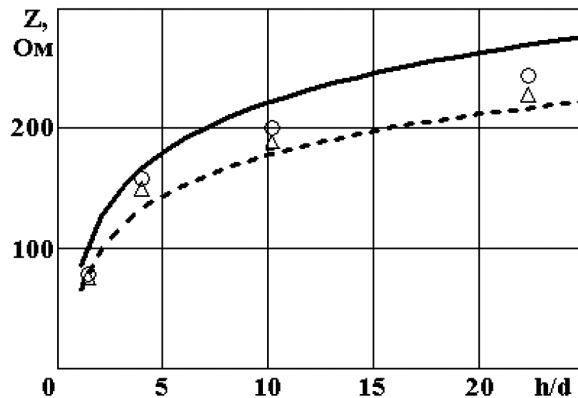


Рис. 5. Зависимость волнового сопротивления проводника Z над металлическим листом от отношения высоты прокладки h к ее диаметру d

Условные обозначения:

- расчет для одиночного проводника диаметром 6 мм;
- расчет с учетом влияния соседнего проводника;
- ○ ○ — измерения для проводника диаметром 6 мм;
- △ △ △ — измерения при наличии соседнего проводника.

Первый импульс на рис. 6, а создан ИПП-4000, второй — первым приходом отраженного от дальнего конца кабеля импульсом, третий — вторым приходом. Первый импульс на рис. 6, б обусловлен первым приходом импульса на конец кабеля. Амплитуда импульса достигает почти двойного значения амплитуды импульса, создаваемого ИПП-4000 в начале кабеля, из-за 100 %-го отражения при отсутствии нагрузки. Расчетная модель несколько занижает длительность импульса на конце кабеля, не позволяя рассчитать незначительный выброс положительной полярности перед вторым приходом импульса на конец кабеля.

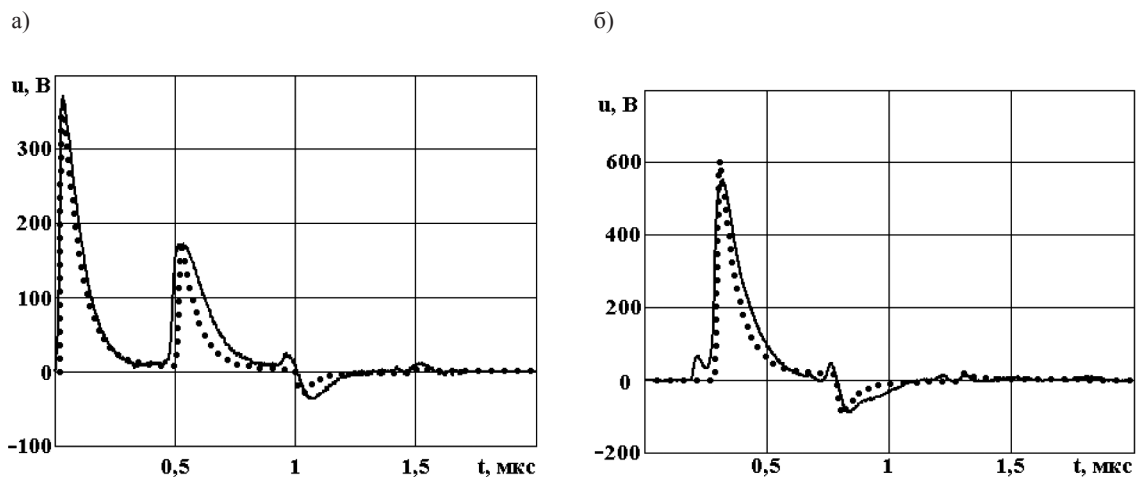


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (сплошные линии) в начале кабеля КМПВЭ 7×2,5 длиной 50 м (а) и в его конце (б) и результаты расчета (точки)

Результаты расчета при учете потерь и экспериментального исследования распространения наносекундных импульсов стандартной формы (с фронтом 5 нс и длительностью 50 нс) показывают увеличение длительности фронта и длительности импульсов. Для кабеля с малыми сечениями изменение фронта импульса больше, чем для кабеля с большими сечениями. При распространении по кабелю КНР сечением 3×1 мм² длиной 10 м амплитуда импульса уменьшается на 12 %, длительность фронта увеличивается на 24 %, длительность импульса увеличивается на 14 %. При длине кабеля 50 м амплитуда импульса уменьшается на 42 %, длительность фронта увеличивается

в 2,3 раза, а длительность импульса увеличивается на 64 %. При распространении того же импульса по кабелю КНР сечением 3×70 мм² и длиной 50 м амплитуда импульса уменьшается только на 19 %, длительность фронта увеличивается на 40 %, а длительность импульса увеличивается на 22 %. Микросекундные импульсные помехи (фронт 1 мкс, длительность 50 мкс) практически не изменяются по амплитуде при распространении по электротехническим кабелям длиной до 100 м, лишь длительность фронта импульса напряжения на дальнем конце растягивается до 0,1 мкс.

Обсуждение (Discussion)

Волновые параметры судовых электротехнических кабелей и кабелей управления не регламентированы и не приводятся в технических данных этих кабелей. Расчеты на основе формул, приведенных в [1], [10]–[12] для простейших случаев, дают недопустимые погрешности при расчете волновых параметров многожильных кабелей и для кабелей в трассе. Применение теории многопроводных линий [2] требует больших затрат по получению исходных данных и достаточно трудоемки в расчетах. Предлагаемый учет влияния только соседних проводников позволяет использовать формулы (3)–(7) [10], применяя их для расчета основного канала распространения и добавочных емкостей, обусловленных ближайшими проводниками.

Необъясненным пока остается появление небольшого положительного выброса перед третьим импульсом в начале кабеля и перед вторым на его конце, т. е. перед импульсом, претерпевшим отражение от источника импульсов. Модель не учитывает это явление, что, вероятно, можно объяснить влиянием индуктивности выходной цепи ИПП-4000.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Наносекундные импульсные помехи, возникающие при коммутациях в сети, способны вызвать сбои в работе любых технических средств, содержащих цифровые схемы. Импульсные помехи распространяются от точки возникновения по судовым кабелям и воздействуют на электронное оборудование по цепям питания и передачи информации.

2. Для оценки максимально возможных значений амплитуды импульсных помех расчет может быть проведен методом распространяющихся волн на основе модели кабелей при отсутствии потерь. Амплитуда импульсов определяется неоднородностями кабельной линии, соотношением сопротивления нагрузки и волнового сопротивления кабеля. На нагрузке с сопротивлением, значительно большим волнового сопротивления, возможно удвоение амплитуды. Более точная модель учитывает потери в кабеле.

3. Распределенные параметры кабелей, необходимые для расчета, отсутствуют в технической документации электротехнических кабелей. Предлагается рассчитывать эти параметры на основе приведенного подхода, учитывающего влияние соседних проводников (кабелей), или измерять волновые сопротивления каналов распространения описанным методом.

4. Приведенные значения волновых сопротивлений каналов распространения, количественные оценки изменения параметров помех полезны для прогнозирования воздействия импульсных помех на судовое оборудование. В частности, важен вывод, что микросекундные импульсные помехи практически не изменяются по амплитуде при распространении по электротехническим кабелям длиной до 100 м.

5. В дальнейшем предполагается составить таблицы с волновыми параметрами основных типов судовых кабелей и создать программный продукт, удобный для практических расчетов распространения импульсных помех в судовых кабельных трассах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воршевский А. А. Электромагнитная совместимость судовых технических средств / А. А. Воршевский, В. Е. Гальперин. — СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2010. — 317 с.

2. Paul C. R. Analysis of multiconductor transmission lines / C. R. Paul. — New York: Wiley, 1994. — 584 p.
3. Haase H. New propagation models for electromagnetic waves along uniform and nonuniform cables / H. Haase, T. Steinmetz, J. Nitsch // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. — 2004. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 345–352. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831829.
4. Barmada S. Wavelet-based time-domain solution of multiconductor transmission lines with skin and proximity effect / S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. — 2005. — Vol. 47. — Is. 4. — Pp. 774–780. DOI: 10.1109/TEMC.2005.857868.
5. De Lauretis M. A SPICE Realization of the Delay-Rational Green's-Function-Based Method for Multiconductor Transmission Lines / M. De Lauretis, G. Antonini, J. Ekman // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2016. — Vol. 58. — Is. 4. — Pp. 1158–1168. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2546552.
6. Tan E. L. Non-uniform Time-Step FLOD-FDTD Method for Multiconductor Transmission Lines Including Lumped Elements / E. L. Tan, Z. Yang // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2017. — Vol. 59. — Is. 6. — Pp. 1983–1992. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2691345.
7. De Lauretis M. A Delay-Rational Model of Lossy Multiconductor Transmission Lines With Frequency-Independent Per-Unit-Length Parameters / M. De Lauretis, G. Antonini, J. Ekman // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2015. — Vol. 57. — Is. 5. — Pp. 1235–1245. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2423327.
8. Honarbakhsh B. Analysis of Multiconductor Transmission Lines Using the CN-FDTD Method / B. Honarbakhsh; S. Asadi // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2016. — Vol. 59. — Is. 1. — Pp. 184–192. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2598067.
9. Сухоруков С. А. Особенности распространения импульсных перенапряжений по однопроводным линиям / С. А. Сухоруков // Технологии ЭМС. — 2011. — № 9 (38). — С. 52–77.
10. Tesche F. EMC analysis methods and computational models / F. Tesche, M. Ianoz, T. Karlson. — New York: Wiley, 1997. — 623 p.
11. Иоссель Ю. А. Расчет электрической емкости / Ю. А. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струинский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат (Ленингр. отд.), 1981. — 288 с.
12. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. — М.: Энергия, 1970. — 380 с.

REFERENCES

1. Vorshevskii, A. A., and V. E. Gal'perin. *Elekromagnitnaya sovместimost sudovyh tehicheskikh sredstv*. SPb: SPbGMTU, 2010.
2. Paul, C. R. *Analysis of multiconductor transmission lines*. New York: Wiley, 1994.
3. Haase, Heiko, Torsten Steinmetz, and Jürgen Nitsch. “New propagation models for electromagnetic waves along uniform and nonuniform cables.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 46.3 (2004): 345–352. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831829.
4. Barmada, Sami, Antonino Musolino, and Marco Raugi. “Wavelet-based time-domain solution of multiconductor transmission lines with skin and proximity effect.” *IEEE transactions on electromagnetic compatibility* 47.4 (2005): 774–780. DOI: 10.1109/TEMC.2005.857868.
5. De Lauretis, Maria, Giulio Antonini, and Jonas Ekman. “A SPICE realization of the delay-rational Green's-function-based method for multiconductor transmission lines.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 58.4 (2016): 1158–1168. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2546552.
6. Tan, Eng Leong, and Zaifeng Yang. “Non-uniform Time-Step FLOD-FDTD Method for Multiconductor Transmission Lines Including Lumped Elements.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 59.6 (2017): 1983–1992. DOI: 10.1109/TEMC.2017.2691345.
7. De Lauretis, Maria, Giulio Antonini, and Jonas Ekman. “A delay-rational model of lossy multiconductor transmission lines with frequency-independent per-unit-length parameters.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 57.5 (2015): 1235–1245. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2423327.
8. Honarbakhsh, Babak, and Shahrooz Asadi. “Analysis of multiconductor transmission lines using the CN-FDTD method.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 59.1 (2016): 184–192. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2598067.
9. Suhorukov, S.A. “Osobennosti rasprostraneniya impulsnyh perenapryazheniy po odnoprovodnym liniyam.” *Tehnologii EMC* 9(38) (2011): 52–77.

10. Tesche, F., M. Ianoz, and T. Karlson. *EMC analysis methods and computational models*. New York: Wiley, 1997.
11. Yossel, Y. A., E. S. Kochanov, and M. G. Struinskiy. *Raschet elektricheskoy emkosti*. L.: Energoizdat, 1981.
12. Kalantarov, P. L., and L. A. Ceytlin. *Raschet induktivnosti*. M.: Energiya, 1970.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахрестин Михаил Анатольевич —
инженер-конструктор
АО «Санкт-Петербургское морское бюро
машиностроения «Малахит»
196135, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Фрунзе, 18
e-mail: mishail05@mail.ru

Воршевский Александр Алексеевич —
доктор технических наук, доцент
Санкт-Петербургский Государственный морской
технический университет
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
e-mail: elemcom@smtu.ru

Воршевский Петр Александрович —
старший преподаватель
Санкт-Петербургский Государственный морской
технический университет
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
e-mail: kws@smtu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhrestin, Mikhail A. —
Engineer-constructor
St. Petersburg Maritime Bureau
of Mechanical Engineering «Malachite», JSC
18 Frunze Str., St. Petersburg, 196135,
Russian Federation
e-mail: mishail05@mail.ru

Vorshevsky, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: elemcom@smtu.ru

Vorshevsky, Petr A. —
Senior Lecturer
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: kws@smtu.ru

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2019 г.
Received: March 11, 2019.*