

Д.А. Певнев, Л.Р. Токаев, А.Ю. Малков, С.Ч. Тюгай
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Россия

СПОСОБ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕСТА СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

В процессе эксплуатации объекта, например кабельной многовитковой обмотки размагничивания судна, состоящей из последовательно соединенных витков, может произойти локальное снижение ее сопротивления изоляции. Поиск места снижения сопротивления изоляции традиционными способами сопряжен с трудоемкими и длительными действиями по обходу (обследованию) кабелей обмотки, зачастую пролегающих в труднодоступных местах, с последовательным отключением участков кабелей и замером их сопротивления изоляции в предварительно вскрытых соединительных коробках обесточенной обмотки. Поэтому становится весьма актуальной разработка способа дистанционного установления места снижения сопротивления изоляции обмотки, находящейся под рабочим напряжением, со щита ее питания, без изменения режима работы обмотки размагничивания, являющейся элементом защиты судна, и без ухудшения безопасности ее эксплуатации, а также выполнение минимального количества измерений минимальным числом штатных измерительных средств с малыми временными затратами.

Ключевые слова: сопротивление изоляции, многовитковая обмотка судна, способ измерения сопротивления, электрическая корабельная сеть.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

D. Pevnev, L. Tokaev, A. Malkov, S. Tyugay
N.G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia

DETECTION METHOD FOR POOR-ISOLATION PLACES

Some technical objects, e.g. ship degaussing coils made up by serially connected turns may suffer local deterioration of their isolation resistance due to operational wear. Presently, finding the locations of these defects is a tedious and time-consuming task virtually reduced to physical inspection, i.e. visual examination, of coiling cables (frequently installed in places not readily accessible), when cable stretches are one by one disconnected and subjected to resistance measurements in the connection boxes of dead coiling opened in advance. Therefore, it becomes a relevant task to develop a method for remote (i.e. from switch-board) detection of poor isolation places in degaussing coils without blacking them out (because they play an important part in protection of the whole ship) and without prejudice to the safety of their operation. This method must also rely on the minimum possible number of measurements and the minimum possible scope of instrumentation, and the measurement process itself must be the fastest possible

Keywords: isolation resistance, multi-turn coils, resistance measurement methods, electric network of ship.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Внедрение новых технологий и разработок в области военного кораблестроения и вооружения является одним из приоритетных направлений государственной политики в области военно-морской деятельности [1, 2].

В данной статье предлагается, теоретически и практически обосновывается новый способ дистанционного установления места снижения сопротивления изоляции многовитковой обмотки судна без снятия с нее напряжения и снижения безопас-

Для цитирования: Певнев Д.А., Токаев Л.Р., Малков А.Ю., Тюгай С.Ч. Способ установления места снижения сопротивления изоляции. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; Специальный выпуск 2: 219–224.

For citations: Pevnev D.A., Tokaev L.R., Malkov A.Yu., Tyugay S.Ch. Detection method for poor-isolation places. Transactions of the Krylov State Research Center. 2019; Special Edition 2: 219–224 (in Russian).

ности эксплуатации. Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие способы контроля сопротивления изоляции и определения места утечки имеют следующие недостатки [3]:

- необходимость снятия напряжения с объекта контроля;
- использование дополнительного оборудования и аппаратуры;
- привлечение дополнительного личного состава;
- необходимость поочередного шунтирования амперметром элементов системы;
- избыточное количество измерений параметров и используемых для этого приборов;
- сложная методика поиска неисправности.

Таким образом, поиск места снижения сопротивления изоляции традиционными способами сопряжен с трудоемкими и длительными действиями по обходу кабелей обмотки, зачастую пролегающих в труднодоступных местах, с последовательным отключением участков кабелей и замером их сопротивления изоляции в предварительно вскрытых соединительных коробках обесточенной обмотки и многими другими трудностями [4].

Предлагаемый способ позволяет дистанционно устанавливать места снижения сопротивления изоляции обмотки, находящейся под рабочим напряжением, со щита ее питания, без изменения режима работы обмотки размагничивания, являющейся элементом защиты судна, и без ухудшения безопасности ее эксплуатации [5], а также выполнять

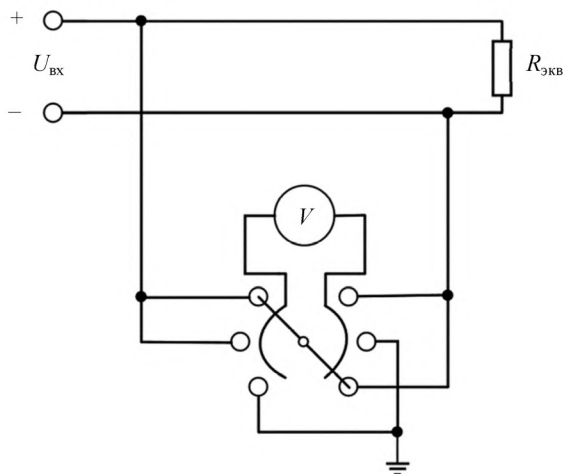


Рис. 1. Измерение сопротивления изоляции сети постоянного тока под напряжением путем трех отсчетов вольтметра

Fig. 1. Isolation measurements on live DC grid by means of three volt meter readings

минимальное количество измерений минимальным числом штатных измерительных средств с минимальными временными затратами.

Данный способ реализуется посредством выполнения следующих операций.

1. Измерение сопротивления изоляции. Для этого необходимо снять три отсчета по вольтметру (рис. 1):

- величины напряжения сети $U_{ВХ}$, В;
- величины напряжения между положительным полюсом сети и корпусом U_+ , В;
- величины напряжения между отрицательным полюсом сети и корпусом U_- , В.

2. Расчет сопротивления изоляции:

$$r_{из} = \frac{U_{ВХ} - U_+ - U_-}{U_+ + U_-} \cdot r_V, \quad (1)$$

где r_V – внутреннее сопротивление вольтметра, МОм

Сопротивление витка обмотки значительно меньше сопротивления исправной изоляции витка, поэтому для узловой точки N_0 схемы замещения обмотки, изображенной на рис. 2а, и ее изоляции справедливо выражение, следующее из первого закона Кирхгофа:

$$\sum_{i=n+1}^{i=N} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i} + \frac{\Delta\varphi_N}{r_V} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=n+1}^{i=N} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i} + \frac{\Delta\varphi_N}{r_V} - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i} + \frac{\Delta\varphi_y}{\Delta r_y} = 0, \quad (3)$$

где r_i – сопротивление витка многовитковой обмотки корабля (судна), МОм; $\Delta\varphi_i$ – разность потенциалов между витком и корпусом корабля (судна), В; N – общее количество витков; n – номер узла, для которого записан закон Кирхгофа; Δr_y – сопротивления пути утечки через изоляцию; $\Delta\varphi_y$ – разности потенциалов токовой утечки через изоляцию.

3. Вычисление величины сопротивления пути утечки через изоляцию:

$$\Delta r_y = \frac{r_{из0} \cdot r_{из1}}{r_{из0} - r_{из1}}, \quad (4)$$

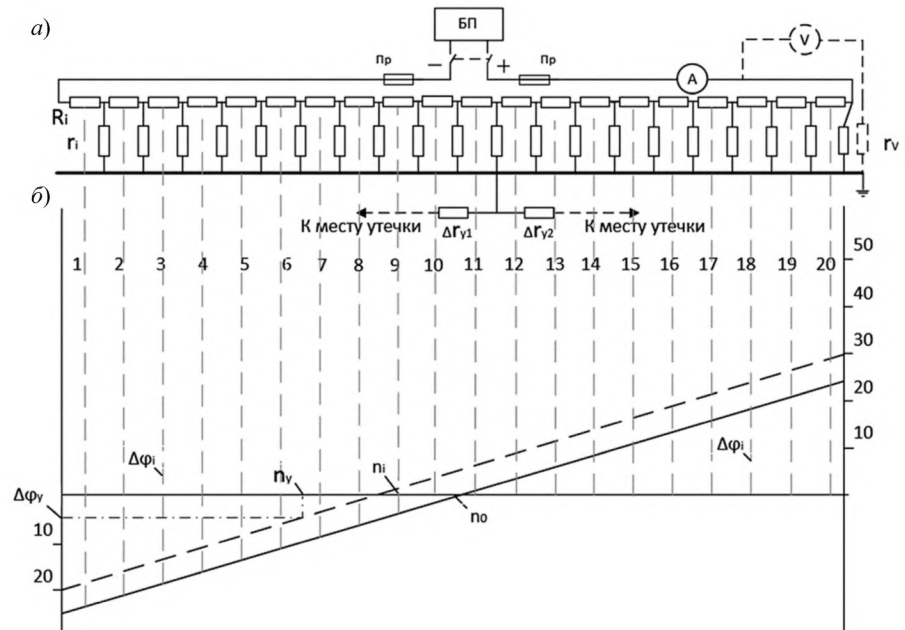
где $r_{из0}$ и $r_{из1}$ – общее сопротивление изоляции многовитковой обмотки корабля (судна) до и после утечки соответственно, МОм.

4. Определение значения разности потенциалов утечки через изоляцию:

$$\Delta\varphi_y = \left(\sum_{i=n+1}^{i=N} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i} - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta\varphi_i}{r_i} + \frac{\Delta\varphi_N}{r_V} \right) \cdot \Delta r_y. \quad (5)$$

Рис. 2. Схема замещения многовитковой обмотки корабля (судна) (а) и диаграмма разностей потенциалов участков многовитковой обмотки корабля (судна) относительно корпуса (б)

Fig. 2. Substitution layout for multi-turn coil of ship (а) and voltage diagram for specific stretches of multi-turn coil with respect to hull (б)



5. Посредством диаграммы, изображенной на рис. 2б, определяем номер витка n_{yt} , на котором произошло снижение сопротивления изоляции. Здесь, вертикальная ось – ось падений напряжения, горизонтальная ось – порядковые номера витков многовитковой обмотки. Таким образом, найденной величине $\Delta\phi_y$ будет соответствовать номер витка, значение сопротивления изоляции которого снизилось.

С целью практического обоснования эффективности способа была создана экспериментальная установка, позволяющая имитировать снижение сопротивления изоляции различной величины и в различных местах, а также измерять параметры, необходимые для определения места снижения сопротивления изоляции без снятия рабочего напряжения (рис. 3).

В исходном режиме работы корабельного устройства постоянного тока с последовательно соединенными элементами сопротивления Δr_{y1} и Δr_{y2} , имитирующие утечки (неисправности), находятся в выведенном состоянии (значения их сопротивлений максимальны). При подключении схемы к блоку питания под напряжение 50 В по цепи «клемма «+» → резисторы R_i → клемма «-» протекает ток нагрузки. Параллельно этой цепи от клемм обмотки с положительными потенциалами на корпус и от корпуса к клеммам с отрицательными потенциалами протекают токи утечки через сопротивление изоляции элементов (через резисто-

ры r_i). Описанным ранее методом трех отсчетов вольтметра выполняются измерения необходимых величин и расчет сопротивления изоляции устройства $r_{из0}$ в исходном режиме его работы.

Для введения первой утечки, имитирующей появление неисправности изоляции, регулируемым сопротивлением Δr_{y1} устанавливается определенная величина утечки. Затем заново выполняются три

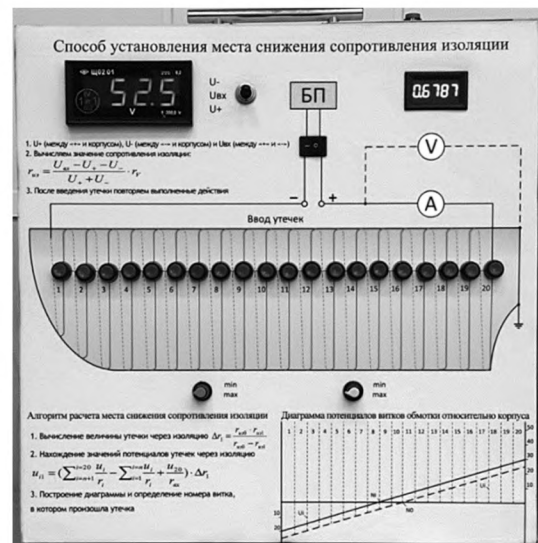


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки
Fig. 3. General view of test rig

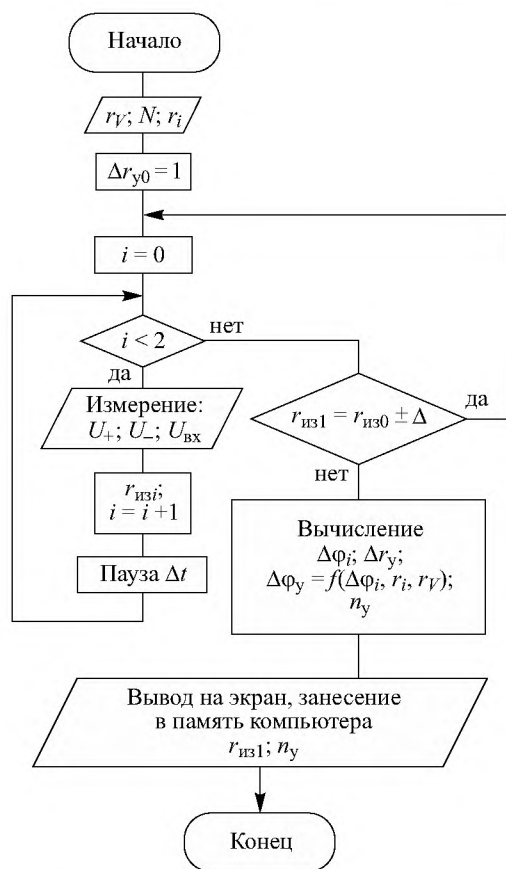


Рис. 4. Блок-схема программы по расчету сопротивления изоляции и определению места утечки

Fig. 4. Flow chart of the software for isolation resistance calculation and leakage location

измерения вольтметром, необходимые для нахождения величины сопротивления изоляции. По измеренным величинам вычисляется новое значение сопротивления изоляции устройства $r_{из1}$ и определяется место снижения сопротивления изоляции предлагаемым способом, описанным ранее.

Для введения второй утечки, имитирующей появление последующих неисправностей изоляции, регулируемым сопротивлением Δr_{y2} устанавливается определенная величина утечки. Далее выполняются действия, аналогичные действиям при нахождении первой утечки. Особенностью определения места снижения сопротивления изоляции после ввода второй и последующих утечек является то, что при расчете следует учитывать наличие предыдущих утечек.

С целью автоматизации расчета сопротивления изоляции и установления места утечки была разработана программа, которая в качестве исходных данных использует величины измеренных напряжений, внутреннее сопротивление измерительного прибора и общее количество витков в многovitковой обмотке корабля (судна). Принцип работы программы описывается блок-схемой, приведенной на рис. 4.

Использование для расчета экспериментальных данных приводит к возникновению погрешности Δ , обусловленной наличием контактных сопротивлений схемы, погрешностью измерительных приборов, нагревом элементов схемы в процессе эксплуатации.

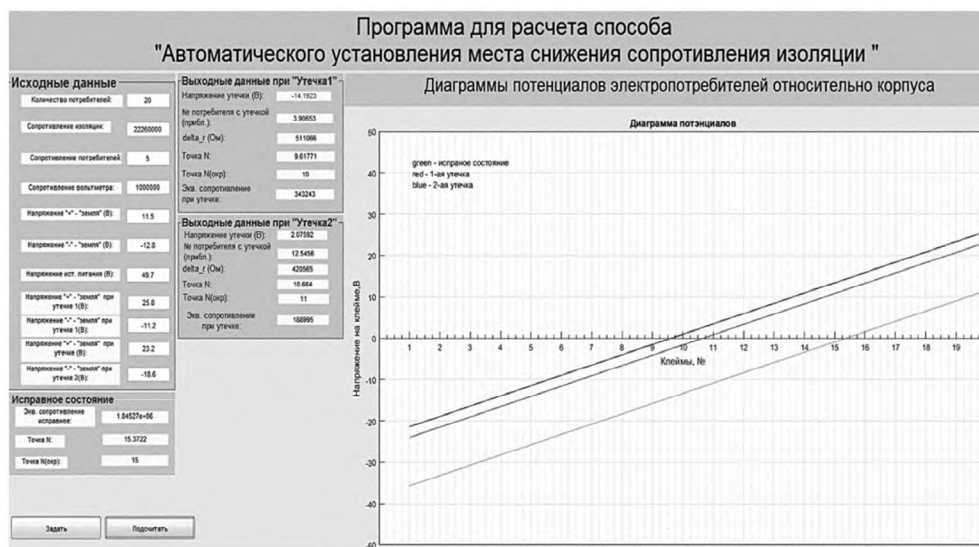
Данные о найденном месте снижения сопротивления изоляции заносятся в память компьютера.

Экспериментальные данные и результаты расчета Test data vs calculation results

№	Режим работы	Эксперимент				Результат определения места утечки
		Напряжение между «-» и «+» $U_{вх}$, В	Напряжение между «+» и корпусом U_+ , В	Напряжение между «-» и корпусом U_- , В	№ витка с поврежденной изоляцией	
1	Без утечки	49,7	11,5	12,8	—	—
	I утечка	49,7	25,8	11,2	4	3,91
	II утечка	49,7	23,2	18,6	12	12,54
2	Без утечки	49,7	11,5	12,8	—	—
	I утечка	49,7	26,9	10,0	3	2,94
	II утечка	49,7	20,0	22,0	16	16,27
3	Без утечки	49,7	11,5	12,8	—	—
	I утечка	49,7	29,4	7,5	1	0,94
	II утечка	49,7	17,5	24,5	20	20,28

Рис. 5. Интерфейс программы расчета сопротивления и установления точного места повреждения (дефекта) изоляции

Fig. 5. Interface of the software



Для определения мест последующих снижений сопротивления изоляции в обмотке будет также использоваться приведенный алгоритм, но с другими исходными данными, соответствующими текущим значениям параметров изоляции.

Данные и результаты расчетов трех из 113 проведенных опытов представлены в таблице. Погрешность определения места снижения изоляции не превышает 1 витка, что обеспечивает значительное упрощение процесса поиска места повреждения (дефекта) изоляции (рис. 5).

Разработанные физическая модель и программа могут быть использованы для демонстрации способа дистанционного установления места снижения сопротивления изоляции, который, в свою очередь, может быть внедрен в эксплуатацию и опробован на реальном корабле (судне).

Библиографический список

- Одинаев В.А., Малышев Л.А. Электроэнергетические системы кораблей. Ч. 1. Надводные корабли. СПб.: ВВМИУ, 1995.
- Одинаев В.А. Электрооборудование корабля. Электронное учебное пособие. СПб.: ВМПИ, 2017.
- Правила эксплуатации электрооборудования кораблей ВМФ (ПЭЭК-91). М.: Воениздат, 1992.
- Тюгай С.Ч. Методы оценки состояния изоляции электроэнергетической системы корабля. Часть 1. Изоляция низковольтной электроэнергетической системы корабля. СПб.: ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2019. 285 с.
- Иванов Е.А. и др. Безопасность электроустановок и систем автоматики. СПб.: Элмор, 2003. С. 89.

References

- V. Odinaev, L. Malyshev. Electric power systems of ships. Part 1. Surface ships. St. Petersburg, Higher School of Naval Engineers, 1995 (in Russian).
- V. Odinaev. Ship electrics. Electronic guide for students. St. Petersburg, Naval Polytechnical Institute, 2017 (in Russian).
- Operation rules for electric equipment of naval ships (PEEK-91). Moscow, Voenizdat, 1992 (in Russian).
- S. Tyugai. Isolation quality assessment method for electric power system of ship. Part 1. Isolation of low-voltage system. St. Petersburg, N.G. Kuznetsov Naval Academy, 2019, 285 pp. (in Russian).
- Ye. Ivanov et al. Safety of electric installations and automation systems. St. Petersburg, Elmor, 2003, p. 89 (in Russian).

Сведения об авторах

Дмитрий Андреевич Певнев, оператор научной роты ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1. Тел.: +7 910 327-47-33. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Леонид Русланович Токаев, оператор научной роты ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1. Тел.: +7 980 370-46-60. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Андрей Юрьевич Малков, адъюнкт кафедры теории электротехники электрических машин и аппаратов ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1. Тел.: +7 952 353-60-61. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Савелий Черхванович Тюгай, старший научный сотрудник ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1. Тел.: +7 952 390-77-42. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

About the authors

Pevnev, Dmitry A., Operator of Scientific Troop, N.G. Kuznetsov Naval Academy, address: 17/1, Ushakovskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, post code 197045, tel.: +7 910 327-47-33. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Tokaev, Leonid R., Operator of Scientific Troop, N.G. Kuznetsov Naval Academy, address: 17/1, Ushakovskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, post code 197045, tel.: +7 980 370-46-60. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Malkov, Andrey Yu., Adjunct, Department of Electric Machines and Hardware Theory, Naval Polytechnical Institute, N.G. Kuznetsov Naval Academy, address: 17/1, Ushakovskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, post code 197045, tel.: +7-952-353-60-61. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Tyugai, Saveliy Ch., Senior Researcher, N.G. Kuznetsov Naval Academy, address: 17/1, Ushakovskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, post code 197045, tel.: +7 952 390-77-42. E-mail: vunc-vmf@mai.ru.

Поступила / Received: 10.06.19
Принята в печать / Accepted: 30.08.19
© Коллектив авторов, 2019