

УДК 621.317.333:629.5

Контроль сопротивления изоляции судовых электроэнергетических систем с применением теории массового обслуживания

Ю. В. Матвеев

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3989-2128>, e-mail: yuriy-radio@mail.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
06.11.2019;
получена
после доработки
06.12.2019

Контроль сопротивления электрической изоляции является одним из важных параметров, характеризующих надежность работы судовой электроэнергетической системы и безопасность ее эксплуатации. Значительная часть неисправностей и отказов в работе элементов судовой электроэнергетической системы связана со снижением электрического сопротивления изоляции относительно корпуса судна, обусловленным воздействием повышенной влажности и температуры, а также механических повреждений изоляционного слоя электрических кабелей, проводов, обмоток электрических машин и аппаратов. Правилами технической эксплуатации установлены наименьшие значения сопротивления изоляции элементов судовой электроэнергетической системы относительно корпуса судна. В то же время наличие на судне сильно разветвленных электрических сетей усложняет задачу централизованного и локализованного контроля сопротивления изоляции. Кроме того, увеличение количества электростанций, возможное изменение количества одновременно работающих потребителей в энергосистеме, а также увеличение доли высоковольтного электрооборудования на судне требуют более надежной системы контроля сопротивления электрической изоляции. Автор приходит к выводу, что для обеспечения более надежного контроля сопротивления изоляции элементов судовой электроэнергетической системы представляется актуальным использовать дополнительно новые принципы и методы по управлению системой контроля и обработке измерительной информации, отличающиеся от принятых традиционно при построении таких систем. С этой целью, а также для улучшения характеристик системы контроля сопротивления изоляции электроэнергетической системы в работе предложено применить теорию массового обслуживания с оценкой ее параметров. Наличие на судне системы непрерывного автоматического контроля сопротивления изоляции является важной составляющей, обеспечивающей надежность и безопасность эксплуатации судна его экипажем.

Ключевые слова:

безопасность,
контроль,
измерение,
сопротивление
изоляции, система
массового
обслуживания,
судовая
электроэнергетическая
система

Для цитирования

Матвеев Ю. В. Контроль сопротивления изоляции судовых электроэнергетических систем с применением теории массового обслуживания. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 496–502. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-496-502.

Insulation resistance monitoring of ship electrical systems using queuing theory

Yuri V. Matveev

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3989-2128>, e-mail: yuriy-radio@mail.ru

Article info

Received
06.11.2019;
received in revised
06.12.2019

Abstract

The control of electrical insulation resistance is one of the important parameters characterizing the reliability of the ship's electric power system and the safety of its operation. A significant part of the faults and failures of elements of the shipboard power system is associated with reducing insulation electric resistance relative to the ship hull due to exposure to high humidity and temperature, and also mechanical damage of the insulating layer, electrical cables, wires, electrical machines and devices. The rules of technical operation establish the lowest values of insulation resistance of the elements of the ship's electric power system relative to the hull. At the same time, the presence of highly branched electrical networks on the ship complicates the task of centralized and localized control of insulation resistance. In addition, the increase in the number of power plants, possible change of the number of concurrent consumers in the power system, as well as increasing the share of high-voltage electrical equipment on the ship requires a more reliable control system of electrical insulation resistance. The author concludes that to ensure more reliable monitoring of insulation resistance of ship power system elements it seems relevant to use additionally new principles and methods for controlling the measurement information in the monitoring system and processing it, which differ from those traditionally used in the construction of such systems. For this purpose, as well as to improve the characteristics of the insulation resistance control system of the electric power system, it has been proposed to apply the Queuing theory with the assessment of its parameters. The presence on the vessel of a system of continuous automatic control of insulation resistance is an important component that ensures the reliability and safety of operation of the vessel by its crew.

Key words:

safety,
control,
measurement,
insulation resistance,
queuing system,
ship electric
power system

For citation

Matveev, Yu. V. 2019. Insulation resistance monitoring of ship electrical systems using queuing theory. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 496–502. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-496-502.

Введение

Важными факторами при эксплуатации судовой электроэнергетической системы являются обеспечение ее надежности в работе и безопасность экипажа. С этой целью необходимо следить за состоянием сопротивления изоляции электрических силовых кабелей, машин, аппаратов и другого оборудования (Власов, 2008).

Российский морской регистр судоходства определил нормы сопротивления изоляции элементов судовой электроэнергетической системы (Головки, 2009; Жуков и др., 2002).

Несоблюдение правил измерения и контроля сопротивления электрической изоляции может привести к возникновению коротких замыканий, пожарам и увеличить опасность поражения людей электрическим током.

В то же время наличие на судне большого количества электрических генераторов и потребителей требует не только качественного измерения и контроля значений электрического сопротивления изоляции элементов судовой электроэнергетической системы, но и решения задачи приоритетного подключения средств контроля и измерения сопротивления изоляции к объектам данных измерений и контроля, а также приоритетной оценки этих значений за определенное время (Кузнецов и др., 2016).

Однако на процесс контроля сопротивления изоляции влияет ряд случайных факторов (возмущений), связанных с возможным параллельным подключением приборов контроля сопротивления изоляции, окружающей средой, деятельностью человека и др.

Из теории вероятности известно, что в системе S будет протекать случайный процесс, если состояния системы изменяются случайным образом. До тех пор, пока эти случайные возмущения являются несущественными, ими можно в определенной степени пренебречь и в результате считать, что процесс является неслучайным или детерминированным. В последнем случае для описания характеристик процесса можно применить детерминированную математическую модель, отражающую процесс с позиций полной определенности в настоящем и будущем (Матвеев, 2019). Если учитывать влияние случайных факторов на процесс и оценивать его будущее состояние с вероятностной точки зрения, то здесь следует уже применять вероятностную математическую модель (Артемьев и др., 2015).

В таких условиях влияние всех вышеназванных факторов на работу системы контроля сопротивления изоляции судовой электроэнергетической системы требует применения более сложных алгоритмов и методов с целью обработки измерительной информации, поступающей с приборов контроля сопротивления изоляции электрооборудования, а также управления этими приборами.

Одним из целесообразных решений такой задачи может быть применение систем массового обслуживания (СМО). Подобные системы нашли широкое применение для управления технологическими процессами в различных областях техники, но в судовой электроэнергетике, по мнению автора статьи, еще не исследованы.

Целью исследования является определение основных параметров работы СМО в системе контроля электрического сопротивления изоляции судового электрооборудования.

Методы исследования

В работе применен анализ модели процедуры обработки измерительной информации с приборов контроля сопротивления изоляции. При таких условиях для исследования модели можно дополнительно применить имитационный метод. При имитационном методе элементы системы и процессы функционирования системы во времени представляются в виде алгоритмов. В этом случае получают значения требуемых величин с любой заданной точностью для любого момента функционирования модели и исследуемой системы. В результате можно прогнозировать развитие процесса.

В практических ситуациях на судне и в условиях возможного случайного изменения сопротивления изоляции электрооборудования возникают задачи приоритетного контроля сопротивления изоляции с помощью приборов. С этой целью в статье используется теория СМО, функционирующих в режиме с относительными приоритетами без прерывания.

Результаты и обсуждение

СМО состоит из двух типов объектов: заявок (объектов, которые нуждаются в обслуживании) и обслуживающих приборов. В данном случае в качестве объектов выступают элементы судовой электроэнергетической системы, а в качестве обслуживающих приборов – приборы контроля сопротивления изоляции.

В СМО такие запросы (заявки) обычно называются требованиями. Приоритеты требований характеризуются целыми числами, причем более высокому приоритету соответствует меньшее число. Если приоритеты учитываются только в момент выбора требования, то они называются относительными.

Требованиям присваиваются заданные относительные приоритеты. В очереди требования упорядочены по времени поступления и приоритету (Беллами, 1986).

Количество заявок, которое одновременно допустимо в одном обслуживающем приборе, составляет канальность обслуживающего прибора. В результате большого количества заявок, ожидающих обслуживания, создается так называемая очередь. На рис. 1 изображена общая схема СМО.

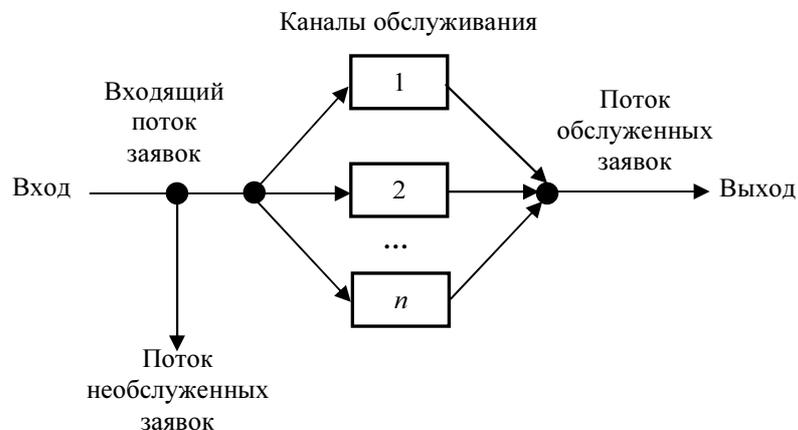


Рис. 1. Общая схема СМО

Fig. 1. General scheme of queuing systems (QS)

По дисциплине обслуживания СМО подразделяют на три класса:

- с отказами;
- с очередью (ожиданием);
- смешанного типа.

В СМО заявка первого типа, поступившая на вход системы в случае, когда все каналы заняты, получает "отказ" и попадает в поток необслуженных заявок. С позиции теории вероятности поток – это последовательность событий, наступающих одно за другим.

По теории вероятности события можно считать однородными, если они различаются только по моментам времени их наступления. Кроме того, поток событий будет потоком без последствия (или без памяти), если для любой пары непересекающихся промежутков времени число событий за один из этих промежутков не зависит от числа событий за другой. В случае если вероятность наступления за достаточно малый промежуток времени более одного события пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью наступления одного события за этот промежуток, такой поток событий называется ординарным (Ремизкая и др., 2007). Другим параметром потока является стационарность. Поток событий является стационарным, если вероятность наступления какого-либо числа событий за некоторый промежуток времени зависит только от длины этого промежутка и не зависит от момента его начала.

В СМО с очередью (или ожиданием) заявка, поступившая в момент занятости всех каналов, ожидает свободный канал, который ее обслужит.

В СМО третьего типа заявка пребывает в очереди с ограничением по времени. Существуют и другие разновидности СМО. Однако в дальнейшем будет рассматриваться СМО второго типа, так как все заявки на измерение и контроль сопротивления изоляции должны обслуживаться соответствующими средствами без их потерь, поскольку в противном случае теряет смысл использования такой СМО.

Для облегчения анализа работы СМО примем, что данный процесс является марковским. Случайный процесс, протекающий в системе, называется марковским, если для любого момента времени вероятностные характеристики процесса в будущем зависят только от его состояния в данный момент и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние.

Имеют место два вида марковских процессов:

- с дискретным состоянием, если его возможные состояния S_1, S_2, \dots, S_n можно заранее определить, и переход системы из одного состояния в другое происходит "скачком", практически мгновенно;
- с непрерывным временем, если моменты возможных переходов из одного состояния в другое не фиксированы заранее, а неопределены, случайны и могут произойти в любой момент.

Марковские процессы можно задавать двумя способами:

- с помощью графа;
- с помощью матриц вероятностей переходов.

Результирующая средняя продолжительность пребывания заявки в очереди составит

$$W_q = L_q / \lambda = \rho / (\mu(1 - \rho)).$$

На рис. 3 изображена схема обработки требований в системе контроля сопротивления изоляции при использовании относительных приоритетов без прерывания обслуживания.

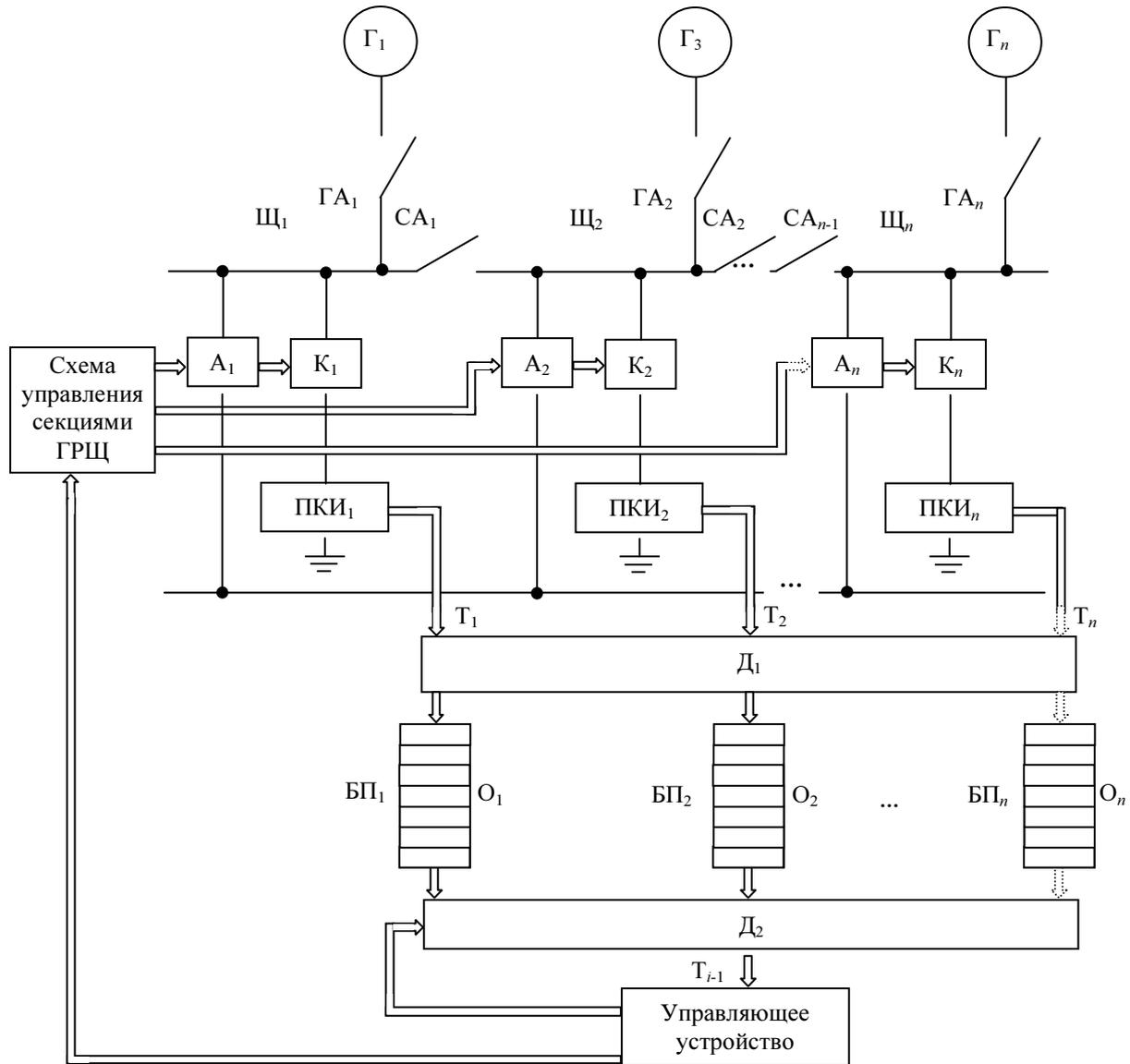


Рис. 3. Схема обработки требований в системе контроля сопротивления изоляции при использовании относительных приоритетов

Fig. 3. Requirements processing scheme in the insulation resistance control system using relative priorities

Рассмотрим алгоритм работы системы контроля сопротивления изоляции судовой электроэнергетической системы, содержащей: генераторы ($\Gamma_1 - \Gamma_n$), секции главного распределительного щита ($\Psi_1 - \Psi_n$), генераторные автоматы ($\Gamma A_1 - \Gamma A_n$), секционные автоматы ($CA_1 - CA_{n-1}$), приборы контроля изоляции ($ПКИ_1 - ПКИ_n$). Приборы ПКИ подключаются к секциям главного распределительного щита (ГРЩ) с помощью коммутаторов ($K_1 - K_n$), управляемых соответствующими блоками анализа ($A_1 - A_n$), которые находятся под контролем схемы управления секциями ГРЩ. Приоритеты измерения сопротивления изоляции определяются управляющим устройством. Например, генератор Γ_1 может быть основным, а генератор Γ_2 – резервным.

При использовании относительных приоритетов обработка требований организуется следующим образом. Результаты измерений сопротивлений изоляции в цифровом виде (требования T_1, T_2, \dots, T_n) от ПКИ поступают на вход блока, называемого диспетчером D_1 , который формирует очереди O_1, O_2, \dots, O_n в блоках памяти ($БП_1 - БП_n$). Требованиям присваиваются заданные поставщиком относительные приоритеты. В очереди требования упорядочены по времени поступления и по приоритету. В том случае, когда

управляющее устройство заканчивает ранее начатое обслуживание по измерениям, управление передается программе, формируемой диспетчером D_2 , причем последний выбирает на обслуживание требование с наивысшим приоритетом, например T_{i-1} , если очереди O_1, O_2, \dots, O_{i-1} не содержат требований. В результате выбранное требование попадает в управляющее устройство на все время обслуживания. Управление секциями ГРЩ осуществляется по команде с управляющего устройства на схему управления секциями ГРЩ. По окончании процесса измерения сопротивления изоляции всех требуемых устройств процесс повторяется по тому же алгоритму с выбранными приоритетами.

В качестве примера сделаем приближенный расчет параметров одноканальной СМО ($N = 1$), обозначаемой как $M/M/1$, предназначенной для работы в судовой системе контроля сопротивления изоляции в целях качественной обработки цифровой измерительной информации, поступающей с приборов контроля. Для примера, в качестве "пакета" цифровой измерительной информации примем значение цифрового кода длиной 60 бит, соответствующего 5 приборам контроля ($n = 5$) с 12-ю разрядами цифрового кода (без учета дополнительных разрядов). Примем значение интенсивности (скорости) потока данных $\lambda = 10$ бит/с. Для обеспечения стационарности функционирования СМО коэффициент ее использования ρ должен быть меньше 1. Результаты расчетов параметров СМО $M/M/1$ процесса измерения и контроля сопротивления изоляции приведены в таблице.

Таблица. Параметры СМО $M/M/1$ процесса измерения и контроля сопротивления изоляции
Table. Parameters of the QS $M/M/1$ of the process of measurement and control of insulation resistance

λ , бит/с	ρ	μ , бит/с	P_5	L_s	W_s , с	L_q	W_q , с
10	0,5	20	$1,56 \cdot 10^{-2}$	1,0	0,1	0,5	0,05
	0,6	16,6	$3,11 \cdot 10^{-2}$	1,5	0,15	0,9	0,09
	0,7	14,3	$5,04 \cdot 10^{-2}$	2,3	0,23	1,6	0,16
	0,8	12,5	$6,55 \cdot 10^{-2}$	4,0	0,4	3,2	0,32
	0,9	11,1	$5,9 \cdot 10^{-2}$	9,0	0,9	8,1	0,81

Из анализа таблицы можно сделать вывод, что для улучшения работы системы необходимо стремиться к близким значениям скоростей передачи измерительной информации (λ) и ее обработки (μ), при этом коэффициент загрузки ρ СМО будет максимальным.

Заключение

Ввиду сложности и значимости системы контроля сопротивления изоляции судовой электроэнергетической системы можно в ее системе управления и обработки измерительной информации применить теорию массового обслуживания. Задачами дальнейших исследований следует считать рассмотрение СМО применительно к системам контроля сопротивления изоляции с приоритетами и дообслуживанием.

Библиографический список

- Артемьев А. В., Воробьев В. В., Горшков А. А., Перечесов В. С. Методы автоматического контроля сопротивления изоляции сетей двойного рода тока с изолированной нейтралью // Морские интеллектуальные технологии. 2015. № 1–3 (29). С. 126–131.
- Беллами Дж. Цифровая телефония. М.: Радио и связь, 1986. 544 с.
- Власов А. Б. Исследование изоляции судовых электрических машин в процессе эксплуатации и судоремонта // Вестник МГТУ. 2008. Т. 11, № 3. С. 475–482.
- Головкин С. В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 90–95.
- Жуков В. А., Косицын В. В., Шаталов В. В. Обобщение опыта повышения сопротивления электрической изоляции судового оборудования // Вологдинские чтения. 2002. № 28. С. 37–38.
- Кузнецов С. Е., Кудрявцев Ю. В. Диагностирование изоляции судового высоковольтного электрооборудования в процессе эксплуатации // Сб. науч. трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. С. 183–190.
- Матвеев Ю. В. Измерение сопротивления изоляции судового электрооборудования // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. Iss. 15. P. 90–93. DOI: <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-90-93>.
- Ремницкая А. Я., Суслина И. А. Марковские процессы и простейшие модели теории массового обслуживания. Компьютерное моделирование простейших моделей массового обслуживания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 38. С. 239–248.

References

- Artemyev, A. V., Vorobiev, V. V., Gorshkov, A. A., Perechessov, V. S. 2015. Methods of automatic control of insulation resistance of double-rod current networks with isolated neutral. *Marine intelligent technologies*, 1–3(29), pp. 126–131. (In Russ.)
- Bellamy, J. 1986. Digital telephony. Moscow. (In Russ.)
- Vlasov, A. B. 2008. The study of insulation of ship electrical machines in the process of operation and ship repair. *Vestnik of MSTU*, 11(3), pp. 475–482. (In Russ.)
- Golovko, S. V. 2009. Diagnostics of technical condition of ship electrical equipment on the basis of data mining. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2, pp. 90–95. (In Russ.)
- Zhukov, V. A., Kositsyn, V. V., Shatalov, V. V. 2002. Generalization of the experience of increasing the electrical insulation resistance of ship equipment. *Vologdinskie chteniya*, 28, pp. 37–38. (In Russ.)
- Kuznetsov, S. E., Kudryavtsev, Yu. V. 2016. Diagnostics of isolation of ship high-voltage electrical equipment in the process of operation. In coll. articles *Proceedings of the faculty of the Admiral Makarov State University of the Sea and River Fleet*, pp. 183–190. (In Russ.)
- Matveev, Yu. V. 2019. The measurement of insulation resistance of ship electrical equipment. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 15, pp. 90–93. DOI: <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-90-93>. (In Russ.)
- Remitskaya, A. Ya., Suslina, I. A. 2007. Markov processes and simple models of queueing theory. Computer modeling of the simplest models of Queuing. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 38, pp. 239–248. (In Russ.)

Сведения об авторе

Матвеев Юрий Валентинович – ул. Окружная, д. 41, г. Севастополь, Россия, 299023; Севастопольский государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: yuriy-radio@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3989-2128>

Yuri V. Matveev – 41 Okruzhnaya Str., Sevastopol, Russia, 299023; Sevastopol State University, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: yuriy-radio@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3989-2128>