



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ ДУГИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА КОРПУС

И. Е. Кажекин, кандидат технических наук, доцент кафедры
электрооборудования судов и электроэнергетики
e-mail: kazhekin@mail.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В работе выполнен анализ основных математических моделей электрической дуги. Приведены результаты экспериментального исследования дуговых процессов при однофазных замыканиях в электроустановках, сопровождающихся феррорезонансными процессами.

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

электрическая дуга, низковольтные электроустановки, однофазные замыкания

ВВЕДЕНИЕ

Возможность возникновения повреждений изоляции в виде однофазных замыканий нельзя исключать для любых электроустановок. Более того, согласно статистике, их количество в различных электросетях превышает число всех других видов замыканий. Однофазные повреждения изоляции могут приводить к выходу из строя электрооборудования, нарушению электроснабжения потребителей и более серьезным последствиям. Например, как показывает анализ аварийности, проведенный для отечественных судов рыбопромыслового флота, замыкания фазы на корпус в бортовых электросетях можно признать определяющей причиной пожарной аварийности [1]. При этом предотвращение судовых пожаров должно основываться именно на повышении пожарной безопасности бортовых электросетей в режиме однофазных замыканий [2]. Опасность такого режима определяется как протеканием токов в месте замыкания, так и действием перенапряжений на неповрежденные участки изоляции электроустановки при неустойчивом характере замыкания. Оба эти показателя зависят от режима нейтрали электросети, выбор которого на объектах морской техники регламентируется правилами Российского морского регистра судоходства [3]. Возможность улучшения обоих показателей реализуется путем перевода бортовых электросетей в режим заземления нейтрали через реактор. Такой режим допускается [3] наряду с традиционно применяемой на подавляющем большинстве судов изолированной нейтралью.

Заземление нейтрали через реактор при его правильной настройке одновременно со снижением тока однофазных замыканий обеспечивает существенное ограничение максимальных величин дуговых перенапряжений, что позволяет рассматривать это техническое решение как основу для повышения пожарной безопасности бортовых электроустановок. Пример такого рационального использования устройства заземления нейтрали в судовых электроустановках описан в [2], где даже при изменениях в ходе длительной эксплуатации параметров бортовой электросети устройство позволило значительно улучшить оба эти показателя.

Однако при неправильном выборе и настройке реактора вместо улучшения указанных характеристик электросети можно получить их значительное ухудшение. Это связано, в том числе, и с некоторыми особенностями реализации такого заземления нейтрали в судовых условиях [4], способных привести к возникновению феррорезонансных процессов. Формирование условий для возникновения феррорезонансных колебаний возможно при неустойчивых дуговых однофазных замыканиях. Сочетание дуговых процессов с феррорезонансом

приводит к возрастанию как величин токов в месте замыкания, так и перенапряжений [5, 6]. Анализ процессов, протекающих в таких условиях, осложняется отсутствием описания элементов образующегося феррорезонансного контура при замыкании фазы на корпус. В частности, остается открытым вопрос о применимости известных моделей низковольтной электрической дуги, горящей при сравнительно малых токах, чем и обусловлена задача статьи, заключающаяся в обзоре математических описаний электрической дуги, применение которых возможно для последующего анализа дуговых процессов, сопровождающихся феррорезонансом напряжения.

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Модель должна определять взаимодействие между электрической дугой и электросистемой, в которой она возникает. Она может состоять из одного или нескольких дифференциальных уравнений, связывающих проводимость дуги и параметры режима. Большинство известных моделей электрической дуги основаны на энергетическом балансе столба дуги, который можно сформулировать следующим образом [7]:

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

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

Статическое сопротивление столба электрической дуги:

$$R_{ст}(i_{\theta}) = \frac{U_{ст}(i_{\theta})}{i_{\theta}}, \quad (2)$$

где i_{θ} - ток состояния дуги;
 $U_{ст}(i_{\theta})$ - функция, описывающая статическую характеристику дуги.

Подводимая и отводимая мощности от столба дуги:

$$P = R_{ст}(i_{\theta})i^2, \quad (3)$$

где i - ток дуги;

$$P_{\theta} = U_{ст}(i_{\theta})i_{\theta}. \quad (4)$$

Динамическое изменение напряжения столба:

$$u_{ст} = \frac{U_{ст}(i_{\theta})i_{\theta}}{i}. \quad (5)$$

Одна из первых моделей была предложена Касси в 1939 г. Она описывает процесс горения дуги при больших значениях тока. Дифференциальное уравнение согласно модели Касси выглядит следующим образом [7]:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \left(\frac{i}{gU_{ст}} \right)^2. \quad (6)$$

Особенностью модели Касси является предположение о том, что напряжение столба дуги принимается постоянным.

Модель дуги Майера, предложенная в 1943 г., может быть использована при токах, близких к нулю. Ее описание основано на следующем дифференциальном уравнении [7]:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i^2}{gP\theta}. \quad (7)$$

В модели Майера принимается, что отводимая мощность неизменна.

Модель Заруди, предложенная в 1971 г., имеет следующий вид [7]:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i^2}{g^{k+1}X_k}, \quad (8)$$

где X_k - константа;

k - показатель нелинейности плазмы, зависит от газа, в котором горит дуга.

Опубликованная в 1971 г. модель Шварца представляет собой преобразованную модель Майера [8]:

$$\frac{\theta}{g^a} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{ui}{g^b P\theta}, \quad (9)$$

где a, b – постоянные.

Модель Шельгазе, предложенная в 1971, отличается тем, что в ее основу заложены принципы, не соответствующие уравнению баланса энергии [7]. Дифференциальное уравнение, описывающее свойства электрической дуги, согласно этой модели имеет следующий вид:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i}{gU_{ст}(i)}. \quad (10)$$

Динамическая модель электрической дуги, предложенная И. В. Пентеговым [12] в 1976 г., может быть использована для описания дуговых процессов, протекающих в различных условиях. Эта модель может рассматриваться как обобщенная, объединяющая модели Касси, Майера и Заруди [7]:

$$\left[\frac{2\theta}{1 - \frac{gdU_{ст}(i\theta)}{di\theta}} \right] \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \left(\frac{i}{gU_{ст}(g)} \right)^2 = \frac{i^2}{gP\theta}. \quad (11)$$

Модель Хабендэнка, описанная в 1988 г., представляет собой объединение моделей Касси и Майера. Ей соответствует следующая система уравнений [8]:

$$\begin{cases} \frac{\theta_c}{g_c} \frac{dg_c}{dt} + 1 = \left(\frac{ug}{g_c U_{ст}} \right)^2 \\ \frac{\theta_m}{g_m} \frac{dg_m}{dt} + 1 = \frac{(ug)^2}{g_m P\theta} \\ \frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \end{cases} \quad (12)$$

где g – полная проводимость дуги;

θ_c, θ_m – постоянные времена дуги по Касси и по Майеру;

$U_{ст}$ – постоянное напряжение дуги согласно модели Касси;

g_c, g_m – проводимости дуги по Касси и по Майеру;
 P_θ – постоянная мощность, отводимая от дуги по Майеру.

Модифицированная модель Майера была предложена в 1992 г. Согласно этой модели мощность охлаждения представляет собой зависимость от тока дуги [8].

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{ui}{P_0 + C_i |i|}, \quad (13)$$

где P_0, C_i - аппроксимирующие коэффициенты.

Модель Шэйвмейкера, описанная в 2000 г., также основана на модели Майера. Ее особенностью является учет зависимости охлаждения дуги от подводимой мощности [8]:

$$\frac{\theta}{g} \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{ui}{\max(U_{arc}|i|, P_0 + P_1 ui)}, \quad (14)$$

где U_{arc} - среднее напряжение дуги;
 P_1 - постоянная охлаждения дуги.

В области высоких токов уравнение сводится к дифференциальному уравнению, соответствующему модели дуги Касси, а в области малых токов – модели дуги Майера.

Модель КЕМА предложена в [9] для дуги, возникающей в высоковольтных аппаратах, и также представляет собой модифицированную модель Майера, выраженную в следующем виде:

$$\frac{\theta_i}{g_i} \frac{dg_i}{dt} + 1 = \frac{g_i^{\lambda_i - 1} U_i^2}{\Pi_i}, \quad (15)$$

где i - номер итерации, может быть равен 1, 2 или 3;
 λ - параметр, характеризующий переход от модели Касси к модели Майера;
 Π_i - потери мощности.

Расчет проводится тремя итерациями, а параметры дуги определяются как сумма составляющих, полученных при таких расчетах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Выбор математического описания заземляющей дуги должен быть основан на результатах экспериментального исследования дуговых процессов. Такие исследования проводились на физической модели судовой электросети, в которой были созданы условия для возникновения феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях, а сами замыкания фазы осуществлялись в виде неустойчивого сопровождающегося дуговыми процессами контакта фазы с корпусом. Схема установки приведена на рис. 1.

В ходе эксперимента регистрировались ток и напряжение дуги. Некоторые результаты регистрации приведены на рис. 2.

Обработка осциллограмм зарегистрированных токов и напряжения дуги проведена с использованием методики [10], основанной на представлении электрической дуги при помощи уравнения энергетического баланса (1). В результате были получены следующие временные зависимости параметров дуги.

Как видно из рис. 2 и 3, параметры электрической дуги меняются в течение времени ее горения, что должно быть учтено при выборе модели дуги.

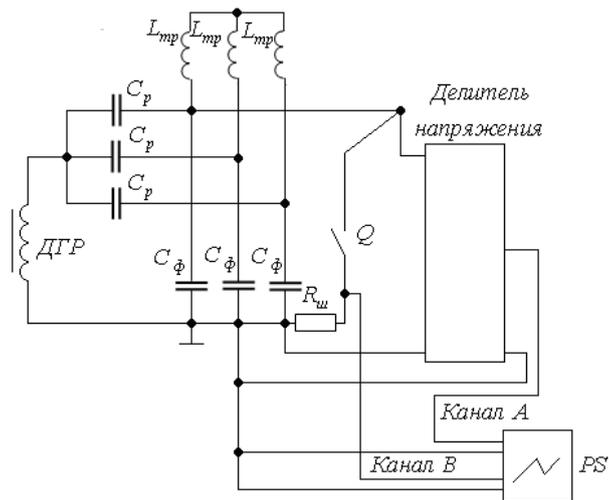


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

L_{mp} - индуктивность питающего трансформатора;

C_p - емкость, используемая для присоединения дугогасящего реактора (ДГР)

в низковольтных судовых электросетях; C_{ϕ} - фазная емкость электросети;

Q - неустойчивый контакт; $R_{ш}$ - сопротивление измерительного шунта;

PS - осциллограф

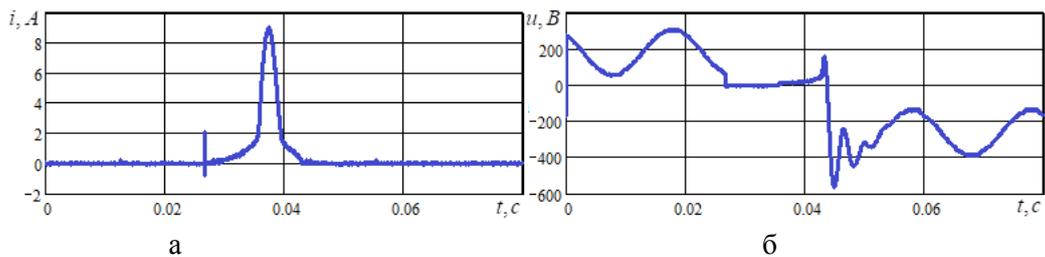


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения дуги при неустойчивом замыкании, сопровождаемом феррорезонансными процессами: а - ток дуги; б - напряжение дуги

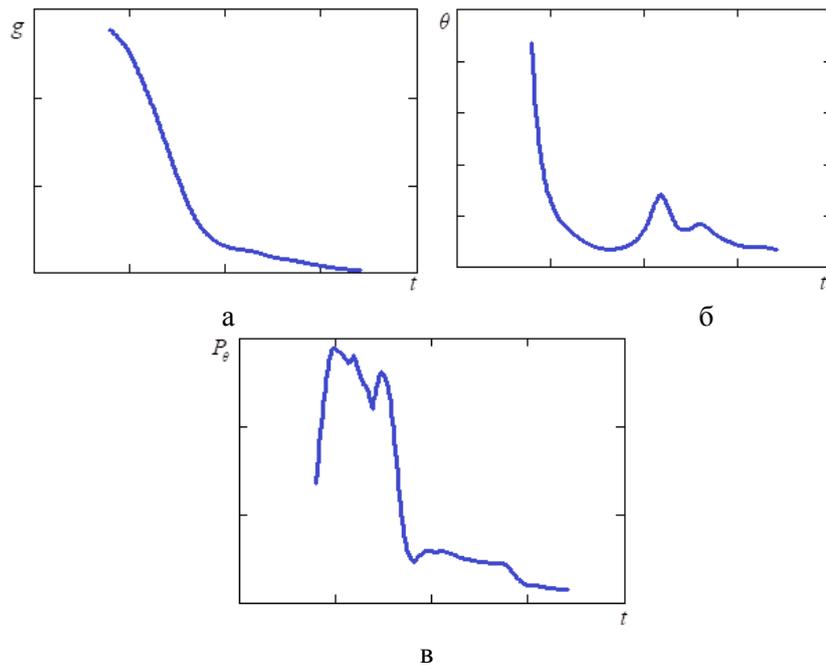


Рисунок 3 – Изменения параметров дуги во времени: а - проводимость дуги; б - постоянная времени; в - мощность тепловыделений

ВЫВОД

Проведенный обзор математических моделей электрической дуги показал, что их большая часть основывается на уравнении энергетического баланса столба дуги. При этом, как правило, они представляют собой различного рода модификации описаний, предложенных Касси и Майером.

С учетом того, что однофазные неустойчивые заземляющие дуги в низковольтных судовых электросетях характеризуются малыми величинами токов и характерными изменениями напряжения, можно сделать вывод, что для их описания должна быть использована одна из модификаций модели Майера. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для описания дуги следует использовать модели, учитывающие изменения ее параметров во время горения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Профилактика аварийности отечественного рыболовецкого флота / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Безопасность жизнедеятельности. - 2010. - № 3 (111). - С. 40-47.
2. Результаты длительных натурных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем / В. А. Благинин [и др.] // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2015. - № 1. - Т. 18. - С. 124-129.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование. – Санкт Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2016. - 130 с.
4. Кажекин, И. Е. Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью / И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. - 2019. - № 52. - С. 145-153.
5. Благинин, В. А. Описание феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях в судовых электроэнергетических системах с компенсированной нейтралью / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Инновации в науке и образовании – 2011: IX Междунар. науч. конф.: в 2-х ч.: труды. - 2011. – Ч. 1. - С. 427-430.
6. Кажекин, И. Е. Анализ возможности возникновения феррорезонансных процессов на основной гармонике в низковольтных судовых электросетях / И. Е. Кажекин // Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии: VI Международный Балтийский морской форум (3-6 сент. 2018 г.): материалы. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ». – 2018. – Т. 2. – С.210-217.
7. Пентегов, И. В. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорев // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33–36.
8. Yuan, L. Simulation of Fault Arc Using Conventional Arc Models/ L. Yuan, L. Sun, H. Wu //School of Electrical and Automation Engineering. Energy and Power Engineering. – 2013. - № 5. - P. 833-837.
9. Smeets, R. P. P. Evaluation of HV-circuit breaker performance with a validated arc model/ R. P. P. Smeets, V. Kertész, // IET Proceedings - Generation Transmission and Distribution. - 2000. - № 147(2). - P. 121 - 125.
10. Таев, И. С. Электрическая дуга отключения / И. С. Таев. – Москва-Ленинград: Энергия, 1965. – 223 с.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE EARTHING ARC IN LOW-VOLTAGE SHIP-BOARD ELECTRIC NETWORKS WITH SINGLE-PHASE CLOSES ON THE HOUSING

I.E. Kazhekin, Dr. Sc. (eng.), Associate Professor,
e-mail: kazhekin@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

In the atrical reviews most of the mathematical models of the electric arc. The results of an experimental study of arc processes with single-phase faults in electrical installations accompanied by ferroresonance processes are presented.

electric arc, low-voltage electrical installations, single-phase closes