



ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ И ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМАХ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

И.Е. Кажекин, канд. техн. наук,
доц. кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
e-mail: kazhekin@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Приведены результаты исследования дуговых процессов при неустойчивом контакте одной из фаз низковольтной электроустановки с компенсированной нейтралью. Особенностью таких электросетей является возможность формирования в них феррорезонансного контура. Исследования направлены на определение условий возбуждения феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях на корпус в низковольтных судовых электросистемах с компенсированной нейтралью. Тем самым выполнена оценка возможности формирования начальных условий в предшествующих циклах зажигания и гашения дуги, достаточных для возникновения устойчивых нелинейных колебаний в феррорезонансном контуре. Кроме этого предложена теория формирования максимальных значений дуговых перенапряжений в условиях периодического возбуждения феррорезонансных процессов при зажиганиях заземляющих дуг.

Описанные в работе исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00622.

Ключевые слова: *заземляющая дуга, однофазные замыкания, низковольтные электросети, заземление нейтрали, феррорезонанс, параметры дуги, перенапряжения*

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает опыт эксплуатации бортовых электроустановок объектов морской техники значительная часть угроз выхода из строя судового электрооборудования определяется их изоляцией. В большинстве случаев ее повреждения связаны с возникновением однофазных замыканий на корпус, представляющих собой наиболее распространенный вид замыканий в судовых электросетях.

В электросетях объектов морской техники защита от такого вида повреждения изоляции направлена на снижение величины тока в месте замыкания фазы. Этому способствует использование режима изолированной нейтрали, а также разделительных трансформаторов для питания оборудования, наиболее подверженного негативному влиянию окружающей среды.

Однако такие способы защиты не учитывают другую опасность однофазных замыканий – перенапряжения, которые возникают при неустойчивом характере контакта фазы с корпусом. Перенапряжения воздействуют на изоляцию неповрежденных фаз, способствуя ее выходу из строя [1] и дальнейшему развитию повреждения.

Одновременного снижения токов однофазных замыканий и максимальных перенапряжений на здоровых фазах можно достичь путем изменения режима нейтрали судовой электросети с изолированной на компенсированную. Однако при таком заземлении нейтрали образуется контур, содержащий соединенные последовательно нелинейный реактор и ем-

кость [2]. Проведенный в [3] анализ показал, что подобное заземление нейтрали в условиях судна способно привести к возникновению феррорезонансных процессов.

Выполненные в статье исследования позволяют сформулировать требования к параметрам устройств заземления нейтрали, исключающим возможность опасных феррорезонансных явлений.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются судовые электроэнергетические системы с компенсированной нейтралью в режиме неустойчивого замыкания фазы на корпус, сопровождающегося феррорезонансными процессами. Упрощенная схема такой электросистемы приведена на рис. 1.

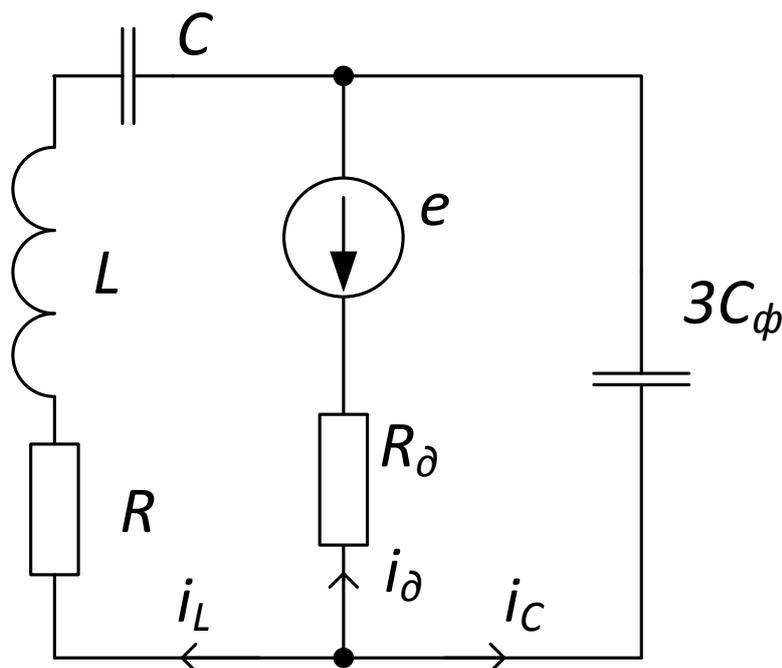


Рисунок 1 – Схема низковольтной электроустановки с компенсированной нейтралью в режиме однофазного замыкания: C – емкость элемента гальванической развязки; L, R – индуктивность и активное сопротивление компенсатора тока однофазного реактора; e – ЭДС поврежденной фазы; R_{δ} – сопротивление в месте замыкания; C_{ϕ} – фазная емкость электросети

При малых сопротивлениях в месте замыкания R_{δ} процессы в RLC -контуре можно рассматривать отдельно от остальной части схемы. Если контур имеет параметры, при которых пересекаются вольт-амперные характеристики индуктивного и емкостного элемента, а энергия, рассеиваемая на его активном сопротивлении, меньше энергии, поступающей от источника, то при формировании перед замыканием фазы на корпус достаточных начальных условий переходного процесса система переходит в состояние феррорезонанса.

Начальными условиями переходного процесса являются напряжение на емкости C и ток через индуктивность L . При превышении этими величинами некоторых критических значений $u_{скр}$ и $i_{Лкр}$, установленных в [3], в случае замыкания фазы, т.е. образования феррорезонансного контура, система переходит в состояние устойчивого феррорезонанса. Достаточные для этого условия могут сформироваться в режиме неустойчивого замыкания фазы на корпус, сопровождающегося искровыми и дугowymi процессами за счет переходных процессов в контуре нулевой последовательности после гашения дуги, при $R_{\delta} \rightarrow \infty$. В зависи-

мости от условий гашения дуги в контуре возникают колебания, максимальные амплитуды которых определяются дугowymi и последугowymi процессами. При повторном замыкании фазы, в момент, когда амплитуды превышают допустимые значения в RLC -контуре, возникает феррорезонанс.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка теории формирования максимальных значений дугowych перенапряжений в условиях периодического возбуждения феррорезонансных процессов при зажигании заземляющей дуги, позволяющей предложить технические мероприятия по исключению этого опасного явления в низковольтных электроустановках с компенсированной нейтралью. Для достижения поставленной цели требуется оценка возможности формирования начальных условий в предшествующих циклах зажигания и гашения дуги, достаточных для возникновения устойчивых нелинейных колебаний, т.е. определение условий возбуждения феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях на корпус. Критерием реализации таких условий является превышение током индуктивности и напряжением емкости граничных значений $i_{Lкр}(u_{Cкр})$, определяемых в результате анализа феррорезонансного контура [3].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание дугowych процессов выполнено на основе уравнения, представляющего собой энергетический баланс дугowego столба [4]:

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta}, \quad (1)$$

где Q – внутренняя энергия дугowego столба;
 P, P_{θ} – подводимая и отводимая мощности от дугowego столба.

При токах близких к нулю может быть использована модель дуги Майера [4]:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i^2}{gP_{\theta}} \quad (2)$$

Анализ устойчивости проведен согласно критериям Гурвица для упрощенной схемы, представленной на рис. 1. Система уравнений, описывающая процессы в схеме, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} + Ri_L + u_C - u_d = -e(t), \\ u_d - u_{C\phi} = e(t), \\ i_L + i_d + i_C = 0 \end{cases} \quad (3)$$

По (3) может быть составлено характеристическое уравнение следующего вида:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0 \quad (4)$$

Из уравнения (4) получены определители Гурвица, представляющие собой зависимости от сопротивления и постоянной времени дуги $\Delta_n(R_d, \theta)$:

$$\Delta_1(R_d, \theta) = a_1; \Delta_2(R_d, \theta) = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix}; \Delta_3(R_d, \theta) = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & a_4 & a_3 \end{vmatrix}; \Delta_4(R_d, \theta) = 1$$

Согласно [5], система является устойчивой, когда все определители $\Delta_n(R_d, \theta)$ положительны, при положительном значении a_0 . Приравнявая к нулю каждый из определителей $\Delta_n(R_d, \theta)$ и выражая из него R_d , можно получить выражения зависимости $R_d(\theta)$, описывающие граничные значения параметров дуги, при которых она теряет устойчивость по одному из определителей Гурвица.

Для рассматриваемой системы проведенный анализ устойчивости показал, что она нарушается в первую очередь при переходе через нулевое значение первого и второго определителей Гурвица. Приравнивание этих определителей к нулю позволило установить следующие условия гашения дуги:

$$R_d < \frac{\theta L}{C_{\phi\Sigma}(L-R\theta)} \quad (5)$$

$$R_d < \frac{C_{\phi\Sigma}(L+2R\theta) - \theta^2 - [(C_{\phi\Sigma}L - \theta^2)^2 - 8RC_{\phi\Sigma}\theta]^{1/2}}{2RC_{\phi\Sigma}(LC_{\phi\Sigma}L - \theta^2)} \quad (6)$$

Критерии (5) и (6) были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований, которые проводились в электроустановке (рис. 2).

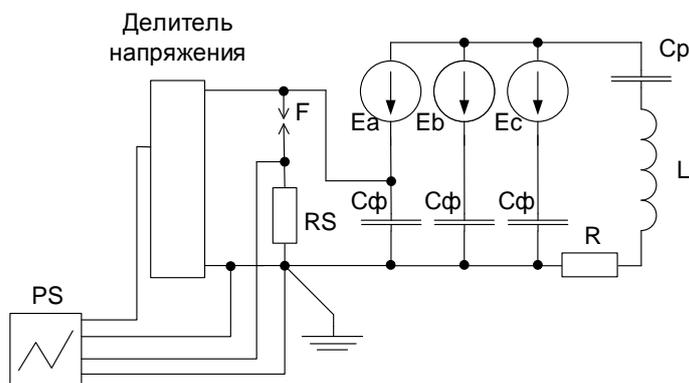


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки:
PS – цифровой запоминающий осциллограф;
RS – измерительный шунт; F – дуговой промежуток

В ходе эксперимента регистрировался ток в месте замыкания при помощи измерительного шунта 75-РИ и пробника ГТР-060А-4, а также напряжение поврежденной фазы при помощи делителя напряжения Testee типа ТТ-НВ150. Напряжение электроустановки, используемое в ходе экспериментов, составило 220 В. Замыкания создавались в виде неустойчивого контакта поврежденного кабеля с оголенными жилами и элементом заземленного корпуса и сопровождалась дуговыми и искровыми процессами при размыкании цепи. На рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжения, характерные для зарегистрированных в ходе эксперимента.

В время эксперимента было получено около сотни осциллограмм. При этом длительность замыканий не превышала периода промышленной частоты, а горение дуги – четверти периода. На части осциллограмм удалось зарегистрировать дуговые процессы при феррорезонансе. Обработка этих осциллограмм показала, что гашение дуги происходит при нахождении тока на линейном участке характеристики реактора. Это позволило принять допущение о возможности анализа устойчивости дуги, как устойчивости линейной системы, считая ток дуги синусоидальным при определении выражения для сопротивления дуги.

Оценка параметров заземляющей дуги проводилась на основе методики, изложенной в [6], следующим образом. Осциллограммы разбивались на множество точек, при этом шаг выбирался как можно меньший. Для зафиксированных осциллограмм он составил 20 мкс, т.е.

минимальный период между точками, зарегистрированными осциллографом. Для каждой точки по осциллограммам были найдены значения напряжения и тока, по которым определялись значения статического сопротивления дуги:

$$R_k = \frac{u_k}{i_k}, \quad (7)$$

где k – шаг, выбранный при обработке осциллограмм.

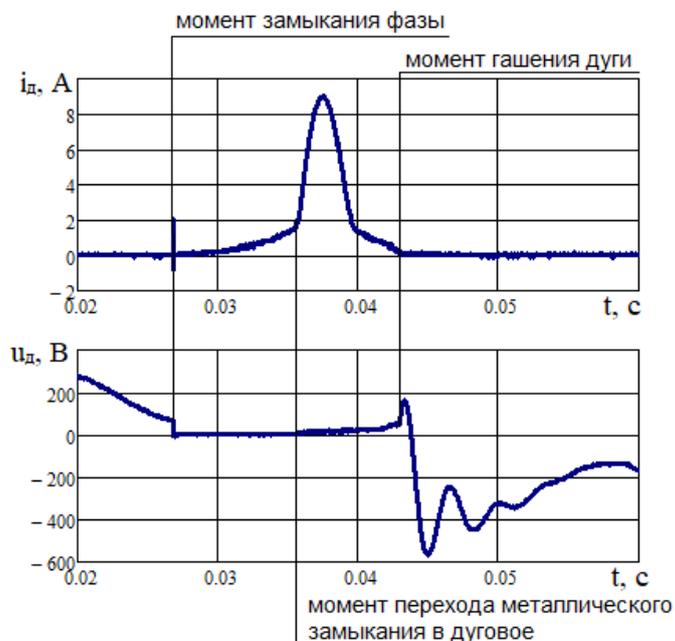


Рисунок 3 – Осциллограммы тока и напряжения дуги, зарегистрированные в ходе эксперимента

Далее для соответствующих точек определены величины $\frac{dR_k}{dt_k}$

$$\frac{dR_k}{dt_k} = \frac{R_k - R_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}, \quad (8)$$

найлены величины y_k и x_k

$$y_k = \frac{1}{R_k} \frac{dR_k}{dt_k}, \quad (9)$$

$$x_k = u_k \dot{i}_k \quad (10)$$

Используя значения y_k и x_k , проведены вычисления:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_k = \frac{y_{k-1} - y_k}{x_{k-1} - x_k} \quad (11)$$

Затем были вычислены следующие параметры дуги для соответствующих моментов времени:

$$(P_\theta)_k = x_k - \frac{y_k}{\left(\frac{dy}{dx}\right)_k}, \quad (12)$$

$$\theta_k = \frac{1}{(P\theta)_k \left(\frac{dy}{dx}\right)_k} \quad (13)$$

Таким образом, по полученным осциллограммам с помощью формул (7) и (13) были определены величины сопротивления дуги и постоянной времени дуги в любой момент времени. При этом наибольший интерес для исследования устойчивости представляют значения величин в момент, близкий к переходу тока дуги через нуль.

Кроме того, большое внимание было уделено процессам после гашения дуги, приводящим к ее повторным зажиганиям. На рис. 4 показаны осциллограммы тока и напряжения при неустойчивом дуговом однофазном замыкании.

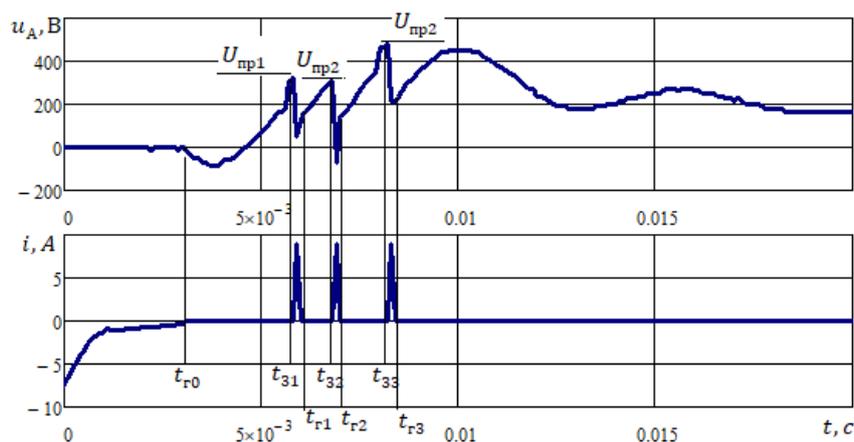


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения на поврежденной фазе и тока однофазного замыкания: t_{ri} – моменты гашения дуги; t_{zi} – моменты зажигания дуги; $U_{пр}$ – напряжения пробоя

По осциллограммам, подобным изображенным на рис. 4, получены зависимости напряжения пробоя $U_{пр}$ от времени, прошедшего после предыдущего гашения дуги $\Delta t_i = t_{ri} - t_{zi+1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Найденные по осциллограммам и выражениям (7)-(13) величины сопротивления и постоянной времени дуги сопоставлены с выражениями (5) и (6), полученными в результате анализа устойчивости. При параметрах используемой экспериментальной установки определяющим устойчивостью условием является (5). На рис. 5 показано сравнение значений, полученных в ходе экспериментов, с теоретической границей устойчивости, определяемой выражением (5).

Как видно из рис. 5, зарегистрированные значения критических параметров дуги действительно находятся вблизи теоретической границы устойчивости. На рис. 6 показано сопоставление границ устойчивых сочетаний параметров дуги, построенных по выражениям (5)-(6), с их экспериментальными значениями в момент гашения дуги.

Полученные в результате эксперимента зависимости параметров дуги подтверждают справедливость выбранного подхода к оценке ее устойчивости. Найденные на ее основе граничные условия могут быть использованы для оценки значений тока среза дуги, которое может быть выполнено на основе следующего выражения [7]:

$$I_{кр} < \sqrt{\frac{P}{R_{дкр}} (1 + (2\omega\theta)^2) - I_m^2 \omega\theta (2\omega\theta - \sin(2\omega t))}, \quad (14)$$

где P – отводимая от дуги мощность;

$R_{\text{дкр}}$ – критическое сопротивление дуги;
 ω – угловая частота;
 I_m – амплитуда тока дуги.

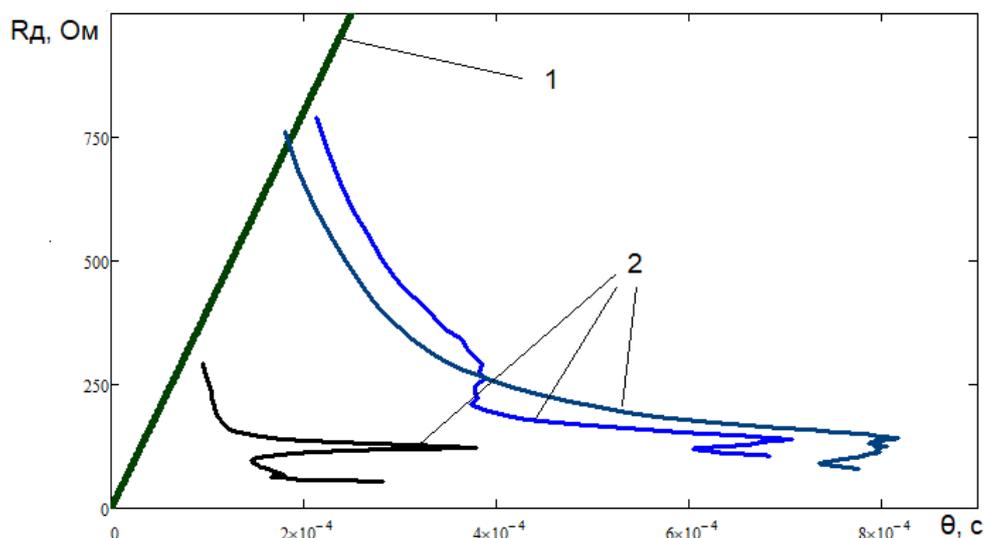


Рисунок 5 – Изменение параметров дуги в процессе ее горения:
 1 – граница устойчивости, согласно (5);
 2 – экспериментальные зависимости параметров дуги

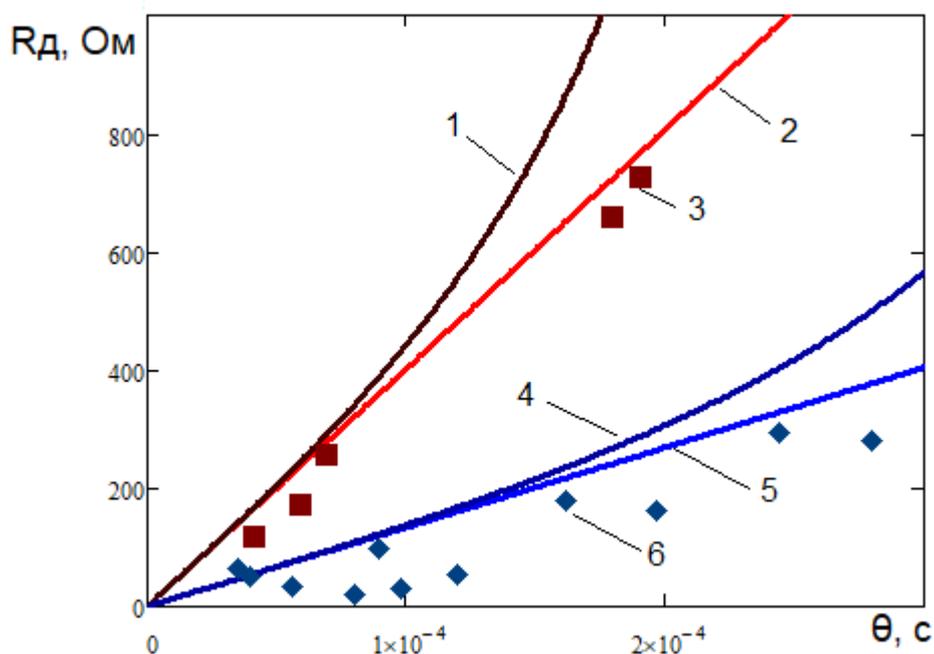


Рисунок 6 – Значения параметров дуги в момент ее гашения:
 1, 2 – зависимости, построенные по выражениям (6) и (5) для $C_{\phi\Sigma} = 0.25$ мкФ;
 3 – экспериментальные значения при $C_{\phi\Sigma} = 0.25$ мкФ;
 4, 5 – зависимости, построенные по выражениям (6) и (5) для $C_{\phi\Sigma} = 0.75$ мкФ;
 6 – экспериментальные значения при $C_{\phi\Sigma} = 0.75$ мкФ

Срез тока, а также гашение дуги при переходе его через нулевое значение в сетях с расстройкой компенсации, сопровождается колебаниями в контуре нулевой последовательности [8]. Колебания обусловлены тем, что в результате прерывания тока замыкания энергия магнитного поля, запасенная в индуктивности, переходит в энергию электрического поля фазных и разделительных емкостей, которые в контуре соединены последовательно. В результа-

те формируется напряжение на разделительной емкости, изменение которого описывается следующим выражением:

$$u_C(t) = \frac{3C_\phi}{3C_\phi + C} U_{\text{кол}} e^{-\delta(t-t_r)} \sin(\omega_0 t + \nu_u) + u_{N\text{пост}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{кол}}$ – амплитуда свободных колебаний напряжения на нейтрали после гашения дуги;
 δ – коэффициент затухания;
 ω_0 – частота собственных колебаний после гашения дуги;
 ν – начальная фаза напряжения колебаний;
 $u_{N\text{пост}}$ – напряжение смещения нейтрали по постоянному потенциалу.

Напряжение смещения нейтрали определяется выражением:

$$u_{N\text{пост}} = \frac{[u_B(t_r) + u_C(t_r)]C_\phi + u_p(t_r)C}{3C_\phi + C} \quad (16)$$

Ток через индуктивность после гашения дуги изменяется согласно следующему выражению:

$$i_L(t) = I_{\text{кол}} e^{-\delta(t-t_r)} \sin(\omega_0 t + \nu_i), \quad (17)$$

где $I_{\text{кол}}$ – амплитуда тока через ДГР после гашения дуги;
 ν_i – начальная фаза напряжения колебаний.

Амплитуды колебаний $U_{\text{кол}}$ и $I_{\text{кол}}$ определяются на основе уравнения энергетического баланса контура нулевой последовательности с учетом наибольшей величины тока среза, предельное значение которой может быть оценено по выражению (14). При превышении $u_C(t)$ и $i_L(t)$ в момент повторного зажигания дуги допустимых значений система переходит в состояние феррорезонанса.

Однако следует учесть, что амплитуды колебаний ограничиваются прочностью дугового промежутка. Колебания в контуре нулевой последовательности проявляются, в том числе, в виде напряжения между нейтральной точкой электросети и корпусом судна. Это напряжение накладывается на напряжение поврежденной фазы, изменение которого может быть описано при помощи следующего выражения:

$$u_A(t) = E_m \left[\sin(\omega t) + \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \nu_u) \right], \quad (18)$$

где E_m – амплитуда фазной ЭДС;
 ω_0 – собственная частота контура нулевой последовательности после гашения дуги;
 ω – промышленная частота сети.

При быстром восстановлении напряжения поврежденной фазы происходит повторное зажигание дуги. Измерения величин, указанных на рис. 4, позволили получить статистическую зависимость разрядного напряжения от времени после гашения дуги. Зависимость приведена на рис. 7.

Для получения зависимости, представленной на рис. 7, к остаточному дуговому столбу на межэлектродном промежутке был применен подход Майра [8]. Если принять, что напряжение, прикладываемое к дуговому промежутку, является функцией времени, а не фиксированной величиной, как, например, в [9], и не зависит от сопротивления дугового ка-

нала, можно перейти к выражению, описывающему восстановление напряжения пробоя дугового промежутка после гашения дуги:

$$U_{\text{пр}}(t) = U_{\text{пр}0} e^{\frac{t}{\theta_{\Gamma}}} \quad (19)$$

Выражение (19) наиболее точно описывает огибающую при значениях $U_{\text{пр}0}$ и θ_{Γ} , равных 522.7 В и 0,329 мс соответственно.

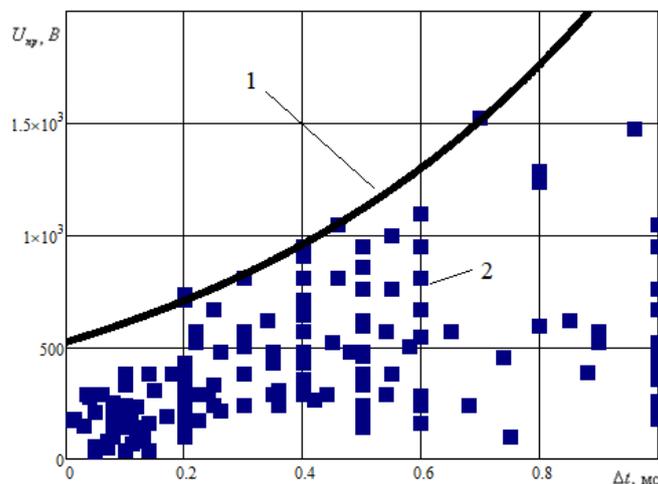


Рисунок 7 – Зависимость разрядного напряжения от момента времени после погасания дуги:

- 1 – теоретическая зависимость;
- 2 – результаты экспериментов

Зависимость $U_{\text{пр}}(t)$ позволяет уточнить предел амплитуды возможных колебаний напряжений на элементах контура нулевой последовательности и его тока, т.е. тока через индуктивность L и напряжения на разделительной емкости C перед возможным повторным зажиганием дуги. Сопоставляя предельные значения этих величин со значениями $i_{L\text{кр}}$ и $u_{C\text{кр}}$, можно оценить возможность перехода системы в состояние феррорезонанса и предложить технические решения по исключению возможности такого перехода.

Кроме того, результаты проведенных исследований позволяют сформулировать следующий алгоритм расчета максимальных значений дуговых перенапряжений.

1. Максимальные перенапряжения определяются по следующему выражению:

$$U_{\text{max}} = \sqrt{3}E_m \sin(\omega t_3 + 30^\circ) + u_{A\text{max}}(1 - d)(1 - k), \quad (20)$$

где $u_{A\text{max}}$ – максимальное напряжение поврежденной фазы перед зажиганием дуги.

2. Значение $u_{A\text{max}}$ может быть найдено следующим образом:

$$u_{A\text{max}} = \begin{cases} u_A(t_3)_{\text{max}} + u_{N\text{пост}} & \text{при } u_A(t_3)_{\text{max}} + u_{N\text{пост}} \leq U_{\text{пр}}(t_3) \\ U_{\text{пр}}(t_3) & \text{при } u_A(t_3)_{\text{max}} + u_{N\text{пост}} > U_{\text{пр}}(t_3) \end{cases}, \quad (21)$$

где $u_A(t_3)_{\text{max}}$ – максимальное напряжение поврежденной фазы перед зажиганием дуги, найденное на основе (18).

3. Величина $u_{N\text{пост}}$ определяется моментом гашения дуги и состоянием системы в режиме однофазного замыкания: феррорезонансное или нерезонансное. При гашении дуги в

момент первого перехода тока замыкания через нулевое значение величина $u_{N\text{пост}}$ не успева-ет значительно возрасти. Даже в результате многократно повторяющихся циклов зажигания и гашения дуги, при допущении о поведении дуги по теории Петерсена, напряжение смеще-ния нейтрали не может стать больше фазной ЭДС. При гашении дуги в момент после затуха-ния свободной составляющей (подобно поведению, описанному в теории Петерса и Слепяна, или в результате среза ее тока) напряжение $u_{N\text{пост}}$ будет определяться напряжением на раз-делительной емкости. При нахождении системы в состоянии феррорезонанса перед гашени-ем дуги величину $u_{N\text{пост}}$ можно принять равной $u_p(t_r)$.

4. Возможность перехода системы в состояние феррорезонанса следует проводить исходя из $I_{\text{кол}} > i_{L\text{кр}}$ и $U_{\text{кол}} > u_{C\text{кр}}$, при этом предельные значения амплитуд колебаний $I_{\text{кол}}$ и $U_{\text{кол}}$ определяются не только параметрами схемы, но и величинами $U_{\text{пр}}(t_3)$ и $I_{\text{кр}}$, которые, как показано выше также зависят от параметров электросети. Совокупность значений $i_{L\text{кр}}$ и $u_{C\text{кр}}$ определяется из анализа феррорезонансных процессов, например, согласно [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные поло-жения теории формирования максимальных значений дуговых феррорезонансных перена-пряжений.

1. Перенапряжения в низковольтных электросетях с компенсированной нейтралью следует рассчитывать с учетом совокупности феррорезонансных, дуговых и последуговых процессов, оказывающих влияние друг на друга. Возможность возникновения феррорезонан-са определяется амплитудой колебаний тока и напряжений на элементах контура нулевой последовательности.

2. Предельные амплитуды колебаний в контуре нулевой последовательности ограни-чиваются величиной тока среза, устанавливаемой по выражению (14), и разрядным напряже-нием дугового промежутка, определяемого выражением (19).

Практическая значимость результатов заключается в определении условий возникно-вения феррорезонансных колебаний при однофазных замыканиях, а также в разработке ме-тодики расчета максимальных перенапряжений. На основе полученных в работе выражений можно осуществлять расчет устройств заземления нейтрали, исключающих опасные ферро-резонансные явления, а также проводить оценку максимальных перенапряжений с целью обоснования защиты и испытательных воздействий для электрооборудования.

Благодарности

Рассмотренные в статье исследования дуговых процессов в феррорезонансном конту-ре выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-38-00622.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Резистивное заземление нейтралей в судовых электроэнергетиче-ских системах / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. - 2010. - № 17. - С. 138-140.
2. Благинин, В. А. Описание феррорезонансных процессов при однофазных замыка-ниях в судовых электроэнергетических системах с компенсированной нейтралью / В. А. Бла-гинин, И. Е. Кажекин // Инновации в науке и образовании - 2011: IX Междунар. науч. конф.: труды. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2011. – С. 427-430.
3. Кажекин, И. Е. Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судов-ых электроустановках с компенсированной нейтралью / И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. - 2019. – № 52. – С. 145-154.
4. Пентегов И. В. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33-36.
5. Четаев, Н. Г. Устойчивость движения / Н. Г. Четаев. – Москва: Наука, 1965. – 234 с.

6. Таев, И. С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения / И. С. Таев. – Москва – Ленинград: Энергия, 1965. – 224 с.
7. Радченко, В. Д., Анализ устойчивости горения дуги при отключении малых индуктивных токов / В. Д. Радченко // Электричество. – 1968. – № 9. – С. 27-31.
8. Благинин, В. А. Дуговые перенапряжения в низковольтных электросистемах с компенсацией тока однофазного замыкания / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // «Инновации в науке и образовании-2011»: IX Междунар. науч. конф.: труды. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2011. - Ч. 1. - С. 424-427.
9. Благинин, В. А. Прогнозирование дуговых перенапряжений в судовых электросетях низких и средних классов напряжений / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 247-250.

DETERMINATION OF THE CONDITIONS FOR EXCITATION OF FERRORESONANCE PROCESSES AND FORMATION OF MAXIMUM OVERVOLTAGES DURING SINGLE-PHASE FAULTS IN LOW VOLTAGE SHIP ELECTRICAL SYSTEMS WITH COMPENSATED NEUTRAL

I.E. Kazhekin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering
e-mail: kazhekin@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

The results of the study of arc processes with unstable contact of one of the phases of a low-voltage electrical installation with compensated neutral are presented. A feature of such electrical networks is the possibility of forming a ferroresonant circuit in them. Studies are aimed at determining the conditions for the excitation of ferroresonance processes during single-phase faults in low-voltage marine electrical systems with compensated neutral. Thereby, an assessment was made of the possibility of the formation of initial conditions in the previous ignition and arc quenching cycles, sufficient for the occurrence of stable nonlinear oscillations in the ferroresonant circuit. In addition, a theory is proposed for the formation of maximum values of arc overvoltages under conditions of periodic excitation of ferroresonant processes during ignition of grounding arcs.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-38-00622.

Key words: *grounding arc, single-phase faults, low-voltage power networks, neutral grounding, ferroresonance, arc parameters, overvoltage*