

ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.316.125

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАНДАРТОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

А.С. Исаев, Е.М. Чебану

© Исаев А.С., Чебану Е.М., 2026

***Аннотация.** Рассмотрены аспекты согласования расчетов токов короткого замыкания, выполненных в соответствии с различными нормативными документами. В качестве объекта исследования выбран крупный современный химический концерн в Тульской области. Особенностью работы является изучение сети низкого напряжения предприятия. Результаты исследования могут быть внедрены в учебный процесс при подготовке электроэнергетиков.*

***Ключевые слова:** короткое замыкание, периодическая составляющая тока, математическое моделирование, переходное сопротивление, Matlab, RastrWin, SimPowerSystems.*

Введение. Расчет токов короткого замыкания (КЗ) является в электроэнергетике определяющим для принятия проектных решений. Максимальные токи КЗ служат для проверки электрооборудования и аппаратуры на термическую и электродинамическую стойкость в условиях возникновения наиболее тяжелого аварийного режима, минимальные – для проверки устройств релейной защиты и автоматики на чувствительность. Интеграционные процессы в экономике требуют согласования различных стандартов, которые можно разделить на четыре группы: 1) отечественные (нормативные документы РФ: ГОСТы на расчет высоковольтной и низковольтной сети, различные отраслевые руководящие документы); 2) североамериканские (стандарты ANSI (American national standards institute) и IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)); 3) международные (нормативы международной энергетической комиссии (МЭК)); 4) прочие (в первую очередь британский стандарт BS и германский DIN) [1].

При использовании различных стандартов расчета нужно обратить внимание на различия в основных терминах и определениях. Это вызвано в первую очередь проблемами технического перевода специализированных текстов, для которого используются онлайн-сервисы и информационные платформы, успешно применяемые и в образовательном процессе [2].

Например, в стандарте МЭК ток КЗ определяется как «сверхток, возникающий в результате КЗ из-за дефекта или неправильной коммутации электрической цепи» [1]. Здесь присутствуют две неточности: слово «дефект» следует заменить на «повреждение» (дефект может возникать без электрического контакта и быть обусловлен недопустимым разрывом цепи), а вместо термина «подключение» корректнее использовать «соединение». Это может приводить к существенному расхождению в терминологии. Так, в стандарте ANSI режим КЗ характеризуется наличием токопроводящего пути между двумя точками сети (фазами), тогда как в действительности в этих условиях речь может идти только о двухфазном КЗ (одном из частных случаев аварийного режима); ударный ток определен как максимальное мгновенное значение тока для произвольного режима, но максимальное значение тока может наблюдаться исключительно при трехфазном КЗ. Международные стандарты используют единый математический аппарат, поэтому приводят к схожим результатам (но необходимо учесть, что они ориентированы на расчет полного тока КЗ, а в терминологии РФ это периодическая составляющая тока).

В качестве объекта исследования выбрано крупное многоменклатурное химическое предприятие ООО «Щекиноазот», которое занимает второе место по объему электропотребления в Тульской области. Завод, ориентированный на выпуск удобрений, сырья для химических производств, товаров бытовой химии, развивается опережающими темпами, занимая первое место в Тульском регионе по годовому приросту электропотребления в течение последних 5 лет. Ранее его основным стратегическим партнером был газовый концерн «Haldor Topsøe» (Дания). В силу геополитических причин в настоящее время предприятие вынуждено переориентировать свою деятельность на корпорации Китая (прежде всего на компанию China National Chemical Engineering). В проектной документации приводятся лишь результирующие параметры и некоторые самые общие расчетные соотношения без полной методики. Актуальным является согласование документов, в которых временами возникают ситуации непонимания, вызванные в первую очередь нестандартными аббревиатурами и обозначениями (например, напряжение КЗ для силовых трансформаторов $U_{кз}$ обозначается α и выражается не в привычных нам относительных единицах, а в именованных). Это соответствует известной проблеме корректной трансляции акронимов, рассмотренной ранее [3].

Целью работы является верификация методик расчета режима по различным стандартам с целью их согласования.

Методы исследования основаны на применении современных специализированных программ для расчета и моделирования режимов объектов электроэнергетики.

Как *объект исследования* рассмотрена типичная сеть крупного современного предприятия (включая низковольтную сеть напряжением 0,4 кВ). В качестве инструментального средства использованы MathCAD (непосредственный расчет согласно принятым инженерным методикам), RastrWin (расчет режима по стандартам РФ), Matlab SimPowerSystems (расчет по международным стандартам).

Методы расчета режима в достаточном объеме рассмотрены ранее в статье [4]. MathCAD использует непосредственный расчет периодической составляющей тока КЗ на основе узловых уравнений. RastrWin является законченным программным продуктом, пользователю необходимо лишь ввести данные в табличной форме. Библиотеки Matlab предназначены для визуального моделирования режима (результатом можно считать некую виртуальную модель лабораторного стенда).

Результаты. В таблице представлены результаты расчета токов КЗ для характерных точек сети.

Результаты расчета токов КЗ

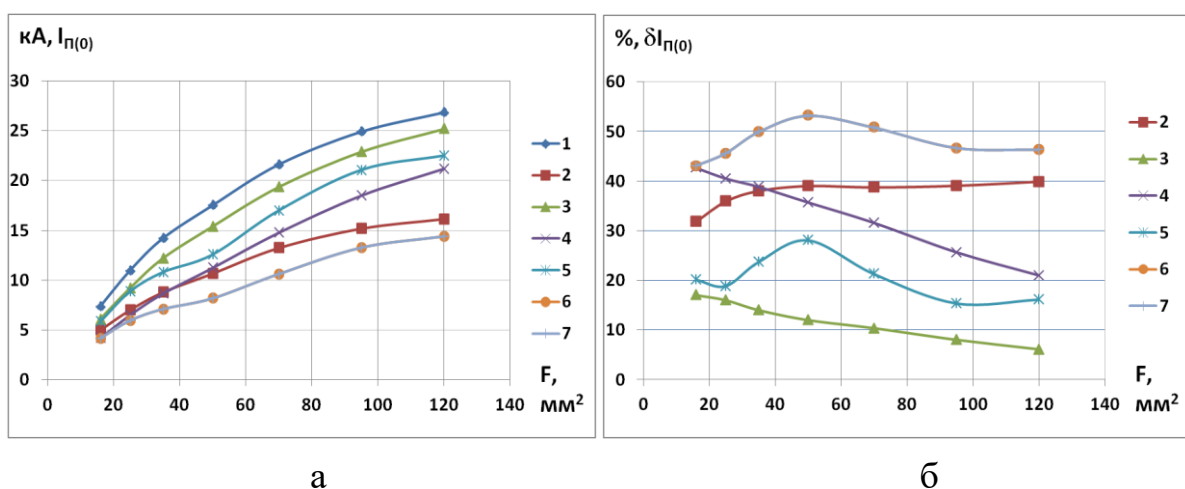
Параметр	ГОСТ РФ (RastrWin)	МЭК (Matlab)
Положение точки КЗ	РУ ВН ГПП (110 кВ)	
Начальное значение $I_{П(0)}$, кА	5,94	5,4
Максимальное значение $i_{уд}$, кА	9,53	9,2
Положение точки КЗ	РУ НН ГПП (6 кВ)	
Начальное значение $I_{П(0)}$, кА	9,29	10,0
Максимальное значение $i_{уд}$, кА	18,51	19,7
Положение точки КЗ	РУ НН КТП (0,4 кВ)	
Начальное значение $I_{П(0)}$, кА	13,41	26,4

Можно говорить об удовлетворительном согласовании результатов в сети 6 кВ и чрезмерной (49,2 %) разнице между ними в сети 0,4 кВ. Последнее объясняется необходимостью учета в низковольтной сети дополнительных факторов (переходного сопротивления контактов, первичных соединений измерительных трансформаторов тока). ГОСТ РФ [5] упрощенно учитывает их одним дополнительным активным сопротивлением. Оно небольшое (составляет в зависимости от положения точки КЗ от 15 до 30 мОм), но из-за особенности низковольтной сети существенно влияет на величину тока. В стандарте МЭК подобного нет.

Универсальным способом расчета режима является непосредственное решение дифференциальных уравнений (ДУ) [6], позволяющее моделировать режим пофазно при вариации расчетных условий (включая вид КЗ и ток предшествующего режима). Однако подобное сопряжено с

необходимостью сбора большого объема информации о состоянии элементов сети. Таким образом, расчеты выполнены с учетом отдельных факторов при изменении сечения кабельной линии 0,4 кВ.

Рассмотрены следующие модели сети (рисунок): 1 – металлическое КЗ (пренебрежение сопротивлением дуги приводит к максимально возможному току); 2 – учет сопротивления дуги; 3 – учет нагрева до температуры термической стойкости; 4 – учет нагрева до температуры невозгораемости; 5 – учет контактных сопротивлений; 6 – учет дуги и контактных сопротивлений; 7 – учет дуги, контактных сопротивлений и нагрева до температуры термической стойкости. При этом зависимость сопротивления от температуры реализована непосредственно в программе RastrWin. Сопротивление дуги, которое имеет чисто активный характер, принято в зависимости от величины тока на основании методики, изложенной изначально в работе [7]. Суммарное сопротивление контактов представлено суммарным сопротивлением кабельной муфты, автоматического выключателя и катушки измерительного трансформатора тока. Оптимальными по критерию снижения тока и соответствию прямому расчету (таблица) следует признать модели 6 и 2. Таким образом, можно сделать вывод о достаточности учета сопротивления дуги и пренебрежении в этом случае изменением сопротивления при нагреве кабеля.



Параметры режима сети 0,4 кВ при изменении расчетных условий:

а – значение тока в начальный момент времени;

б – уменьшение тока в сравнении с металлическим КЗ

Обсуждение. Использование специализированного сертифицированного международного программного обеспечения сейчас представляется затруднительным. В частности, в России нельзя легально приобрести программу ETAP. Компания «Schneider Electric», являющаяся ее правообладателем, приостановила свою деятельность в РФ, доступ к каталогу ее продуктов в настоящее время закрыт [8], а последние записи ее

местных представителей и дистрибьюторов датированы 2023 г. Опыт замены ЕТАР на отечественные аналоги в рамках программы импортозамещения нам неизвестен. Аналогичная ситуация складывается с другими программными средствами для выбора электрооборудования: NEPLAN (Швейцария), PSS/E (Германия).

Зависимость сопротивления дуги от величины тока приводит к необходимости выполнения итерационных расчетов с проведением корректировки параметров. Установлено, что итерационный процесс обладает удовлетворительной сходимостью и дает результат (в рамках погрешности менее 0,01 %) не позднее 7-й итерации.

В работе рассмотрено исключительно трехфазное КЗ, представляющее собой частный случай симметричного режима, однако для практических целей актуален расчет несимметричных режимов. В частности, параметры двухфазного КЗ используются при определении токов срабатывания защит и уставок срабатывания реле устройств защиты. Стандарты расчета несимметричных режимов различаются кардинально. Международные стандарты основаны на прямом использовании метода симметричных составляющих (декомпозиции режима на прямую, обратную и нулевую последовательность), в РФ используют метод эквивалентности прямой последовательности (инженерная методика, использующая соотношения между токами различных последовательностей, полученные при построении векторных диаграмм для характерных режимов). Согласование этих стандартов – отдельная и куда более сложная задача.

Выводы. Рассмотрен расчет токов КЗ в сети современного промышленного предприятия на всех уровнях напряжения. Для объекта исследования установлена стойкость к протеканию тока в аварийных режимах. Это обусловлено соответствующими проектными (установка на отходящих высоковольтных линиях токоограничивающих реакторов) и безопасными эксплуатационными (глубокое секционирование с раздельной работой отдельных секций) решениями. Также предприятие повышает свою надежность проведением мероприятий модернизации, в которые входят использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, замена воздушных линий кабельными с напряжением 110 кВ, интеграция в производственные циклы местного источника электроэнергии (ТЭЦ «Первомайская»).

Результаты работы следующие:

1. Подтверждена необходимость создания единого терминологического и понятийного аппарата на основе инженерного перевода документации и гармонизации общих определений.

2. Получены согласованные значения токов КЗ в сети выше 1 кВ, что подтверждает общность подходов к формированию расчетной модели и единство математического аппарата в различных стандартах.

3. Установлена необходимость дополнительного исследования и согласования подходов к формированию модели низковольтной сети.

4. Рассмотрены факторы, влияющие на уменьшение тока в сети до 1 кВ, в результате установлено превалирующее значение учета дуги и нагрева токопроводящих элементов при достаточности нагрева кабеля до температуры невозгораемости.

5. Построена и программно реализована математическая модель сети промышленного предприятия, которая может использоваться в учебном процессе при подготовке электроэнергетиков (направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»).

Основными направлениями продолжения работы являются верификация результатов и согласование методов расчета для несимметричных режимов, а также совершенствование методики оценки сопротивления дуги в точке КЗ.

Библиографический список

1. Абдурахманов А.М. Анализ зарубежной нормативно-технической документации и практических рекомендаций по расчету и координации токов короткого замыкания в электрических сетях // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 2. С. 3–23.

2. Беспалова Е.А. Развитие цифровых платформ и онлайн сервисов для обучения иностранным языкам // Современное инженерное образование: вызовы и перспективы: материалы III Национальной научно-практической конференции, Магнитогорск, 07–08 февраля 2024 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. С. 10–14.

3. Костина Н.Н. Особенности перевода лексики научно-технического текста: аббревиатурные единицы // Современное инженерное образование: вызовы и перспективы: материалы II Национальной научно-практической конференции, Магнитогорск, 07–08 февраля 2023 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. С. 396–399.

4. Исаев А.С. Сравнительный анализ методов расчета токов КЗ // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 8. С. 50–57.

5. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. URL: <https://en-res.ru/wp-content/uploads/2021/01/gost-28249-93.pdf?ysclid=mpjr84d8fe795730469> (дата обращения: 21.09.2025).

6. Исаев А.С., Колыхалов И.С. Моделирование электромагнитных переходных процессов // Современное инженерное образование: вызовы и перспективы: материалы III Национальной научно-практической конференции, Магнитогорск, 07–08 февраля 2024 года / под ред. Н.Н. Зер-

киной. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. С. 133–139.

7. Fisher L.E. Resistance of Low-Voltage AC Arcs // IEEE Transactions on Industry and General Applications. 1970. No. 6. P. 607–616.

8. «Schneider Electric». URL: <https://www.se.com/kz/ru/all-products/> (дата обращения: 21.09.2025).

A COMPARATIVE ANALYSIS OF STANDARDS FOR CALCULATION OF ELECTRIC POWER FACILITIES

A.S. Isaev, E.M. Chebanu

Abstract. *This article examines aspects of coordinating short-circuit current calculations performed in accordance with various regulatory documents. A large, modern chemical concern in the Tula region was chosen as the research object. A key feature of this study is its low-voltage network. The results of this study can be incorporated into the educational process for training electric power engineers.*

Keywords: *short circuit, periodic current component, mathematical modeling, transient resistance, Matlab, RastrWin, SimPowerSystems.*

Об авторах:

ИСАЕВ Андрей Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО НИ «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Новомосковск. E-mail: isaev.a.s@muctr.ru

ЧЕБАНУ Екатерина Михайловна – бакалавр, ФГБОУ ВО НИ «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Новомосковск. E-mail: k_epp@nirchtu.ru

About the authors:

ISAEV Andrey Stanislavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Mendeleev University of Chemical Technology, Novomoskovsk. E-mail: isaev.a.s@muctr.ru

CHEBANU Ekaterina Mikhailovna – Bachelor's, Mendeleev University of Chemical Technology, Novomoskovsk. E-mail: k_epp@nirchtu.ru