

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-146-155

COMPUTER SIMULATION OF A HIGH-FREQUENCY SIGNAL PROPAGATION IN THE SHIP'S HIGH-VOLTAGE ELECTRO-ENERGY SYSTEM

S. Y. Kuznetsov, D. M. Makarov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The computer modeling of changes in the shape and amplitude of a high-frequency signal at its propagation in the ship high-voltage cables is considered in the paper. The computer simulation was carried out on the basis of the real parameters of the ship high-voltage electric power system of gas carrier vessel Corcovado LNG. On the basis of the ship's technical documentation, it was concluded that the overwhelming number of the electricity receivers are connected to high-voltage switchboards using cables of 60 meters long. Only cargo pumps for liquid natural gas have a cable length of 200 meters. Thus, the computer simulation of a high-frequency signal propagation is performed in the ship high-voltage cables of 60 and 200 meters long. A theoretical description of change in the shape and the amplitude of a high-frequency signal at its propagation is presented using mathematical equations. The simulation is produced in Matlab/Simulink program. The cables of 60 and 200 meters long are described by means of a quadripole (RLCG section). The cable parameters and other simulation parameters are set in the program dialog window. Based on the obtained simulation results, the additional mathematical calculations were performed to obtain the attenuation coefficient and the propagation constantan. The graphs show the dependence of the change in the shape and the amplitude of the high-frequency signal on its frequency, taking into account the influence of the cable length. As a result, on the basis of the computer simulation, it was concluded that a partial discharge with a frequency of 30 MHz can be successfully measured in the high-voltage cable of 60 m long and a partial discharge with the frequency of 10 MHz can be measured in the high-voltage cable of 200 m long.

Keywords: partial discharge, cable, computer simulation, RLCG section, gas carrier, attenuation coefficient, distribution coefficient, high voltage, Matlab.

For citation:

Kuznetsov, Sergey Ye., and Daniil M. Makarov. "Computer simulation of a high-frequency signal propagation in the ship's high-voltage electro-energy system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 146–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-146-155.

УДК 621.3.048.004.58

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В СУДОВОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрено компьютерное моделирование изменения формы и амплитуды высокочастотного сигнала при его распространении в судовых высоковольтных кабелях. Компьютерное моделирование произведено на основании реальных параметров судовой высоковольтной электроэнергетической системы судна танкера-газовоза Corcovado LNG. На основании судовой технической документации сделан вывод о том, что подавляющее количество приемников электроэнергии соединяются с распределительны-



ми высоковольтными щитами с помощью кабелей длиной 60 м. Только грузовые насосы для перекачки природного газа имеют длину кабеля 200 м. Таким образом, компьютерное моделирование распространения высокочастотного сигнала произведено в судовых высоковольтных кабелях длиной 60 и 200 м. С помощью математической и компьютерной модели представлено теоретическое описание изменения формы и амплитуды высокочастотного сигнала при его распространении в кабельных линиях. Моделирование произведено в программе Matlab / Simulink. Кабели длиной 60 и 200 м описываются посредством четырехполюсника (RLCG секция). В диалоговом окне программы задаются параметры кабеля и другие параметры моделирования. На основании полученных результатов моделирования произведены дополнительные математические расчеты для получения коэффициента затухания и константы распространения. Отображены графически зависимости и формы и амплитуды высокочастотного сигнала от его частоты с учетом влияния длины кабеля. В результате на основании проведенного компьютерного моделирования с учетом влияния длины кабеля. В результате на основании проведенного компьютерного моделирования и частотой 10 МГц — в кабеле длиной 200 м.

Ключевые слова: частичный разряд, кабель, компьютерное моделирование, RLCG секция, танкергазовоз, коэффициент затухания, коэффициент распространения, высокое напряжение, Matlab.

Для цитирования:

Кузнецов С. Е. Компьютерное моделирование распространения высокочастотного сигнала в судовой высоковольтной электроэнергетической системе / С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 146–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-146-155.

Введение (Introduction)

Международный стандарт IEC 60270¹ и ГОСТ 20074–83² называют *частичный разряд* (ч. р.) локальным электрическим разрядом, который шунтирует часть изоляции в электроизоляционной системе. На возникновение ч. р. оказывает влияние множество факторов, таких, например, как структура изоляции, наличие неоднородностей электрического поля, температура, увлажнение электрической изоляции, вибрация и др. Частичные разряды имеют локальный характер возникновения и являются следствием концентрации электрической напряженности поля в изоляции или на ее поверхности, превышающей электрическую прочность изоляции в месте возникновения и происходят мгновенно. Как правило, время ч. р. нарастания измеряется от 1 до 10 нс, а частота составляет от кГц до десятков МГц [1]. Таким образом, они относятся к высокочастотным сигналам.

Известно, что высокочастотный сигнал, распространяясь в проводнике, изменяет свою форму и амплитуду в зависимости от пройденного расстояния и влияния частотной составляющей [2]. Для определения изменения формы сигнала в реальных объектах и кабелях используется *принцип отражения сигнала* (Time Domain Reflectometry). Основная суть данного принципа заключается в искусственном введении импульса напряжения заведомо известного значения в кабель длиной L и снятии значения отраженного сигнала от противоположного конца с помощью датчика (катушки индуктивности). Так, в работе [3] приведены результаты изменения формы сигнала в зависимости от расстояния до места частичного разряда, что позволяет определить расстояние до места возникновения ч. р. в электрической изоляции.

В данной статье для того чтобы определить изменение формы частичного разряда при его распространении с учетом судовых условий вместо реального диагностического оборудования, используется компьютерное моделирование в программе Matlab / Simulink на основании разработанной модели с учетом параметров, характеризующих высоковольтные судовые кабели [4].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Передающие линии с распределенными и сосредоточенными параметрами. При рассмотрении электромагнитных колебаний особенно важным является соотношение между геометрическими размерами, характеризующими передающую линию (кабель), и длиной волны λ передаваемого

¹ IEC 60270. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. IEC, 2000. 96 с.

² ГОСТ 20074–83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М.: Изд-во стандартов, 1983. 24 с.



сигнала. Данное соотношение учитывается при анализе распространения сигналов в линиях. Так, линия длиной l = 500 м, по которой передается напряжение с частотой 50 Г, будет относиться к линии с сосредоточенными параметрами, при анализе которой не учитывается изменение формы и амплитуды сигналов по мере их распространения, ввиду того что $\lambda >> l$. Если по линии длиной l = 500 м передается напряжение частотой от нескольких мегагерц и выше, то линия уже будет считаться с распределенными параметрами $\lambda \ll l$, в которой необходимо учитывать изменения формы и амплитуды сигнала по мере его распространения. Таким образом, одна и та же передающая линия может рассматриваться как линия с сосредоточенными параметрами, так и с распределенными в зависимости от частоты сигнала.

Как отмечалось ранее, ч. р. имеют широкий частотный спектр с преобладанием высоких частот, что экспериментально доказано при измерении ч. р. на реальном высоковольтном электрооборудовании и в кабелях [5], [6]. Соответственно при рассмотрении изменения формы и амплитуды ч. р., по мере распространения сигнала, необходимо воспользоваться схемой замещения проводника с распределенными параметрами. Такая передающая линия длинной *l* может быть представлена в виде четырехполюсника, схема замещения которого представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема замещения четырехполюсника

Четырехполюсник описываются при помощи параметров ABCD, которые, в свою очередь, зависят от длины линии (l), константы распространения (γ), волнового сопротивления линии (Z_0), сопротивления (R), индуктивности (L), емкости (C) и проводимости (G) [7]. Параметры *ABCD* и волновое сопротивление линии (Z_0) определяются по формулам:

$$\begin{split} A &= \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2}; \\ B &= \frac{Z_0(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})}{2}; \\ C &= \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2Z_0}; \\ D &= \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2}; \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \end{split}$$

Уравнение однородной линии. Предположим, что секция однородного проводника (рис. 1) имеет длину Δx и представляет собой одну секцию линии. Тогда параметры проводящей линии будут: $R(\Delta x)$, $L(\Delta x)$, $G(\Delta x)$, $C(\Delta x)$. Распространение волн напряжения и тока в проводнике с распределенными параметрами описывается «телеграфными уравнениями» [7]. Основные уравнения такого проводнике представлены ниже.

Уменьшение значения напряжения в конце проводника по сравнению с значением в начале вызвано падением напряжения на индуктивности *L* и сопротивлении *R*:

$$\Delta u = -L(\Delta x)\frac{\partial i}{\partial t} - R(\Delta x)i$$

2019 rog. Tom 11. Nº 1



Уменьшение значения тока в конце проводника происходит за счет разделения тока и прохождения его через емкость *C* и проводимость *G*:

$$\Delta i = -C(\Delta x)\frac{\partial u}{\partial t} - G(\Delta x)u.$$

Если разделить обе части на Δx при $\Delta x \rightarrow 0$, получим «телеграфные уравнения»:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L\frac{\partial i}{\partial t} - Ri;$$
$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C\frac{\partial u}{\partial t} - Gu.$$

При режиме установившихся синусоидальных колебаний уравнения примут вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -(R + j\omega L)i;$$
$$\frac{\partial i}{\partial x} = -(G + j\omega C)u.$$

Таким образом, из уравнений видно, что на значение тока и напряжения в проводнике оказывает влияние угловая частота ω , которая, в свою очередь, зависит от частоты f анализируемого сигнала.

Уменьшение амплитуды сигнала и изменение его формы описываются вещественной и мнимой частями частотно-зависимой константы распространения γ (ω) [8]:

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

где *R* — сопротивление проводника;

L — индуктивность проводника;

G — проводимость проводника;

С — емкость проводника;

ω — угловая частота;

α — коэффициент затухания амплитуды импульса (1 Нп = 8,086 дБ);

β — коэффициент фазового угла.

Коэффициент затухания α, дБ, в конце проводящей линии определяется по формуле [9]:

$$\alpha = 20 \lg \frac{U_x}{U_l},$$

где U₁ — напряжение на расстоянии ;

*U*_r — напряжение в начале линии;

l — длина линии.

При моделировании распространения сигнала в судовом высоковольтном проводнике (кабеле), параметры *R*, *L*, *C* были взяты из судовой технической документации [4]. Значение проводимости кабеля рассчитывается по формуле

$$G = 2\pi f C \operatorname{tg} \delta,$$

где tg $\delta = 0,007$ — угол диэлектрических потерь;

f— частота питающего напряжения;

С — емкость проводника:

Угловая частота ω определяется по формуле

$$\omega = 2\pi f$$

Моделирование в Matlab / Simulink. Matlab и его главное расширение Simulink поставляются в едином программном комплексе, представляя в совокупности мощный вычислительный инструмент с широкими возможностями моделирования и анализа полученных результатов. Matlab поддерживает множество других пакетов, например, пакеты для моделирования линейных и не-



линейных динамических систем [10]–[12], что, в свою очередь, еще больше увеличивает возможности программы.

Для того чтобы моделировать и исследовать изменение формы и амплитуды сигнала по мере его распространения, необходимо с учетом схемы замещения (см. рис. 1) собрать моделирующую схему. Участок проводящей линии (кабель) представляет собой четырехполюсник (*RLCG* секцию). Моделирующая схема в Matlab представлена на рис. 2.





Моделирующая схема состоит из следующих элементов:

-RLCG секция (*HV cable*) — служит для описания исследуемого проводника (высоковольтного кабеля). В данной секции задаются следующие параметры: частота, при которой взяты (рассчитаны) параметры *RLCG* (60 Гц), сопротивление (*R*), индуктивность (*L*), емкость (*C*), проводимость (*G*), длина проводника, режимы секции. На рис. 3, *а* приведено диалоговое окно, в котором задаются параметры.

Block Parameters: HV cable			×	🚹 Block Parameters: AC source		
Transmission Line			Sinusoidal Source			
Model a transmission line.			Model a sinusoidal voltage or cur	rent source.		
Main Modeling Visualiza	ation			Parameters		
Parameters	N 60		-	Source type:	Ideal voltage	
Model type: Resistance per unit length:	RLCG	Ohm/m	•	Offset in-phase:		V
Inductance per unit length:		H/m	•	Offset quadrature:		V
Capacitance per unit length:		F/m	-	Sinusoidal amplitude in-phase:		V
Conductance per unit length:		S/m	-	Sinusoidal amplitude quadrature:		V
ine length:		m	•	Sinusoidal modulation frequency:		Hz
Frequency:	Lipoar	Hz	•	Time delay:		s
Stub mode:	Not a stub		•	Carrier frequencies:		Hz
Ground and hide negative	terminals			Ground and hide negative terr	ninal	

Рис. 3. Диалоговое окно задания параметров: *а* — в *RLCG* секции; *б* — в источнике напряжения

AC source — источник для задания напряжения, частоты и начального значения фазового угла, на рис. 3, *б* приведено диалоговое окно, в котором задаются параметры.

2019 rog. Tom 11. Nº 1



Блоки *Vin* и *Vout* — служат для снятия значений напряжения на входе секции и на выходе соответственно.

Vs (осциллограф) — служит для графического отображения результатов моделирования.

Parameters block — служит для задания дополнительных параметров моделирования.

Gnd — предназначен для заземления выводов.

На основе анализа судовой документации [13] можно сделать вывод о том, что подавляющее количество приемников и источников электроэнергии судовой высоковольтной электроэнергетической системы (СВЭЭС) соединяются с распределительными щитами высоковольтными кабелями длиной 60 м и только некоторые приемники, питающиеся от грузового распределительного щита, имеют длину кабельных трасс 200 м. Таким образом, для исследования изменения формы и амплитуды сигнала по мере его распространения могут быть рассмотрены мощные кабели [14] длиной 60 м и 200 м с диаметром 95 мм² в обоих случаях. При этом, так как коэффициент затухания зависит только от параметров линии и частоты сигнала, при моделировании с целью сравнительного анализа для всего диапазона рассматриваемых частот принято одинаковое напряжение 3300 В. Параметры, характеризующие эти кабели:

Питающее напряжение, В	.3300
Частота введенного импульса напряжения, МГц	.от 0 до 100
Сопротивление линии, Ом/м	.0,000284
Индуктивность линии, мГн/м	.0,000000355
Емкость линии, мкФ/м	.0,000000000411
Проводимость линии, См/м	.0,00000001084
Длина линии, м	.60 и 200
Площадь поперечного сечения высоковольтного кабеля, мм ²	.95

Результаты (Result)

Полученные результаты расчета константы распространения у и коэффициента затухания при частоте напряжения *f* для кабелей длиной 200 м и 60 м сведены в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные параметры распространения для кабелей длиной 200 м и 60 м

Частота напряжения f,	Константа	Коэффициент затухания, дБ		
МГц	распространения ү	Кабель 200 м	Кабель 60 м	
0	0	0	0	
0,001	0,000005 + 0,00007j	0	0	
0,005	0,000006 + 0,0003j	0	0	
0,009	0,000007 + 0,0006 <i>j</i>	0	0	
0,03	0,000012 + 0,002j	0	0	
0,09	0,000028 + 0,007j	0	0	
0,27	0,000076 + 0,02 <i>j</i>	0	0	
0,8	0,00021 + 0,061 <i>j</i>	0,008	0	
1,5	0,0004 + 0,114j	0,021	0,003	
2	0,00053 + 0,152 <i>j</i>	0,037	0,004	
3	0,0008 + 0,228j	0,082	0,008	
10	0,003 + 0,759j	1,069	0,101	
15	0,004 + 1,138 <i>j</i>	2,17	0,21	
30	0,008 + 2,276j	7,2	0,82	
50	0,013 + 3,79j	15,45	2,1	
75	0,02 + 5,68j	26,2	4,53	
100	0,027 + 7,58j	37,1	7,3	

2019 год. Том 11. №



По данным табл. 2 можно сделать вывод о том, что с увеличением частоты питающего напряжения от значения 0,8 МГц происходит постепенное увеличение коэффициента затухания сигнала, и, следовательно, уменьшение амплитуды анализируемого сигнала.

Полученные результаты моделирования представлены на рис. 4 в виде зависимостей напряжения, измеренного на конце проводящей линии при разных частотах приложенного в начале линии напряжения 3300 В.



2019 rog. Tom 11. Nº 1



ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Рис. 4. Сигналы напряжения, измеренные на конце проводящей линии длиной 200 м и 60 м: *а* — частотой 10 МГц; *б* — частотой 30 МГц; *в* — частотой 50 МГц; *г* — частотой 100 МГц

При анализе графиков (см. рис. 4) видно, что максимальное значение амплитуды сигнала напряжения уменьшается с увеличением частоты, но при этом форма сигнала на конце кабеля остается подобной первоначальной. Только на высоких частотах (100 МГц) в проводящей линии длиной 200 м происходит значительное уменьшение амплитуды напряжения.

В табл. 2 сведены максимальные и минимальные значения амплитуды напряжения смоделированных сигналов, показанных на рис. 4.

Таблица 2

Частота напряжения, МГц	Максим значение на	иальное пряжения, В	Минимальное значение напряжения, В		
	60 м	200 м	60 м	200 м	
10	3262	2918	-3262	-2918	
30	3002	1437	-3002	-1437	
50	2566	557,7	-2566	-557,7	
100	1422	46,72	-1422	-46,72	

Максимальные и минимальные значения амплитуды напряжений

По данным табл. 2 можно сделать вывод о том, что максимальная частота для кабеля длиной 60 м, при которой амплитуда напряжения уменьшится относительно незначительно, являет-



Рис. 5. Затухание волн в коаксиальном кабеле (пунктирная линия) и различных волн (электрических и магнитных) в круглом полом волноводе ся 30 МГц. На такой частоте изменение напряжения во время моделирования составляет 298 В, т. е. 9 %, и соответствует 0,82 дБ. При этом для кабеля длиной 200 м соизмеримое значение коэффициента затухания в конце линии будет на частоте примерно равной 10 МГц.

На рис. 5 приведены кривые коэффициента затухания для коаксиального кабеля и круглого полого волновода, в которых могут возникать различные типы волн. Из рисунка видно, что коэффициент затухания в коаксиальном кабеле имеет практически линейную зависимость, схожую по форме с зависимостью для высоковольтного кабеля XLPE, рассматриваемого в статье. Линейное возрастание коэффициента затухания в кабеле XLPE и коаксиальном кабеле по сравнению с круглым



полым волноводом в целом можно объяснить меньшей плотностью поверхностных токов, сопровождающих движение электромагнитной волны по линии.

Заключение (Conclusion)

На основе математической и компьютерной модели проведены исследования распространения импульсов напряжения при разной частоте напряжения и длине кабелей применительно к танкеру-газовозу с главной дизель-электрической установкой мощностью 32000 кВт, напряжением 3300 В, частотой 60 Гц и длиной судовых высоковольтных кабелей 60 м и 200 м. При этом для сравнительного анализа для всех частот принято напряжение 3300 В. Целью исследований являлось определить, на каких частотах следует определять сигналы от импульсов частичных разрядов, возникающих в судовой высоковольтной изоляции.

Выполненные исследования показали, что при распространении высокочастотного сигнала напряжения, например, от частичных разрядов в судовых высоковольтных кабелях, сигнал незначительно меняет форму и может быть измерен при длине кабеля ~ 60 м на частотах не более ~ 30 МГц, а при длине кабеля от источника частичного разряда до приемника сигнала ~ 200 м — на частотах не более ~ 10 МГц. При этом следует также учитывать величину сигнала напряжения от частичного разряда на этих частотах и возможности соответствующих измерительных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьянова И. П. Теория волновых процессов. Электромагнитные волны / И. П. Соловьянова, М. П. Наймушин. — Екатеринбург: УПИ, 2005. — 131 с.

2. *Dipashree D*. Signal attenuation in powerline communication channel / D. Dipashree, G. Vidya // International journal of emerging trends & technology in computer science. — 2014. — Vol 3. — Is. 2. — Pp. 123–130.

3. *Chae-Kyun J.* Partial discharge simulation and analysis based on experiment in underground distribution power cables / J. Chae-Kyun, K. Jeong-Tae, L. Jong-Beom // Journal of electrical engineering and technology. — 2013. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 832–839. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.4.832.

4. High voltage power cable technical data for LNG. — "GE Energy", 2014. — 7 p.

5. *Alvarez F*. Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment / F. Alvarez, F. Garnacho, J. Ortego, M. Á. Sánchez-Urán // Sensors. — 2015. — Vol. 15. — Is. 4. — Pp. 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.

6. *Renforth L*. Deployment of distributed on-line partial discharge monitoring devices on medium-voltage electricity networks / L. Renforth, R. Mackinlay, M. Seltzer-Grant // 20th International conference on electricity distribution (CIRED 2009). — 2011. DOI: 10.1049/cp.2009.1010.

7. Brookes M. Analysis of circuits / M. Brookes. — 2017. — 72 p.

8. Rakhesh S. K. Transmission line analysis / S. K. Rakhesh. — 2013. — 100 p.

9. *Clark R*. On-line partial discharge testing of some of the worst performing circuits on a utility distribution system / R. Clark, M. Mackinlay, S. Seltzer-Grant, L. R. Goodfellow, M. Jamie, S Roger. — University of Manchester, HVPD Ltd, Scottish Power. — 6 p.

10. Дьяконов В. П. МАТLAB 5 с пакетами расширений / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова, В. В. Круглов. — М.: Нолидж, 2001. — 878 с.

11. Дьяконов В. П. МАТLAВ 6: учебный курс / В. П. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2001. — 592 с.

12. Потемкин В. Г. Введение в Matlab / В. Г. Потемкин. — М.: Диалог-МИФИ, 2000. — 256 с.

13. Capacitive current calculation for Corcovado LNG. — "GE Energy", 2014. — 8 p.

14. Chen G. On-site portable partial discharge detection applied to power cables using HFCT and UHF methods / G. Chen, J. Tao, Y. Ma, H. Fu, Y. Liu, Z. Zhou, C. Huang, C. Guo // WSEAS transactions on circuits and systems. — 2016. — Vol. 15. — Pp. 83–90.

REFERENCES

1. Solov'yanova, I. P., and M. P. Naimushin. *Teoriya volnovih processov. Electromagnitnye volni*. Ekaterinburg: UPI, 2005.



2. Duche, Dipashree, and Vidya Gogate. "Signal attenuation in powerline communication channel." *International journal of emerging technologies & technology in computer science* 3.2 (2014): 123–130.

3. Jung, Chae-Kyun, Jeong-Tae Kim, and Jong-Beom Lee. "Partial discharge simulation and analysis based on experiment in underground distribution power cables." *Journal of electrical engineering and technology* 8.4 (2013): 832–839. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.4.832.

4. High voltage power cable technical data for LNG. "GE Energy", 2014.

5. Álvarez, Fernando, Fernando Garnacho, Javier Ortego, and Miguel Ángel Sánchez-Urán. "Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment." *Sensors* 15.4 (2015): 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.

6. Renforth, L., R. Mackinlay, and M. Seltzer-Grant. "Deployment of distributed on-line partial discharge monitoring devices for medium-voltage electricity networks." *20th International conference on electricity distribution*. 2011. DOI: 10.1049/cp.2009.1010.

7. Brookes, Mike. Analysis of circuits. 2017.

8. Rakhesh, Singh Kshetrimayum. Transmission line analysis. 2013.

9. Clark, R., M. Mackinlay, S. Seltzer-Grant, L. Goodfellow, M. Jamie, and S. Roger. *On-line partial discharge testing of some of the worst performing circuits on a utility distribution system*. University of Manchester, HVPD Ltd, Scottish Power.

10. Dyakonov, V. P., I. V. Abramenkova, and V. V. Kruglov. *MATLAB 5 c packetami rashireniy*. M.: Nolidzh, 2001.

11. Dyakonov, V. P. MATLAB 6: Uchebniy kurs. SPb.: Peter, 2001.

12. Potemkin, V. G. Vvedenie v Matlab. M.: Dialog-MIFI, 2000.

13. Capacitive current calculation for Corcovado LNG. "GE Energy", 2014.

14. Chen, Guang, Jiagui Tao, Yong Ma, Hui Fu, Yang Liu, Zhicheng Zhou, Chengjun Huang, Canxin Guo. "On-site portable partial discharge detection applied to power cables using HFCT and UHF methods." *WSEAS transactions on circuits and systems* 15 (2016): 83–90.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кузнецов Сергей Емельянович —	Kuznetsov, Sergey Ye. —
доктор технических наук, профессор	Dr. of Technical Sciences, professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru	e-mail: kuznecovse@gumrf.ru
Макаров Даниил Михайлович — аспирант	Makarov, Daniil M. — Postgraduate
Научный руководитель:	Supervisor:
Кузнецов Сергей Емельянович	Kuznetsov, Sergey Ye.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,	e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,
kaf_saees@gumrf.ru	kaf_saees@gumrf.ru
	Статья поступила в редакцию 27 декабря 2018 г.

Received: December 27, 2018.

2019 год. Том 11. Nº