

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-123-130  
УДК 629.311:629.5.001.26

Г.Н. Цицикян

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Объект и цель научной работы.** Рассмотрены результаты развития автономных электротехнических систем по ряду направлений, сформулированы некоторые задачи.

**Материалы и методы.** Материалы и методы исследования базируются на применении аналитических и численных методов, включая векторный анализ, а также современных средств измерений. Приведен перечень некоторых публикаций, руководящих документов и стандартов, отражающих результаты исследований.

**Основные результаты.** Основные результаты связаны с обеспечением качественных показателей электроэнергии, с вопросами электромагнитной совместимости и безопасности, с расчетом электродинамических сил в усложненных конфигурациях ошинок судового электрооборудования, с декомпозицией мощности с учетом всех ее составляющих.

**Заключение.** Представлен ряд новых теоретических и практических выводов в области качественных показателей электроэнергии, по вопросам электромагнитной совместимости, по оценке электродинамических сил и электробезопасности. Сформулированы предложения по применению вакуумной коммутационной аппаратуры.

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, электромагнитная совместимость, электробезопасность, векторный анализ, вакуумная коммутационная аппаратура.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-123-130  
UDC 629.311:629.5.001.26

G. Tsitsikyan

SET Branch, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## EVOLUTION OF MARINE ELECTRIC POWER SYSTEMS

**Object and purpose of research.** This paper tackles current state of evolution in autonomous electric systems for a number of aspects, as well as formulates some tasks for future developments.

**Materials and methods.** This study is based on analytical and numerical methods, including vector analysis, as well as on application of modern instrumentation. It enumerates some important publications, regulatory documents and standards where the results of these studies were used.

**Main results** of this work are connected with ensuring electric power quality, as well as electromagnetic compatibility and safety. They also deal with calculation of electrodynamic forces in sophisticated buses of marine electric equipment, taking into account power decomposition and all its components.

**Conclusion.** This study presents a number of new theoretical and practical conclusions in the matters of electric power quality, electromagnetic compatibility, assessment of electrodynamic forces and safety of electric equipment. It also gives suggestions on how to apply vacuum commutation equipment.

**Keywords:** electric power systems, electromagnetic compatibility, electric safety, vector analysis, vacuum commutation equipment.

*Author declares lack of the possible conflicts of interests.*

*Для цитирования:* Цицикян Г.Н. Результаты развития судовых электроэнергетических систем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 123–130.

*For citations:* Tsitsikyan G. Evolution of marine electric power systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 123–130 (in Russian).

Автономность судовой электроэнергетической системы обуславливает ряд специфических особенностей, нуждающихся в отдельных подходах, которые в ряде случаев могут не иметь соответствующих аналогов и должны рассматриваться самостоятельно.

К системам с автономным характером электропитания и электропотребления относится большинство электроэнергетических систем на транспорте, включая железнодорожный, водный и воздушный. Автономность является важным фактором, заостряющим необходимость в качественном электроснабжении, которое характеризуется рядом показателей. Значение этих показателей еще больше возрастает в связи с внедрением электродвижения с широким применением полупроводниковых преобразователей на основе достижений силовой электроники, реализующей новые экономические и эксплуатационные показатели. Вопросы качества электроэнергии рассматривались и освещались во многих публикациях и руководствах. Отметим лишь некоторые из них [1–3]. Показатели качества электроэнергии в системах общего назначения регламентированы ГОСТ 32144-2013 [1], вопросы управления качеством электроэнергии являлись предметом международной научно-практической конференции в МЭИ, по результатам которой был выпущен сборник трудов [2]. Следует также сказать и о монографии [3], посвященной качеству электроэнергии в автономных системах. Для судовой сети необходимо располагать фактическими данными по уровню основных показателей качества электроэнергии. Такие данные можно получить только путем измерения с помощью специализированных приборов, занесенных в реестр средств измерения.

В последнее время большое внимание уделялось научно-техническим вопросам, возникающим при внедрении в судостроение электроэнергетических систем с напряжением генераторов до 10,5 кВ и в связи с появлением комплекса задач, включающего электробезопасности и построение защиты от однофазных замыканий с контролем сопротивления изоляции [4, 5]. Вместе с тем остается востребованным круг задач по обеспечению селективности срабатывания защитно-коммутационных аппаратов путем соответствующего выбора «уставок» с целью своевременного отключения отдельных участков сети при возникновении в них коротких замыканий. В некоторых случаях допускается преднамеренное воспроизведение аварийных ситуаций для проверки селективности защиты и стойкости участков судовой сети к механическим воздействиям из-за возникно-

вения значительных электродинамических сил при токах короткого замыкания.

Уровень электродинамического взаимодействия в токоведущих частях автономных электроэнергетических систем важно оценивать не только при коротких замыканиях в системе, но и в стационарных режимах для трансформаторов, токоограничивающих реакторов, щитов, мощных преобразователей и др. Здесь приоритетное значение приобретают методы расчета, в которых учитывается наибольшее количество влияющих факторов в сочетании с относительной простотой получения численных результатов. Известно, что электродинамические силы рассчитываются как на основе закона Био – Савара – Лапласа, так и с помощью коэффициентов взаимной индукции, сначала для относительно простой геометрии контуров, составленных, например, из линейных проводников, а затем с обобщением для сил с учетом конечного сечения проводников [6–8].

Важно подчеркнуть, что упомянутая ошиновка зачастую не подпадает в разряд устройств, у которых длина существенно превосходит наибольшие поперечные размеры. Поэтому расчет электродинамических сил, исходя из предпосылки о плоскопараллельности поля, создаваемой ошиновкой на прямолинейных участках, может привести к значительной ошибке.

Большое внимание в судовой электротехнике, как и в электротехнике в целом, уделяется вопросам снижения взаимных влияний. На протяжении нескольких лет разрабатываются экспериментальные и расчетные методы определения показателей взаимного влияния, к числу которых могут быть отнесены переходные затухания, коэффициенты взаимной индукции, коэффициенты экранирования и т.д. [9–12].

Совместная прокладка кабельных линий предполагает учет всех факторов, влияющих на уровень взаимных влияний, в том числе относящихся к экранированию, повивной скрутке кабелей, заземлению в одной или в нескольких точках по длине совместной прокладки, разнесению кабельных линий и т.д.

К перечисленным вопросам тесно примыкает применение волоконно-оптических кабелей связи ввиду их специфических свойств, вытекающих из эффекта полного внутреннего отражения электромагнитных волн внутри кабелей как волноводов, содержащих волны с компонентами напряженностей в направлении распространения. Известны случаи их применения в гидроакустических комплексах.

Сравнительно недавно возникла необходимость в определении коэффициентов взаимной индукции

контуров различной конфигурации, в том числе осевых, круговых, прямоугольных, а также компланарных прямоугольных контуров. В [13] дан автономный вывод этих коэффициентов и проведено сопоставление с формулами, имеющимися в справочных руководствах, например [14]. В дальнейшем полученные выражения могут быть использованы для определения электродинамических сил. Рассмотрен альтернативный подход, основанный на публикации [15], в котором выражения для сил записаны в замкнутой форме через сферические функции Лежандра второго рода с полуцелым индексом. В [16] для компланарных прямоугольных контуров получены выражения для индуктивностей.

В монографии [17] сопоставлены имеющиеся выражения для индуктивностей тонкослойных катушек круговой и квадратной форм. Их прикладное значение состоит, в том числе, в определении индуктивностей тонкослойных катушек нагрузочных устройств, применяемых при швартовых испытаниях генераторных агрегатов судовой электростанции.

В последнее время все большее внимание обращают на себя вопросы коммутации электрических аппаратов с проявлением эффекта дуговых перенапряжений. При этом для дуги характерен так называемый стягивающий эффект или пинч-эффект как результат взаимодействия тока в дуге с ее собственным магнитным полем.

Предположим, что дуговой разряд ограничен поверхностью цилиндра с диаметром  $2R$ , ось которого совпадает с осью  $z$  цилиндрической системы координат  $r, \theta, z$ , и что плотность тока в такой дуге имеет только одну составляющую  $\delta_z$  (составляющую вдоль оси  $z$ ). Ввиду симметрии вращения эта плотность тока зависит только от  $r$ , а напряженность поля имеет тангенциальную компоненту, также зависящую только от  $r$ . В этом случае объемная сила имеет радиальное направление к оси  $z$ . Исходя из закона полного тока, для контура, ограниченного окружностью радиуса  $r$ , можно записать

$$2 \pi r H = 2 \int_0^r z(r) r dr, \quad (1)$$

и тогда

$$r H = \int_0^r z(r) r dr. \quad (2)$$

После дифференцирования по  $r$  обеих частей записанного выражения нетрудно прийти к уравнению

$$z(r) = \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{H}{r}. \quad (3)$$

В рассмотренном случае объемная плотность силы  $\vec{f}_v' = \vec{j} \times \vec{B}$  будет иметь одну компоненту по  $r$ , равную

$$(f_v')_r = \left( \frac{H^2}{r} + H \frac{\partial H}{\partial r} \right). \quad (4)$$

Объемная плотность силы и градиент давления связаны между собой соотношением

$$-(f_v')_r = \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (5)$$

Появление знака минус в последнем выражении показывает, что приращение давления, действующего от оси к периферии цилиндрического проводника, отрицательно.

Интегрируя последнее выражение в пределах от 0 до  $r$  и учитывая, что  $H|_{r=0} = 0$ , получаем

$$p - p_{\max} = - \int_0^r \frac{H^2}{r} dr - \frac{H^2}{2}, \quad (6)$$

где  $p_{\max}$  – давление на оси.

Распределение давления, определяемое предыдущим соотношением, приводит к уменьшению диаметра ствола дуги, к его сжатию, что и характеризует пинч-эффект. Пример распределения давления по сечению ствола дуги в предположении, что плотность тока по сечению дуги распределена равномерно, приведен в [6].

Возвращаясь к сказанному по поводу шин конечной длины, приведем здесь, в соответствии с [19], выражение для сил между параллельными тонкостенными шинами с токами  $i_1$  и  $i_2$ , расположенными горизонтально согласно рис. 1:

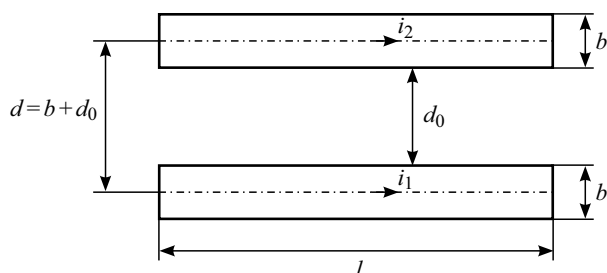
$$f^\Gamma = \frac{0i_1i_2l}{2d} \left[ -\frac{d}{l} + \frac{d^2}{2l^2} + \kappa_\Phi^\Gamma \right], \quad (7)$$

где

$$\kappa_\Phi^\Gamma = \frac{d}{b} \left[ \left( 1 + \frac{d}{b} \right) \ln \left( 1 + \frac{b}{d} \right) - \left( 1 - \frac{d}{b} \right) \ln \left( 1 - \frac{b}{d} \right) \right]. \quad (8)$$

Выражение для  $\kappa_\Phi^\Gamma$  как коэффициента формы для сил на единицу длины при горизонтальном расположении тонкостенных шин в пределе для преобладающей длины хорошо известно [6, 18]. Вместе с тем два первых члена выражения (7) учитывают конечную длину шин  $l$  при  $l^2 > d^2$  (рис. 1).

В работе [20], касающейся вакуумно-коммутационных аппаратов, было обращено внимание на отставание объемов их внедрения на морском



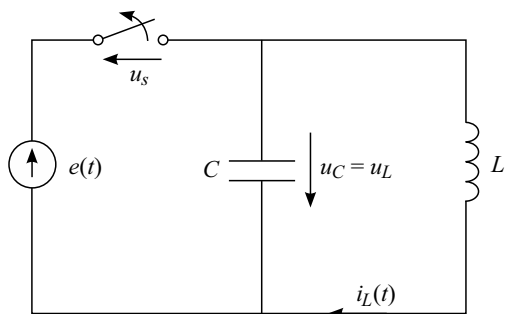
**Рис. 1.** Тонкостенные шины конечной длины с токами  $i_1$  и  $i_2$

**Fig. 1.** Thin-walled buses of finite length with currents  $i_1$  and  $i_2$

транспорте. Это вызвано, в частности, трудностями с возникновением коммутационных перенапряжений, обусловленных преждевременным обрывом (срезом) тока до его естественного прохождения через нуль, и необходимостью быстрого восстановления электрической прочности вакуумного промежутка. Что касается аппаратов переменного тока, то, на наш взгляд, на пути их внедрения в судостроении нет принципиальных затруднений. Следует отметить, что малогабаритные контакторы с вакуумной дугогасительной камерой типа КВТ-1,14 давно применяются в нагрузочных устройствах переменного тока.

Для краткой иллюстрации рассмотрим перенапряжения на контактах выключателя при отключении малых индуктивных токов, например, ненагруженного трансформатора.

Согласно [21, 22], коммутационные перенапряжения, возникающие в автономной электроэнергетической системе, в том числе между разомкнутыми контактами коммутационных аппаратов (контакторов, выключателей), могут иметь высокую амплитуду при отключении малых индуктивных



**Рис. 2.** К вопросу о перенапряжениях при отключении малых индуктивных токов

**Fig. 2.** Illustration of over-voltages during switch-out of low inductive currents

токов. Появление высоковольтного оборудования напряжением до 10,5 кВ актуализирует вопрос об оценке перенапряжений. Рассмотрим подробнее отключение ненагруженного трансформатора от шин высокого напряжения [1, 2]. Простейшая иллюстрация вопроса может быть основана на рассмотрении рис. 2, где  $e(t)$  – электродвижущая сила источника;  $i_L(t)$  – ток в цепи с большой индуктивностью до момента среза тока  $t_0$ ;  $L$  – большая индуктивность;  $C$  – входная емкость;  $u_L = u_C$  – напряжение на емкости после «среза» тока;  $u_s$  – напряжение на контакте после «среза» тока. Будем вести отсчет времени от момента среза тока  $t_0$ . Тогда

$$L \frac{di_L}{dt} = u_L = u_C = U_{C_0} - \frac{1}{C} \int_0^t i_L dt \quad (9)$$

и, следовательно,

$$L \frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} = -\frac{i_L}{C} \quad (10)$$

$$\text{или } \frac{d^2 i_L(t)}{dt^2} + \omega_0^2 i_L = 0,$$

$$\text{где } \omega_0 = \frac{1}{LC}. \quad (11)$$

Решение для  $i_L$  ищется в виде

$$i_L = A \sin \omega_0 t + B \cos \omega_0 t \quad (12)$$

$$\text{и } L \frac{di_L}{dt} = L \omega_0 (A \cos \omega_0 t - B \sin \omega_0 t).$$

Тогда с учетом (9) находим

$$L \omega_0 (A \cos \omega_0 t - B \sin \omega_0 t) \Big|_{t=0} = U_{C_0}.$$

Отсюда получаем

$$A = \frac{U_{C_0}}{L \omega_0}. \quad (13)$$

Из (12) непосредственно вытекает, что при  $t = 0$ ,  $B = i_{L_0}$ . Тогда

$$i_L = \frac{U_{C_0}}{L \omega_0} \sin \omega_0 t + i_{L_0} \cos \omega_0 t. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (9), имеем

$$\begin{aligned} u_C &= U_{C_0} - \frac{U_{C_0}}{CL} \int_0^t \sin \omega_0 t dt - i_{L_0} \frac{1}{C} \int_0^t \cos \omega_0 t dt = \\ &= U_{C_0} - \frac{U_{C_0}}{CL} \left( -\cos \omega_0 t \right) \Big|_0^t - \frac{i_{L_0}}{C} \sin \omega_0 t \Big|_0^t = \\ &= U_{C_0} \cos \omega_0 t - \frac{i_{L_0}}{C} \sin \omega_0 t \end{aligned}$$

и при  $i_{L_0} = -I_0$

$$u_L = u_C = U_{C_0} \cos \omega t + I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega t. \quad (15)$$

Вводя в рассмотрение

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_{C_0}}{\sqrt{U_{C_0}^2 + I_0^2 \frac{L}{C}}} \text{ и } \sin \varphi_1 = \frac{I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}}{\sqrt{U_{C_0}^2 + I_0^2 \frac{L}{C}}},$$

выражение (15) можно записать в виде

$$u_L = u_C = \sqrt{U_{C_0}^2 + I_0^2 \frac{L}{C}} \cos(\omega t - \varphi_1). \quad (16)$$

Из (16) получаем максимальное напряжение для  $u_C$ :

$$U_{\max} = \sqrt{U_{C_0}^2 + I_0^2 \frac{L}{C}}. \quad (17)$$

Ввиду большой величины второго члена под знаком корня реальные напряжения за выключателем не достигают этих значений из-за повторного зажигания дуги в выключателе.

Затронем вопрос о компенсации реактивных токов в трехфазных системах, к которым относится и судовая электроэнергетическая система переменного тока. Теория вопроса освещена в [23–27], там же указаны и допустимые уровни коэффициентов искажения. В [23] изложен метод преобразования для нахождения компенсирующих токов в трехфазной системе<sup>1</sup>. Теория мощности и качества электроэнергии со сравнительным анализом известных оценок искажений синусоидальности дана в [3].

В работе [24] приведено выражение, связывающее полный коэффициент искажения синусоидальности по напряжению  $K_U\%$  с полной мощностью преобразователей электродвижения  $S_{\text{пр}}$

<sup>1</sup> В публикации [23] допущен ряд опечаток: в формуле (5) для  $i_{\text{кв}}$  перед дробью пропущен знак «минус»; ниже, на рисунке, стрелку между  $A$  и  $C$  следует дополнить обозначением  $U_{AC}$ ; на стр. 10 допущен повтор  $U_C^2$  в последней круглой скобке для  $F$ . В выражении для  $i_{\text{кв}}$  нужно убрать «минус» перед вторым знаком равенства. В (17) необходимо добавить «минус» после знака равенства, а также после последнего знака равенства в (17а). В выражениях (20) и (21) знак «минус» должен стоять после первых знаков равенства.

**Таблица.** Резонансные частоты системы при различных отношениях  $L_{\Gamma}/L$

**Table.** Resonant frequencies of system at different ratios  $L_{\Gamma}/L$

Отношение $L_{\Gamma}/L$	Резонансные (собственные) частоты в Гц	
	$f_{p1}$	$f_{p2}$
0,6	406,7	609,32
0,8	376,55	607,6
1,0	352,12	606,53
1,2	331,85	605,81
1,4	314,69	605,29

и с мощностью короткого замыкания генерирующей системы  $S_{\text{кз}}$  в виде

$$K_U \% = \frac{\sqrt{\left(\frac{5}{1}\right)^2 I_5^2 + \left(\frac{7}{1}\right)^2 I_7^2 + \left(\frac{11}{1}\right)^2 I_{11}^2 + \left(\frac{13}{1}\right)^2 I_{13}^2 + \dots}}{I_1} \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{кз}}} 100\%, \quad (18)$$

где  $I_{(n=5, 7, 11, 13, \dots)}$  – высшие гармоники токов с частотой  $\omega_{(n=5, 7, 11, 13, \dots)}$ ;  $I_1$  – действующее значение тока основной частоты.

Действительно, выражение (18) можно проиллюстрировать на следующем примере. Запишем коэффициент искажения синусоидальности для  $n$ -й гармоники:

$$\begin{aligned} U_n(\%) &= \frac{U_n}{U_1} 100 = \frac{I_n \cdot n L_{\Gamma} U_1}{U_1^2} 100 = \\ &= \frac{I_n}{I_1} 100 \frac{n L_{\Gamma} I_1 U_1}{U_1^2} = \frac{I_n}{I_1} 100 \frac{n}{1} \frac{3 U_1 L_{\Gamma} U_1}{3 U_1^2} = \\ &= I_n(\%) n \frac{3 U_1 I_1}{3 U_1^2 / L_{\Gamma}} = I_n(\%) n \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{кз}}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где предположено, что внутреннее сопротивление генератора является чисто индуктивным,  $S_{\text{пр}} = 3 U_1 I_1$  и  $S_{\text{кз}} = 3 U_1^2 / \omega_1 L_{\Gamma}$ .

Тогда можно найти резонансные частоты системы в соответствии с формулами (5) работы [27] при одновременном включении фильтров 11-й и 13-й гармоник в предположении, что индуктивности фильтров  $L$  выбраны одинаковыми. В таблице дано представление о резонансных частотах системы при различных отношениях  $L_{\Gamma}/L$ .



Трактовка мощности как антисимметричного тензора второго ранга дана в [28]. Расчет сил в конкретной ошиновке – в [29].

В заключение следует подчеркнуть, что предшествующий период ознаменовался новыми научными результатами, связанными с декомпозицией мощности, с определением электродинамических сил в токоведущих элементах, с исследованием компенсирующих устройств сложной конфигурации, с разработкой методов пассивной и активной компенсации как составной части общей проблемы обеспечения электромагнитной совместимости и качества электроэнергии в автономных системах.

Отметим еще два источника, имеющих прямое отношение к судовому оборудованию: разработанные в ЦНИИ СЭТ методические указания 78213-001-84 [30] и национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 54585-2011 [31]. В первом обосновывается параметр «переходное затухание» в качестве комплексного параметра влияния в судовых низкочастотных кабелях, а во втором указаны классы судового электрооборудования по способу защиты от поражения электрическим током и подробно сформулированы требования безопасности к судовому электрооборудованию и его частям. Подчеркнем, что на протяжении ряда лет в ЦНИИ СЭТ разрабатывались нагрузочные устройства переменного тока мощностью до 1250 кВт с водяным охлаждением и с коэффициентом мощности 0,7–0,9, нагрузочные устройства постоянного тока с воздушным охлаждением и нагрузочные устройства для испытаний источников повышенной частоты (400 Гц). Эти разработки, которые предварялись рядом расчетных и экспериментальных обоснований [32], нашли широкое применение в судостроении. Наконец, отметим публикацию автора [33], в которой рассмотрена современная теория полной мощности трехфазной системы в общем случае несинусоидального и несимметричного процесса.

## Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
2. Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов международной научно-практической конференции. 26–28 ноября 2014. М. МЭИ, 2014.
3. Цицикян Г.Н. Качество электроэнергии в автономных системах. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014.
4. Научно-технический сборник. Сер. Судостроительная промышленность. Судовая электротехника и связь. 1991. Вып. 15.
5. Граве В.Н., Романовский В.В., Ушаков В.М. Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электротехнических систем. Учебное пособие. СПб.: Элмор, 2003.
6. Кузнецов И.Ф., Цицикян Г.Н. Электродинамические усилия в токоведущих частях электрических аппаратов и токопроводах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
7. Цицикян Г.Н. Электродинамические силы в токоведущих частях электротехнических комплексов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016.
8. Цицикян Г.Н. Взаимная индуктивность коаксиальных контуров и их электродинамическое взаимодействие // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 70–75.
9. КЛГИ 360036.016. Порядок выбора конструкции судовых низкочастотных кабелей управления, контроля, связи. Методические указания. ЦНИИ СЭТ. Л., 1988.
10. Мусина Н.Ю., Цицикян Г.Н. Статистический анализ переходных затуханий в судовых кабелях // Вопросы судостроения. Сер. Судовая электротехника и связь. 1984. Вып. 41. С. 32–42.
11. Цицикян Г.Н. Нарушения поперечной симметрии, индуктивные сопротивления и взаимные влияния в судовых кабельных сетях. Обзоры по судостроительной технике. СПб.: ЦНИИ «Румб», 1991.
12. Цицикян Г.Н. Токи и напряжения при однофазных замыканиях в схеме электроснабжения судна с берега // Судостроительная промышленность. Сер. Судовая электротехника и связь. 1990. Вып. 14. С. 3–7.
13. Цицикян Г.Н. О взаимной индуктивности и электродинамических силах взаимодействия коаксиальных контуров // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 4.
14. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
15. Цицикян Г.Н. Взаимные индуктивности и силы взаимодействия соосных контуров, соленоидов и катушек // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 6. С. 90–99.
16. Антипов М.Ю., Цицикян Г.Н. Индуктивность прямоугольных контуров. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2016, №6, с. 17–21.

17. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. Автономные электро-энергетические системы. Вопросы электробезопасности и электромагнитной совместимости. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017.
18. Ежов В.В., Цицикян Г.Н. Определение вынуждающих сил при оценке виброактивности судовых шин проводов переменного тока // Судовая электротехника и связь. 1992. № 1(117). С. 35–45.
19. Цицикян Г.Н., Бобровников П.В. Об электродинамических силах между параллельными отрезками проводов с током // Электричество. 2016. № 11. С. 44–48.
20. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. К вопросу применения вакуумных коммутационных аппаратов в морской технике // Судостроение. 2018. № 3. С. 29–32.
21. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
22. Цицикян Г.Н. Изоляция и перенапряжения. Избранные главы письменных лекций. СПб.: СЗТУ, 2004.
23. Цицикян Г.Н. О методе преобразований для нахождения компенсирующих токов в трехфазной системе // Электричество. 2009. № 4. С. 8–13.
24. Байко А.В., Цицикян Г.Н., Сенченко А.И. Фильтр-компенсирующие устройства для судовых электро-энергетических систем с электродвижением // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 74(358). С. 167–182.
25. Цицикян Г.Н. Работы Кваде и некоторые замечания по понятиям электрической мощности // Электричество. 2000. № 8. С. 34–41.
26. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2. Ч. 11. СПб.: РМРС, 2017.
27. Цицикян Г.Н., Семенов М.Ю., Сенченко А.И. Резонансные частоты судовой электроэнергетической системы с двумя различными фильтр-компенсирующими устройствами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. № 2. С. 183–188.
28. Цицикян Г.Н., Баранов Ю.Д. Реактивная мощность трехфазной системы как антисимметричный тензор второго ранга // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 6. С. 72–78.
29. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. Электродинамические силы в ошиновке электротехнического оборудования автономных систем // Электротехника. 2018. № 4. С. 53–57.
30. Методические указания 78213-001-84. Проведение сравнительных испытаний на взаимные влияния в низкочастотных судовых кабельных линиях. СПб.: ЦНИИ СЭТ, 1985.
31. ГОСТ Р 54585-2011. Электрооборудование судовое. Требования безопасности, методы контроля и испытаний. М.: Стандартиформ, 2012.
32. ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Стандартиформ, 2009.
33. Цицикян Г.Н. Полная мощность трехфазной системы и стандарт IEEE 1459-2010 // Электричество. 2012. № 9. С. 65–70.

## References

1. GOST 32144-2013. Electric power. Electromagnetic compatibility of equipment. Power quality requirements for general-purpose power supply systems. Moscow, Standartinform, 2014 (*in Russian*).
2. Quality management of electric power. Compendium of papers. International scientific & practical conference. November 26-28, 2014. Moscow, Power Engineering Institute, 2014 (*in Russian*).
3. Tsitsikyan G. Power quality in autonomous systems. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2014 (*in Russian*).
4. Collection of scientific & technical papers. Shipbuilding series. Marine electrics and communications. 1991, Issue 15 (*in Russian*).
5. Grave V., Romanovsky V., Ushakov V. Electric fire safety of high-voltage marine power systems. St. Petersburg, Elmor, 2003 (*in Russian*).
6. Kuznetsov I., Tsitsikyan G. Electrodynamics forces in live parts of electric engineering systems. St. Petersburg, KSRC, 2016 (*in Russian*).
7. Tsitsikyan G. Electrodynamics forces in live parts of electric engineering systems. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2016 (*in Russian*).
8. Tsitsikyan G. Mutual inductance of coaxial circuits and their electrodynamic interaction // Transactions of the Krylov State Research Centre. Issue 2(384). P. 70–75 (*in Russian*).
9. Regulatory Document KLG1 360036.016. Design selection procedure for low-frequency marine command, control and communication cables. Methodical Guidelines, SET Institute, Leningrad 1988 (*in Russian*).
10. Musina N., Tsitsikyan G. Statistical analysis of coupling losses in ship cables // Shipbuilding matters. Marine electrics and communications. 1984. Issue 41. P. 32–42 (*in Russian*).
11. Tsitsikyan G. Deviations from transverse symmetry, inductive resistances and mutual effects in marine cable networks. Shipbuilding reviews. St. Petersburg, Rumb Research Institute, 1991 (*in Russian*).
12. Tsitsikyan G. Currents and voltages in single-phase shorts in shore-based power supply networks // Shipbuilding industry. Marine electrics and communications. 1990. Issue 14. P. 3–7 (*in Russian*).

13. *Tsitsikyan G.* On mutual inductance and electrodynamic interaction forces of coaxial circuits // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power engineering. 2018. No. 4 (*in Russian*).
14. *Kalantarov P., Tseitlin L.* Calculation of inductances. Reference book. Leningrad, Energoatomizdat, 1986 (*in Russian*).
15. *Tsitsikyan G.* Mutual inductances and interaction forces of coaxial circuits, solenoids and coils // USSR Academy of Sciences. Izvestiya. Power engineering and transport. 1985. No. 6. P. 90–99 (*in Russian*).
16. *Antipov M., Tsitsikyan G.* Inductance of rectangular circuits. Bulletin of Russian universities. Radioelectronics. 2016. No. 6. P. 17–21 (*in Russian*).
17. *Tsitsikyan G., Antipov M.* Autonomous electric power systems. Safety and electromagnetic compatibility. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2017 (*in Russian*).
18. *Yezhov V., Tsitsikyan G.* Determination of exciting forces in vibroactivity assessment of marine AC busbars // Sudovaya elektrotekhnika i svyaz (Marine electrics and communications). 1992. No. 1(117). P. 35–45 (*in Russian*).
19. *Tsitsikyan G., Bobrovnikov P.* On electrodynamic forces between parallel live wires // Electrichestvo (Electricity), 2016. No. 11. P. 44–48 (*in Russian*).
20. *Tsitsikyan G., Antipov M.* On marine applications of vacuum commutation devices // Sudostroenie (Shipbuilding). 2018. No. 3. P. 29–32 (*in Russian*).
21. *Bazutkin V., Larionov V., Pintal Yu.* High-voltage equipment. Isolation and over-voltages in electric systems. Moscow, Energoatomizdat, 1986 (*in Russian*).
22. *Tsitsikyan G.* Isolation and over-voltages. Selected chapters from written lectures. St. Petersburg, North-West Technical University, 2004 (*in Russian*).
23. *Tsitsikyan G.* On transformation method for calculation of compensating currents in three-phase system // Electrichestvo (Electricity). No. 4. P. 8–13 (*in Russian*).
24. *Bayko A., Tsitsikyan G., Senchenko A.* Filter-compensating devices for power systems of ships with electric propulsion // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 74(358). P. 167–182 (*in Russian*).
25. *Tsitsikyan G.* Publications of Quade and certain remarks on the notions of electric power // Electrichestvo (Electricity). 2000. No. 8. P. 34–41 (*in Russian*).
26. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Vol. 2, Part 11. St. Petersburg, RS, 2017 (*in Russian*).
27. *Tsitsikyan G., Semenov M., Senchenko A.* Resonant frequencies of marine electric power system with two different filter-compensating devices // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. No. 2. P. 183–188 (*in Russian*).
28. *Tsitsikyan G., Baranov Yu.* Reactive power of three-phase system as 2<sup>nd</sup> rank anti-symmetric tensor // Bulletin of Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2015. No. 6. P. 72–78 (*in Russian*).
29. *Tsitsikyan G., Antipov M.* Electrodynamic problems in the busbars of electrotechnical equipment of autonomous systems // Russian Electrical Engineering. 2018. No. 4. P. 53–57 (*in Russian*).
30. Methodical Guidelines 78213-001-84. Comparative mutual interference tests of marine low-frequency cables. St. Petersburg, SET Research Institute, 1985 (*in Russian*).
31. GOST R 54585-2011. Marine electric equipment. Safety requirements. Control and testing methods. Moscow, Standartinform, 2012 (*in Russian*).
32. GOST R 51317.4.30-2008. Power quality measurement methods. Moscow, Standartinform, 2009 (*in Russian*).
33. *Tsitsikyan G.* Total power of three-phase system and IEEE 1459-2010 standard // Electrichestvo (Electricity). 2012. No. 9. P. 65–70 (*in Russian*).

#### Сведения об авторе

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: George20021940@mail.ru.

#### About the author

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, SET Branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: George20021940@mail.ru.

Поступила / Received: 31.09.18  
Принята в печать / Accepted: 29.01.19  
© Цицикян Г.Н., 2019