

УДК: 621.311.016.352: 621.3.014.3

DOI: 10.65599/ENG8031

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ УТОЧНЕННЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСА ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

А.Г. Каюмов, А.Р. Амонулов, М.К. Джаборов, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов

Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

Проведён комплексный обзор научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование методов расчёта токов короткого замыкания в современных электроэнергетических системах. Обоснована актуальность уточнения методик в условиях роста мощностей и внедрения сложного оборудования, указано на значительные погрешности стандартов, возникающие из-за упрощённых допущений. Проанализировано влияние ключевых факторов: качаний ротора, постоянных времени затухания, статической и динамической несинфазности синхронных генераторов, а также параметров современных кабельных линий. Рассмотрена специфика переходных процессов в установках с силовой электроникой, включая системы с нелинейными нагрузками и ветроэнергетические установки на базе машин двойного питания. Рекомендовано продолжить исследования по разработке уточнённых методик и расчётных моделей, обеспечивающих высокую точность результатов для оптимальной настройки релейной защиты, а также для снижения затрат при проектировании и замене оборудования электрических станций, сетей и систем в целом.

Ключевые слова: методика расчета токов короткого замыкания, качение ротора, статический и динамической несинфазности, синхронный генератор, машины двойного питания, ветроэнергетическая установка, погрешность расчетов.

ТАҲЛИЛИ РУШДИ УСУЛҲОИ ДАҚИҚШУДАИ ҲИСОБИ ҶАРАЁНИ РАСИШИ КҶҲОҲ БО НАЗАРДОШТИ МАҶМУӢ ОМИЛҲОИ ТАЪСИРРАСОН

А.Ғ. Қаюмов, А.Р. Амонулов, М.К. Ҷаборова, Д.С. Аминов, Б.И. Қосимов

Донишқадаи энергетикӣи Тоҷикистон, н. Кушониён, Республика Таджикистан

Шарҳи ҳамаҷонибаи корҳои илмӣ-тадқиқотӣ, ки ба тақмили усулҳои ҳисоби ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ дар низомҳои мӯсоири электроэнергетикӣ равона шудаанд, гузаронида шуд. Зарурияти дақиқсозии усулҳо дар шароити афзоиши тавоноии ва ҷорисозии таҷҳизоти мураккаб асоснок карда шудааст, ба ҳатоғҳои назарраси стандартҳо, ки бинобар фарзияҳои соддакардашуда ба вуҷуд меоянд, ишора шудааст. Таъсири омилҳои калидӣ таҳлил карда шуд: лапишҳои ротор, доими вақти хомӯшшавӣ, ғайрифазাগии статикӣ ва динамикии генераторҳои синхронӣ, инчунин параметрҳои хатҳои кабелӣ мӯсир. Хусусиятҳои равандҳои гузариш дар дастгоҳҳои дорои электроникаи куввагӣ, аз ҷумла системаҳои дорои бори ғайрихаттӣ ва дастгоҳҳои бодӣ дар заминаи мошинаи манбаи таъминоташ дутога баррасӣ шудаанд. Тавсия дода мешавад, ки тадқиқотҳо оид ба таҳияи усулҳои дақиқ ва моделҳои ҳисоббарорӣ идома дода шаванд. Ин усулҳо дақиқии баланди натиҷаҳо барои танзими оптималии ҳифзи релей, инчунин коҳиш додани хароҷот ҳангоми лоиҳакашӣ ва иваз намудани таҷҳизоти неругоҳҳои барқӣ, шабакаҳо ва умуман низомҳои энергетикӣ таъмин менамоянд.

Калидвожаҳо: методикаи ҳисоби ҷараёни расиши кӯтоҳ, лапиши ротор, ғайрифазাগии статикӣ ва динамикӣ, генератори синхронӣ, мошинаи дорои гизодиҳии дукарата.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF REFINED METHODS FOR CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS TAKING INTO ACCOUNT A COMPLEX OF INFLUENCING FACTORS

A.G. Kayumov, A.R. Amonuloev, M.K. Jaborov, D.S. Aminov, B.I. Kosimov

Institute of Energy of Tajikistan, Kushoniyon District, Republic of Tajikistan

A comprehensive review of research papers aimed at improving methods for calculating short-circuit currents in modern power systems has been conducted. The study justifies the necessity of refining calculation techniques in the context of increasing power capacities and the implementation of complex equipment, highlighting significant errors in existing standards due to simplified assumptions. The impact of key influencing factors is analyzed: rotor swings, decay time constants, static and dynamic phase shifts (non-synchronism) of synchronous generators, and the parameters of modern cable lines. Furthermore, the specifics of transient processes in installations with power electronics are considered, including systems with non-linear loads and wind power plants based on doubly-fed induction machines. It is recommended to continue research into developing refined methodologies and computational models that ensure high accuracy of results for optimal relay protection settings, as well as for cost reduction during the design and replacement of electrical equipment for power plants, grids, and power systems as a whole.

Keywords: short-circuit current calculation method, rotor rolling, static and dynamic out-of-phase, synchronous generator, double-fed machines.

Введение

Исторически сложилось так, что при замене электрооборудования и проектирования, а также эксплуатации электростанций, электрических сетей среди других выполняемых расчетов или исследовательских работ переходным процессам уделяется особое внимание, особенно в анализе аварийных режимов. Одним из тяжёлых аварийных режимов являются токи коротких замыканий (КЗ) и становится критически важным в условиях непрерывного роста их уровней, вызванного концентрацией мощных источников питания в узлах среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. На сегодняшний день из-за учета различных наборов влияющих факторов и разных методов определения токов КЗ существует ряд российских и зарубежных регламентирующих документов в

сетях до 1 кВ и выше 1 кВ [1-4, 45]. Деятельность ведущих организаций по стандартизации: Государственный стандарт Российской Федерации (ГОСТ РФ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Совместные стандарты, разработанные Американским национальным институтом стандартов (ANSI) и Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) (ANSI/IEEE), Британский институт стандартов (BSI) и Немецкий институт по стандартизации (DIN), а также структура их документов приведены в работе [5]. Среди них автор выделяет основные четыре системы стандартов: МЭК, ANSI/IEEE, BSI и ГОСТ РФ. Описываются современные подходы к расчету токов КЗ, в частности метод эквивалентного источника напряжения, который позволяет определять начальные, ударные и установившиеся значения токов КЗ для выбора электрооборудования и настройки релейной защиты.

Следует отметить, что изначально при составлении основных алгоритмов расчета токов КЗ, согласно вышеуказанных стандартов, силовое электрооборудование преимущественно было почти однотипным, мощность большинства источников питания ограниченной, а состав потребителей электроэнергии менее разнообразным. Для упрощения решения задачи КЗ в сложных замкнутых схемах электроэнергетической системы (ЭЭС) и нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений в данных стандартах был принят ряд допущений. Последствия этого неизбежно влияют на точность результатов, иногда приводят к некорректным или неоправданно завышенным значениям токов КЗ. В условиях современной рыночной экономики при выборе или замене электрооборудования особое внимание уделяется материальным затратам. Техничко-экономическое обоснование проектов требует отказа от неоправданных и избыточных запасов электродинамической стойкости, статической и динамической устойчивости, а также отключающей способности коммутационных аппаратов. В связи с этим требования к методике проведения и точности результатов токов КЗ ежегодно возрастают, что подтверждает актуальность совершенствования точности расчета токов КЗ.

Целью данной статьи является обзор выполненных теоретических, научно-исследовательских и практических работ, направленных на совершенствование методов расчета путем учета различных факторов, влияющих на токи КЗ как в начальный, так и в произвольный моменты времени (рис.1).

Наиболее актуальные проблемы обеспечения точности прогнозных расчетов токов КЗ в современных электроэнергетических системах четко обозначены в работе [6]. Повсеместное использование квазистационарных методов и идеализированных допущений, закрепленных в действующих руководящих указаниях, таких как игнорирование предшествующих режимов, свободных составляющих высших гармоник, изменение скорости вращения ротора и упрощенное моделирование синхронных генераторов (СГ), приводит к значительным погрешностям при расчетах токов КЗ вблизи источников питания, а также в месте возникновения КЗ. Также подчеркивается необходимость перехода от универсальных упрощенных подходов к дифференцированному моделированию элементов сети в зависимости от конкретной технической задачи — релейной защиты, оценки коммутационной способности аппаратуры или динамической устойчивости ЭЭС рис. 1. В качестве практического решения предлагается комплексное совершенствование нормативно-методической базы и программного обеспечения в части корректного учета начальных условий, параметров регулирования напряжения и повышенных потерь в переходных режимах.



Рисунок 1 – Причины недостаточности расчетов токов КЗ

Figure 1 – Reasons for the insufficiency of short-circuit current calculations

Обзор численных методов расчета токов КЗ в современных ПК

Ряд проблем достоверности расчетов токов КЗ рассмотрен в работе [7]. Подчеркивается основная проблема неприемлемых результатов расчёта в низкой и неопределенной достоверности современных методов расчета токов КЗ, выполняемых согласно ГОСТам с помощью стандартных программно-вычислительных комплексов (ПВК). Это вызвано тем, что реальные процессы в ЭЭС описываются «жесткими» системами нелинейных дифференциальных уравнений, которые имеют трудные решения и в некоторых случаях практически не имеющие решения. Результаты исследования на примере Томской ЭЭС, полученные с помощью ПВК Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), сопоставлены относительно двух ПВК: Eurostag и АРМ СРЗА, которые получили широкое использование в ЭЭС России, и выявлены их недостатки. В ПВК Eurostag часто не учитывают трансформаторную ЭДС в уравнениях статора электрических машин. Это ведет к потере апериодической составляющей тока КЗ и значительным погрешностям до 31% при расчете ударного тока КЗ рис.2. Специализированные комплексы (на примере АРМ СРЗА) используют установившиеся модели и алгебраические методы. Апериодическая составляющая тока КЗ здесь учитывается через упрощенный ударный коэффициент, что не позволяет точно моделировать происходящий процесс в реальной сложной сети. Предлагается решение гибридного подхода вместо чисто численного интегрирования (традиционный подход). Использование непрерывного неявного параллельного интегрирования уравнений, что исключает необходимость упрощения моделей. Математические переменные (напряжения) преобразуются в реальные физические токи на модельном уровне. Это позволяет достоверно воспроизводить коммутационные процессы без ограничений на размерность схемы. Погрешность расчета тока КЗ в популярных ПВК АРМ СРЗА может достигать 6–38% в зависимости от удаленности точки КЗ рис. 2.

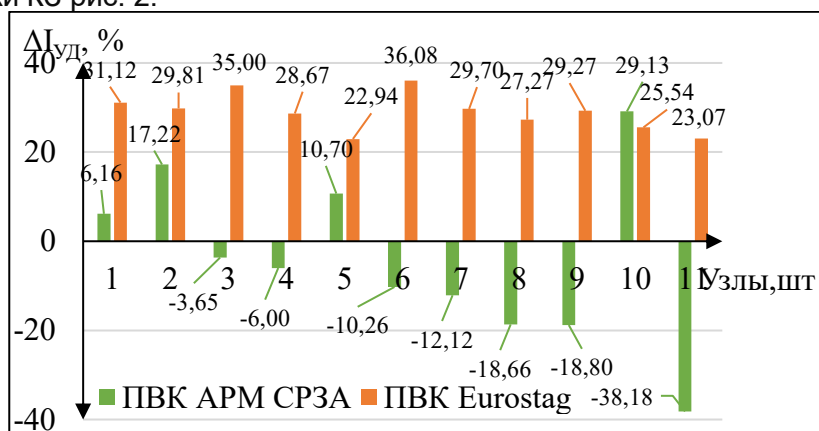


Рисунок 2 – Погрешности действующих значений ударных токов трехфазных КЗ относительно ВМК РВ ЭЭС
Figure 2 – Errors in the RMS values of three-phase short-circuit peak currents relative to the IEC/TR 60909-1 standard

Продолжая свою научную работу, была проведена верификация аварийных режимов в [8-9], включая КЗ путем сопоставления результатов расчетов ПВК с данными модельного эталона ВМК РВ ЭЭС, что позволяет выявить значительные погрешности, возникающие из-за упрощений математических моделей. Выполнено влияние параметров СГ на результаты расчетов погрешности. Путем экспериментального исследования выявлено что СГ, которые являются более манёвренными, когда их параметры в неполной мере учитываются, приводят к более значительным погрешностям. В процессе такой проверки оценена достоверность результатов ударных токов КЗ и переходных процессов. Сравнение моделирования в ВМК РВ ЭЭС с данными реальных регистраторов аварийных событий («черных ящиков») показало высокую точность — отклонение составило не более 9%.

Влияние потребления электроэнергии (нелинейных нагрузок) на токи КЗ

Другая выполненная научно-исследовательская работа [10] посвящена уточнению методики расчета симметричных токов КЗ в системах электроснабжения, например, где значительную долю составляют нелинейные нагрузки, такие как электронная преобразовательная техника. На основе использованных источников [11-15] составлены расчетные математические модели элементов ЭЭС и алгоритмов расчета токов КЗ с учетом высших гармоник. Наличие нелинейных потребителей вызывает появление высших гармоник, которые существенно влияют на параметры сети,

увеличиваются активные и индуктивные сопротивления элементов (линий, трансформаторов), изменяют условия работы вращающихся электрических машин и создают дополнительную подпитку места повреждения токами высших гармонических составляющих. Влияние нелинейных нагрузок проявляется в росте суммарного тока КЗ и необходимости учета реального доаварийного несинусоидального режима, так как игнорирование этих факторов ведет к большим погрешностям при выборе защитного оборудования и снижению надежности всей системы.

Влияние полупроводниковых преобразователей (выпрямители и инверторы) на токи КЗ на примере структуры современных автономных систем электроснабжения исследовано в работе [16]. Влияние на токи КЗ - тяговые электродвигатели оказывают возможность генерировать ток в месте повреждения на шинах звена постоянного тока через обратные диоды инвертора, при этом величина такого тока напрямую коррелирует с частотой вращения и нагрузкой двигателя [17-18]. Кроме того, наличие силового конденсатора на входе инвертора и зависимость тока КЗ от индуктивных характеристик генератора, который может работать с переменной частотой вращения, создают дополнительные сложности при определении параметров аварийных режимов в цепях постоянного тока. Проблема заключается в необходимости учета высокочастотных процессов и динамического изменения сопротивления цепи, что требует перехода от упрощенных алгебраических моделей к детальному математическому описанию переходных процессов в полупроводниковых структурах. Игнорирование влияния параметров инвертора и специфики тяговой нагрузки ведет к существенным погрешностям при определении ударных токов КЗ. Это, в свою очередь, ставит под угрозу сохранность дорогостоящей силовой электроники и литий-ионных накопителей. Таким образом, развитие методов расчета токов КЗ должно идти по пути создания специализированных моделей, учитывающих алгоритмы управления преобразователями и их поведение в критических режимах.

Обзор погрешности расчета токов КЗ из-за некорректного моделирования источников питания

Авторы [19-21] провели сравнение статических методов расчета токов КЗ, регламентированных стандартами МЭК-60909 2001 и ANSI/IEEE 37.010.1979, с результатами динамического моделирования, используя программное обеспечение Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program (ATP/EMTP) для синхронных генераторов. Подчеркивается, что стандарты МЭК и ANSI/IEEE не учитывают переходные T_d' и сверхпереходные T_d'' постоянные времени по продольной оси d при неустойчивом КЗ, которые определяют поведение генераторов в первый период времени КЗ. Исследование проводилось на примере схемы, имеющей один [18] и два генератора [17], соединённых к ЭЭС через повышающий силовой трансформатор и ЛЭП. Варьировались параметры T_d'' для генератора большой мощности от 11 до 51 мс, а для генератора небольшой мощности от 3 до 9 мс. Согласно проведенному исследованию для генераторов с малыми значениями T_d'' погрешность расчетов по отношению к стандартам может превышать 40%. Для начального периода симметричного тока КЗ I_k'' погрешность расчетов составила по отношению стандарта МЭК 41,91%, а по отношению стандарта ANSI -50,37% в определенных топологиях. В случае более мощных генераторов с большими постоянными времени или при увеличении электрического расстояния до места КЗ, что эквивалентно увеличению значения T_d'' , результаты стандартов становятся относительно результатов динамического моделирования приемлемыми, соответственно погрешность значительно снижается.

Таблица 1 – Погрешности результатов расчетов токов КЗ в процентах по отношению к ATP/EMTP
Table 1 – Percentage errors of short-circuit current calculation results relative to ATP/EMTP

Место КЗ	Однофазный ударный ток КЗ на землю			Трёхфазный ударный ток КЗ			Однофазный начальный ток КЗ на землю			Трёхфазный начальный ток КЗ		
	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин	ANSI	МЭК макс	МЭК мин
N1	-23,8	-13	2,39	-37,2	-25,2	-8,11	-23,8	-13	2,39	-37,2	-25,2	-8,1
N2	-18,2	-6,28	3,37	-27,1	-14,3	-4,03	-18,2	-6,28	3,37	-27,1	-14,3	-4
N3	-18	-5,02	5,58	-27	-12,8	-1,67	-18	-5,02	5,58	-27	-12,8	-1,7
N4	-21,3	-3,72	9,8	-30,4	-11,2	3,25	-21,3	-3,72	9,8	-30,4	-11,2	3,25

В других выполненных работах авторами [22-25] исследуется влияние динамических характеристик генератора на распределение токов при трехфазном КЗ в наиболее простой схеме энергосистемы, подчеркивая, что нарушение баланса моментов на валу турбины-генератора вызывает электромеханический переходный процесс, выражающийся в изменении углов ротора и ЭДС генераторов. Колебания этих углов, вызванные качанием ротора, существенно влияют на характер и распределение токов, что при игнорировании данного фактора (особенно при длительном продолжении КЗ больше, чем 0,15 с) может привести к недопустимым ошибкам в расчетах КЗ. Опираясь на предшествующие исследования [21-23], в которых рассматривалось влияние качания ротора на токи КЗ в один источник системы и на общих шинах, а также расчет динамики генераторов, в работе [22] дополняется их качественным анализом более 2 источников питания в системе. Пренебрежение динамикой ротора в традиционных расчетах токов КЗ ведет к искажению относительно реальных токов КЗ, в то время как стандартные методы показывают непрерывное затухание токов, учет качания ротора выявляет их осциллирующий характер, при котором токи в отдельных ветвях могут повторно возрастать и даже значительно превышать начальные значения (например, ток в линии связи может увеличиться в 3,14 раза [22]). В то же время суммарный ток повреждения, рассчитанный как векторная сумма, зачастую оказывается ниже значений, полученных традиционными методами.

Даны оценки влияния статической несинфазности генераторов на погрешности расчета токов КЗ работе [26-29], которые в текущих стандартах не учитываются и считаются синфазными всех источников. Авторы доказывают, что пренебрежение реальным угловым сдвигом фаз между ЭДС генераторов и энергосистемы в режиме, предшествующем КЗ, ведет к методической погрешности и существенному завышению расчетных значений периодической составляющей тока КЗ вплоть до 14%. В ходе исследования на основе приведенной математической формулы в программном комплексе Mathcad была разработана математическая модель, в которой варьировались три ключевые группы параметров: режимные характеристики (активная P_g и реактивная Q_g мощности СГ, конструктивные особенности (сверхпереходные индуктивные сопротивления X_d'' различных серий гидрогенераторов) и электрическая удаленность от системы (длина линии электропередачи от 5 до 150 км) [26]. В исследовании показана прямая зависимость: рост активной мощности и увеличение электрической удаленности генератора приводят к увеличению угла расхождения фаз (несинфазности), что, в свою очередь, увеличивает методическую погрешность стандартных «скалярных» расчетов, делая векторное сложение токов необходимым для точной координации оборудования и исключения избыточных требований к его электродинамической стойкости.

Авторы [26-27], продолжая свои работы по уточнению методики расчета токов КЗ путем влияющих факторов, в работе [28-29] исследовали механическую инерцию агрегата у генераторов с малой инерцией угла мощности, которая может достигать 145 эл. град. и более, что приводит к тому, что через 0,23 с после начала КЗ подпитка от СГ прекращается (вклад становится нулевым или отрицательным), в то время как у СГ с большой инерцией снижение вклада тока за этот же период достигает 25%. Параметры обмоток ротора, характеризующиеся сверхпереходной постоянной времени T_d'' , также существенно влияют на процесс: разброс значений вклада тока СГ из-за этого параметра может достигать 15% от начального значения, так как скорость изменения токов в роторе напрямую определяет скорость роста угла мощности. Параметры обмоток статора и связанная с ними постоянная времени затухания апериодической составляющей T_a оказывают влияние преимущественно на начальной стадии КЗ, где количественное изменение вклада тока СГ может составить до 21% от его начального значения. Таким образом, суммарное влияние динамических факторов приводит к тому, что к моменту срабатывания защиты (0,1 – 0,15 с) фаза тока СГ может отличаться от фазы тока сети на 90 и более градусов, фактически уменьшая общий ток КЗ.

Еще одной из причин недостоверности результатов может быть повсеместное использование устаревших нормативных документов и упрощенных формул из кабельных каталогов, что приводит к расчету неверных параметров сопротивления современных кабельных линий (КЛ) 6–500 кВ [30]. Использование некорректных значений прямой и нулевой последовательностей (R_1 , X_1 , R_0 , X_0), которые не учитывают схему заземления, сечение экранов и расстояние между кабелями, ведет к существенному занижению токов короткого замыкания (КЗ). В то же время применение корректных

параметров, специфичных для современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и медными экранами, показывает, что реальные токи КЗ могут быть на 20–30% и более выше расчетных: в частности, уточнение данных может привести к росту тока трехфазного КЗ на 17%, а однофазного — на 35%.

Тенденции развития ВЭИ и их влияние на токи КЗ

В последние годы, кроме синхронных генераторов, также чаще используется машина двойного питания [31], и их характеры при переходных процессах становятся актуальными, так как они используются в ветровых электростанциях, объединённых в группы, существенно различаются и имеют обширную взаимосвязь между ветровыми электростанциями и сетью, и эти факторы усложняют анализ переходных процессов в ЭЭС, параллельно работающий с групповыми ветровыми электростанциями. Традиционные методы расчета КЗ становятся неточными для систем с высокой долей возобновляемых источников энергии из-за сложного взаимодействия между силовым оборудованием и системами управления преобразователям. В таблице 2 показаны основные типы генераторов, используемых на электростанциях, и ключевые факторы, влияющие на переходные процессы, особенно при подпитке тока к месту КЗ.

Таблица 2 – Основные типы источников питания в ВЭИ
Table 2 – Main types of power supplies in RES

Тип генератора	Ключевые факторы влияния на ток КЗ	Особенности переходного процесса	Точность традиционных моделей
Машина двойного питания (DFIG)	Параметры управления преобразователями (RSC, GSC), система ФАПЧ (PLL), стратегия LVRT.	Активное регулирование тока ротора; зависимость от глубины провала напряжения и реактивной поддержки.	Низкая (требуются уточненные аналитические модели).
Индукционный генератор (ИГ)	Изменение скольжения ротора, потокосцепления статора и ротора.	Сильная связь между индукционным током и узловым напряжением сети.	Низкая при использовании фиксированной скорости вращения.
Генератор с пост. магнитами (ГПМ)	Конструкция ротора (сегментация магнитов), отсутствие обмотки возбуждения.	Отсутствие переходных реактивностей; возможно полное смещение тока от нулевой оси.	Требуется конечно-элементное моделирование для учета размагничивания.
Асинхронный двигатель	Мощность машины (малая или крупная).	Несовпадение пиков вклада двигателя и сети не критично для общей точности.	Высокая для крупных машин; до 18% погрешности для малых.

В работе [32] предлагаются упрощенные эквивалентные модели к детальному анализу переходных процессов, который учитывает индивидуальные рабочие характеристики каждого ветропарка. Ключевыми факторами, влияющими на токи короткого замыкания в таких системах, являются характеристики контроллеров преобразователей и стратегия низковольтного сквозного управления (LVRT) [33–34]. В отличие от традиционных генераторов машина двойного питания активно регулирует ток ротора во время КЗ для поддержки напряжения в сети, что делает выходной ток КЗ зависимым от параметров управления преобразователем и глубины падения напряжения [35] на клеммах генератора, электромагнитные характеристики машины и стратегии управления преобразователями (RSC и GSC). Кроме того, на величину тока существенно влияют сильная

электромагнитная связь между ветропарками и удаленность каждого из них от точки происхождения КЗ, из-за чего их переходные процессы становятся уникальными и не могут рассматриваться как единое целое. При несимметричных КЗ для ветроэнергетических установок на базе генераторов двойного питания авторы [33] разработали уточненный метод аналитического расчета токов КЗ. Основной акцент сделан на том, что на величину и характер тока КЗ критически влияют динамика системы фазовой автоподстройки частоты (PLL/ФАПЧ), вызывающая ошибки отслеживания фазы при скачках напряжения, и алгоритмы управления преобразователем роторной цепи (RSC), включая стратегии сквозного управления при низком напряжении (LVRT). Влияющими факторами также являются глубина провала напряжения, параметры пропорционально-интегральных контроллеров системы управления и электромагнитная связь между составляющими прямой и обратной последовательностей, которые определяют наличие в токе КЗ периодических, затухающих и апериодических составляющих. В работе [34] также разработан усовершенствованный аналитический метод расчета токов КЗ в распределительных сетях с несколькими индукционными генераторами (ИГ) с фиксированной и переменной скоростью вращения, основанного на модели эквивалентного источника тока. Основными факторами, влияющими на величину и характер тока КЗ, являются изменение скольжения ротора во время аварии, которое существенно искажает расчеты при использовании упрощенных моделей с фиксированной скоростью, а также сильная связь между индукционным током генераторов и узловыми напряжениями сети, особенно при высокой доле проникновения возобновляемых источников (низком отношении мощности КЗ к мощности генератора). Кроме того, на переходные процессы влияют электромагнитные характеристики (потокосцепление статора и ротора), параметры преобразователей для генераторов с переменной скоростью и тип повреждения (симметричное или асимметричное), определяющие наличие периодических, затухающих и апериодических составляющих в токе. В работе [36] предложен улучшенный метод расчета тока короткого замыкания для ветряных турбин на базе асинхронных генераторов двойного питания (DFIG) с учетом режима непрерывного возбуждения. В отличие от предыдущих исследований, автор учитывает современные требования стандартов энергосистем (в частности, китайских), согласно которым генератор не должен отключаться при аварии, а обязан продолжать работу и выдавать реактивный ток для поддержки напряжения в сети. На основе анализа характеристик переходного эквивалентного потенциала были разработаны переходная модель и метод расчета как начального, так и установившегося значения тока короткого замыкания. Достоверность предложенного метода была подтверждена экспериментально с помощью цифро-аналоговой платформы RTDS, показавшей высокую точность расчетов (погрешность менее 3% для начального момента и менее 2% для установившегося режима).

Сравнение ударных значений токов КЗ асинхронных двигателей, полученных в результате измерений и компьютерного моделирования, с результатами расчетов по стандартам IEC и ANSI приведены в статье [37]. Исследование показало, что, несмотря на существенные различия в форме реальных волновых сигналов и упрощенных моделей, используемых в стандартах (основанных на векторах промышленной частоты), стандартизированные методы обеспечивают удивительно точные результаты для практического применения. Установлено, что погрешность расчетов по стандартам выше для двигателей малой мощности (до 14–18%), в то время как для крупных машин погрешность расчетов КЗ снижается, что подтверждает применимость традиционных инженерных методик даже в условиях сложных переходных процессов. Кроме того, авторы выяснили, что несовпадение во времени пиков вклада двигателя и энергосистемы в общий ток повреждения не оказывает критического влияния на итоговую точность расчетов.

Влияние стратегии управления поддержкой реактивной мощности на расчет токов КЗ и методы анализа КЗ для ветрогенераторов с двойным питанием (DFIG) рассматривается в работе статьи [38–41]. Традиционные методы расчетов часто игнорируют вклад реактивной мощности во время переходных процессов, ошибочно предполагая блокировку роторного преобразователя, что приводит к погрешностям. В работе предложены новая переходная модель и эквивалентная схема DFIG, учитывающая современные требования (в частности, стандарты Китая), согласно которым генератор должен активно поддерживать напряжение в сети в режиме LVRT (прохождения через провалы напряжения). Исследование, подтвержденное экспериментами на платформе RTDS,

демонстрирует, что предложенный метод расчета обладает более высокой точностью по сравнению с традиционными подходами и позволяет более корректно анализировать режимы работы энергосистем с высокой долей ветрогенерации.

Глубокому анализу процессов внезапного трехфазного КЗ в мощных синхронных генераторах с постоянными магнитами (ГПМ) посвящены работы [42,43]. Ключевое отличие ГПМ от традиционных машин с обмоткой возбуждения заключается в отсутствии переходных параметров (реактивностей и постоянных времени), что приводит к специфическим формам токов, где затухающая апериодическая составляющая тока КЗ может полностью смещать переменный ток в одну сторону от нулевой оси. Предлагается комплексный метод расчета всех необходимых параметров с использованием как быстрых аналитических подходов, так и точного конечно-элементного моделирования, которое критически важно для оценки риска размагничивания постоянных магнитов под воздействием токов повреждения. Обоснована применимость классической теории цепей к ГПМ при условии корректного определения эквивалентных параметров ротора и учета влияния его конструктивных особенностей, таких как сегментация магнитов или наличие проводящих бандажей.

На базе машины двойного питания (DFIG) в работе [43] проведен анализ тока КЗ ветрогенератора при частичных и несимметричных просадках напряжения в сети. В работе предложены аналитические выражения и эквивалентные модели прямой и обратной последовательностей для расчета токов КЗ на начальной и установившейся переходных режимов, учитывающие как электромагнитные переходные процессы в обмотках, так и динамическую реакцию системы управления преобразователем ротора. Работа преобразователя при несимметричных КЗ приводит к появлению специфического напряжения обратной последовательности в роторе, что отличает переходные процессы DFIG от традиционных генераторов. Были подтверждены полученные результаты компьютерного моделирования с физических испытаний на КЗ.

Выводы

1. Действующие нормативные регламентирующие стандарты (ГОСТ, МЭК, ANSI/IEEE) и некоторые ПВК, которые проводят расчет токов КЗ на основе этих стандартов из-за принятых допущений, часто дают существенные погрешности относительно реальных токов КЗ. Это связано с использованием упрощенных алгебраических моделей и игнорированием динамических факторов, таких как качание ротора, переходные постоянные времени генераторов и их начальные режимы работы, и влияние современной силовой электроники.

2. Массовое внедрение нелинейных нагрузок, полупроводниковых преобразователей и систем возобновляемой энергетики (ветропарков на базе DFIG, ИГ, ГПМ) делает классические методики неприемлемыми. Токи КЗ в таких системах теперь напрямую зависят не только от физических параметров машин, но и от алгоритмов управления преобразователями, работы систем фазовой автоподстройки частоты (PLL/ФАПЧ) и стратегий поддержки напряжения в сети (LVRT).

3. Для обеспечения достоверности расчетов требуется переход к более детальному моделированию элементов системы:

➤ Для кабельных линий: учет реальных схем заземления и параметров современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена может выявить токи КЗ на 20–35% выше расчетных.

➤ Для генераторов: необходим учет статической и динамической несинфазности (углового сдвига фаз ЭДС), пренебрежение которой ведет к завышению периодической составляющей тока от 14% до 24 %.

➤ Для двигателей: важен учет инерции и мощности машин, так как для двигателей малой мощности погрешности стандартов могут достигать 14–18%.

4. Современные технико-экономические обоснования требуют отказа от чрезмерных запасов прочности оборудования в пользу точных расчетов. Проведенный анализ является теоретическим фундаментом для создания уточненной методики, которая позволит избежать неоправданных запасов по электродинамической стойкости оборудования, обеспечивая при этом надежность работы всех элементов ЭЭС в целом. Рекомендуется продолжение исследований и разработок усовершенствованных методов, а также проверка результатов работы программного обеспечения с

регистраторов неисправностей, что помогает уменьшить отклонение расчетных данных от фактических КЗ.

*Рецензент: Абдуллозода Р.П. — к.т.н., доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергетических систем»
ТПУ имени академика М.С. Осими*

Литература

- ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
- IEC 60909-0-2016. Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems. Part 0: Calculation of Currents.
- ANSI/IEEE Std. C37.010. IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. – 2016.
- ANSI/IEEE Std. C37.13-1981. IEEE Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
- Абдурахманов, А. М. Анализ зарубежной нормативно-технической документации и практических рекомендаций по расчёту и координации токов короткого замыкания в электрических сетях / А. М. Абдурахманов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 3–23.
- Ковалёв, Б. И. Основные причины недостаточной точности и задачи повышения качества расчётов токов короткого замыкания в электрических системах / Б. И. Ковалёв // Токи короткого замыкания в энергосистемах: тезисы докладов Всероссийской конференции / под общ. ред. А. Ф. Дьякова. – М.: РАО «ЕЭС России», 1995. – С. 8–11.
- Суворов, А. А. Проблема достоверности расчётов токов коротких замыканий в электроэнергетических системах и средства их всережимной верификации / А. А. Суворов, А. С. Гусев, М. В. Андреев, С. А. Ставицкий // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2018. – № 2. – С. 13–25.
- Суворов, А. А. Всережимная верификация расчётов при анализе динамической устойчивости электроэнергетических систем / А. А. Суворов, А. С. Гусев, М. В. Андреев, А. Б. Аскаров // Электричество. – 2020. – № 11. – С. 28–37. – DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-28-37.
- Глебов, И. А. Методика обработки опытных данных внезапного трёхфазного короткого замыкания гидрогенератора / И. А. Глебов, Е. Ф. Харламова // Известия РАН. Энергетика. – 1999. – № 3. – С. 153–157.
- Савина, Н. В. Учёт нелинейных нагрузок при расчёте коротких замыканий / Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов, Л. А. Мясоедова, И. Г. Подгурская // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2014. – Вып. 65. – С. 63–72.
- Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев; отв. ред. М. Л. Левинштейн, Л. А. Суханов. – 2-е изд., доп. – Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1985. – 502 с.
- Гамазин, С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, В. А. Ставцев, С. А. Цырук. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 424 с.
- Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: учебник для вузов по специальности «Электроснабжение» / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.: ил. – ISBN 5-283-0319-8.
- Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
- Сивокобыленко, В. Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций: учеб. пособие / В. Ф. Сивокобыленко. – Донецк: Донецкий политехнический институт, 1984. – 116 с.
- Дубовик, Д. В. Теоретические аспекты и проблемы расчёта токов короткого замыкания системы электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа / Д. В. Дубовик, Т. В. Голубчик, А. С. Дьяков, Р. А. Закиров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 5–20. – DOI: 10.14529/engin230401.
- Николаев, А. А. Алгоритм расчёта начальных значений токов короткого замыкания и остаточных напряжений при параллельной и раздельной работе для собственной электростанции металлургического предприятия.
- Григорьев, А. В. Теоретические вопросы расчёта токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 1095–1103.
- Papadopoulos, T. A. Static and Dynamic Calculation of Short-Circuit Currents in Synchronous Generators / T. A. Papadopoulos, Ch. G. Kalaoudas, P. N. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papadiannis // International Conference on Power Systems Transients (IPST2011), Delft, the Netherlands, 14–17 June 2011.
- Kaloudas, C. G. Short-Circuit Analysis of an Isolated Generator and Comparative Study of IEC, ANSI and Dynamic Simulation / C. G. Kaloudas, P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papagiannis // 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, 2010. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1049/cp.2010.0922.

21. Berizzi, A. Short-Circuit Current Calculation: a Comparison Between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference / A. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, S. Massucco // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference. Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, Toronto, ON, Canada, 1993. – Pp. 1420–1427, vol. 2. – DOI: 10.1109/IAS.1993.299168.
22. Stojanovic, D. Generator Dynamics Influence on Currents Distribution in Fault Condition / D. Stojanovic, J. Nahman, M. Veselinovic // 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries (MeleCon 2000), Lemesos, Cyprus, 2000. – Pp. 1047–1050, vol. 3. – DOI: 10.1109/MELCON.2000.879714.
23. Stojanovic, D. Influence of Relative Rotor Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, N. Mitrovic, M. Veselinovic // Conference Juko-Cigre, R23-05, Vrnjacka Banja, May 1995. (на сербском языке).
24. Stojanovic, D. Influence of Relative Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, M. Veselinovic // UPEC'96, Iraklio, Crete, Greece, 1996. – Vol. 3. – Pp. 1016–1019.
25. Stojanovic, D. P. Calculation and Analysis of Generator Dynamics Influence on Short Circuit Current / D. P. Stojanovic, J. M. Nahman, M. O. Veselinovic // MELECON'98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Tel-Aviv, Israel, 1998. – Pp. 1131–1134, vol. 2. – DOI: 10.1109/MELCON.1998.699409.
26. Гусев, Ю. П. Учёт несинфазности генераторов при расчётах токов в начальный момент короткого замыкания / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов, В. В. Говорин // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 11–17. – DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
27. Kayumov, A. G. Influence of Out-of-Phase of Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Power Systems / A. G. Kayumov, Y. P. Gusev, V. V. Govorin // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2018. – Pp. 107–113. – DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544340.
28. Гусев, Ю. П. Влияние динамической несинфазности синхронных генераторов на токи коротких замыканий в электроэнергетических системах / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов // Электричество. – 2021. – № 3. – С. 26–32. – DOI: 10.24160/0013-5380-2021-3-26-32.
29. Гусев, Ю. П. Влияние систем возбуждения синхронных генераторов на несинфазность токов короткого замыкания в электроэнергетической системе / Ю. П. Гусев, А. Г. Каюмов, В. В. Говорин // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 3. – С. 30–33.
30. Дмитриев, М. В. Токи короткого замыкания в электрических сетях, содержащих современные кабельные линии 6–500 кВ / М. В. Дмитриев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 3(78). – С. 82–86.
31. Косимов, Б. И. Применение асинхронизированных синхронных генераторов в качестве альтернативных источников электроэнергии для малых и средних рек / Б. И. Косимов, Н. С. Шарбатов, Д. С. Аминов [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1(73). – С. 28–34. – DOI: 10.65599/ENG3328. – EDN KXWHTF.
32. Faria, V. The Influence of Field Voltage Variation in the Sudden Three-Phase Short-Circuit Test. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test. – November 2018.
33. Faria, V. A. D. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test / V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 114. – Art. 105421. – ISSN 0142-0615. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
34. Wang, H. Simulation of Three-Phase Short Circuit Electromagnetic Transient Process of Synchronous Generator / H. Wang // Vibroengineering PROCEDIA. – 2020. – Vol. 35. – Pp. 33–38. – DOI: 10.21595/vp.2020.21800.
35. Yin, J. A New Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method Suitable for Doubly Fed Wind Farm Groups / J. Yin, W. Qian, X. Huang // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Art. 8372. – DOI: 10.3390/s23208372.
36. Zhang, L. Analytical Calculation of Stator Short Circuit Current of DFIG Considering PLL Dynamics Under Asymmetric Fault / L. Zhang, S. Li, S. Xu, X. Zhou, S. Li, Q. Xu, J. Shen, W. Zhao, J. Song, T. Wang // Energy Reports. – 2025. – Vol. 14. – Pp. 3547–3562. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.10.027.
37. Zhou, N. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators / N. Zhou, F. Ye, Q. Wang, X. Lou, Y. Zhang // Energies. – 2016. – Vol. 9. – Art. 277. – DOI: 10.3390/en9040277.
38. Li, J. Short-Circuit Current Calculation and Harmonic Characteristic Analysis for a Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine Under Converter Control / J. Li, T. Zheng, Z. Wang // Energies. – 2018. – Vol. 11. – Art. 2471. – DOI: 10.3390/en11092471.
39. Yin, J. Improved Short-Circuit Current Calculation of Doubly Fed Wind Turbines With Uninterrupted Excitation / J. Yin // Frontiers in Energy Research. – 2021. – Vol. 9. – Art. 686138. – DOI: 10.3389/fenrg.2021.686138.
40. Sorrentino, E. Comparison Between Peak Values of Induction Motor Currents' Waveforms During Nearby Three-Phase Short-Circuits and Results From Standardized Calculations / E. Sorrentino, A. Vera // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 1400–1408. – DOI: 10.1049/gtd2.12746.

41. Yin, J. Influence of Reactive Power Support Control Strategy on Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method of DFIG / J. Yin // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – Pp. 5933–5942. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.008.

42. Klontz, K. W. Short-Circuit Analysis of Permanent-Magnet Generators / K. W. Klontz, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, H. Karmaker, P. Zhong // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – Pp. 1670–1680. – DOI: 10.1109/TIA.2011.2154370.

43. Гулов, Д. Ю. Выявление межвитковых замыканий в обмотке синхронного генератора / Д. Ю. Гулов, А. М. Давлатов, Н. Х. Одинаев [и др.] // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2026. – № 1(73). – С. 35–42. – DOI: 10.65599/ENG6423. – EDN BFLWFR.

Reference

1. GOST R 52735-2007. Short-Circuits in Electrical Installations. Calculation Methods for AC Electrical Installations with Voltages Above 1 kV.

2. IEC 60909-0-2016. Short-Circuit Currents in Three-Phase AC Systems. Part 0: Calculation of Currents.

3. ANSI/IEEE Std. C37.010. IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. – 2016.

4. ANSI/IEEE Std. C37.13-1981. IEEE Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.

5. Abdurakhmanov, A. M. Analysis of foreign normative and technical documentation and practical recommendations for the calculation and coordination of short-circuit currents in electrical networks / A. M. Abdurakhmanov // *Electrical Engineering: network electronic scientific journal*. – 2016. – Vol. 3, No. 2. – Pp. 3-23.

6. Kovalev, B. I. The main reasons for insufficient accuracy and the tasks of improving the quality of short-circuit current calculations in electrical systems / B. I. Kovalev // *Short-circuit currents in power systems: abstracts of reports of the All-Russian conference / under the general editorship of A. F. Dyakov*. – M.: RAO "UES of Russia", 1995. – Pp. 8-11.

7. Suvorov, A. A. The Problem of Reliability of Short-Circuit Current Calculations in Electric Power Systems and Means of Their All-Mode Verification / A. A. Suvorov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, S. A. Stavitsky // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. – 2018. – No. 2. – P. 13-25.

8. Suvorov, A. A. All-Mode Verification of Calculations in the Analysis of Dynamic Stability of Electric Power Systems / A. A. Suvorov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, A. B. Askarov // *Electricity*. – 2020. – No. 11. – P. 28-37. – DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-28-37.

9. Glebov, I. A. Methodology for Processing Experimental Data on a Sudden Three-Phase Short Circuit of a Hydrogenerator / I. A. Glebov, E. F. Kharlamova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. – 1999. – No. 3. – P. 153–157.

10. Savina, N. V. Taking into Account Nonlinear Loads in Short Circuit Calculations / N. V. Savina, Yu. V. Myasoedov, L. A. Myasoedova, I. G. Podgurskaya // *Bulletin of Amur State University. Series: Natural Science and Economic Sciences*. – 2014. – Issue 65. – P. 63–72.

11. Gorev, A. A. Transient processes of a synchronous machine / A. A. Gorev; eds. M. L. Levinshtein, L. A. Sukhanov. – 2nd ed., suppl. – L.: Science: Leningrad Branch, 1985. – 502 p.

12. Gamazin, S. I. Transient processes in industrial power supply systems caused by electric motor load / S. I. Gamazin, V. A. Stavtsev, S. A. Tsyruk. – Moscow: MPEI Publishing House, 1997. – 424 p.

13. Zhezhelenko, I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises: textbook for universities in the specialty "Power Supply" / I. V. Zhezhelenko. – 4th ed., revised. and add. – M.: Energoatomizdat, 2000. – 331 p.: ill. – ISBN 5-283-0319-8.

14. Guidelines for Calculating Short-Circuit Currents and Selecting Electrical Equipment / edited by B. N. Neklepaev. – M.: NC ENAS, 2002. – 152 p.

15. Sivokobylenko, V. F. Transient Processes in Multi-Machine Power Supply Systems of Power Plants: Textbook / V. F. Sivokobylenko. – Donetsk: Donetsk Polytechnic Institute, 1984. – 116 p.

16. Dubovik, D. V. Theoretical Aspects and Problems of Calculating Short-Circuit Currents in the Power Supply System of an Active Semi-Trailer Traction Electric Drive / D. V. Dubovik, T. V. Golubchik, A. S. Dyakov, R. A. Zakirov // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 23, No. 4. – Pp. 5–20. – DOI: 10.14529/engin230401.

17. Nikolaev, A. A. Algorithm for Calculating Initial Values of Short-Circuit Currents and Residual Voltages for Parallel and Separate Operation for a Metallurgical Plant's Own Power Plant.

18. Grigoriev, A. V. Theoretical issues of calculating short-circuit currents in ship electric power systems with DC power distribution / A. V. Grigoriev, A. Yu. Vasiliev, Yu. A. Kulagin // *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. – 2017. – Vol. 9, No. 5. – P. 1095-1103.

19. Papadopoulos, T. A. Static and Dynamic Calculation of Short-Circuit Currents in Synchronous Generators / T. A. Papadopoulos, Ch. G. Kalaoudas, P. N. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papadiannis // *International Conference on Power Systems Transients (IPST2011)*, Delft, the Netherlands, 14–17 June 2011.

20. Kaloudas, C. G. Short-Circuit Analysis of an Isolated Generator and Comparative Study of IEC, ANSI and Dynamic Simulation / C. G. Kaloudas, P. N. Papadopoulos, T. A. Papadopoulos, A. G. Marinopoulos, G. K. Papagiannis // 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Agia Napa, 2010. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1049/cp.2010.0922.
21. Berizzi, A. Short-Circuit Current Calculation: a Comparison Between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference / A. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, S. Massucco // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference. Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, Toronto, ON, Canada, 1993. – Pp. 1420–1427, vol. 2. – DOI: 10.1109/IAS.1993.299168.
22. Stojanovic, D. Generator Dynamics Influence on Currents Distribution in Fault Condition / D. Stojanovic, J. Nahman, M. Veselinovic // 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries (MeleCon 2000), Lemesos, Cyprus, 2000. – Pp. 1047–1050, vol. 3. – DOI: 10.1109/MELCON.2000.879714.
23. Stojanovic, D. Influence of Relative Rotor Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, N. Mitrovic, M. Veselinovic // Conference Juko-Cigre, R23-05, Vrnjacka Banja, May 1995. (in Serbian).
24. Stojanovic, D. Influence of Relative Swing to Short-Circuit Currents / D. Stojanovic, M. Veselinovic // UPEC'96, Iraklio, Crete, Greece, 1996. – Vol. 3. – Pp. 1016–1019.
25. Stojanovic, D. P. Calculation and Analysis of Generator Dynamics Influence on Short Circuit Current / D. P. Stojanovic, J. M. Nahman, M. O. Veselinovic // MELECON'98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Tel-Aviv, Israel, 1998. – Pp. 1131–1134, vol. 2. – DOI: 10.1109/MELCON.1998.699409.
26. Gusev, Yu. P. Taking into account the out-of-phase nature of generators when calculating currents at the initial moment of a short circuit / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov, V. V. Govorin // Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI. – 2019. – No. 4. – pp. 11–17. – DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
27. Kayumov, A. G. Influence of Out-of-Phase of Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Power Systems / A. G. Kayumov, Y. P. Gusev, V. V. Govorin // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2018. – Pp. 107–113. – DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544340.
28. Gusev, Yu. P. The Impact of Dynamic Out-of-Phase Synchronous Generators on Short-Circuit Currents in Electric Power Systems / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov // Electricity. – 2021. – No. 3. – Pp. 26–32. – DOI: 10.24160/0013-5380-2021-3-26-32.
29. Gusev, Yu. P. The Impact of Excitation Systems of Synchronous Generators on the Out-of-Phase Short-Circuit Currents in an Electric Power System / Yu. P. Gusev, A. G. Kayumov, V. V. Govorin // Relay Protection and Automation. – 2019. – No. 3. – Pp. 30–33.
30. Dmitriev, M. V. Short-circuit Currents in Electrical Networks Containing Modern 6–500 kV Cable Lines / M. V. Dmitriev // Electric Power. Transmission and Distribution. – 2023. – No. 3 (78). – Pp. 82–86.
31. Kosimov, B. I. Application of Asynchronized Synchronous Generators as Alternative Electric Power Sources for Small and Medium-Sized Rivers / B. I. Kosimov, N. S. Sharbatov, D. S. Aminov [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2026. – No. 1 (73). – Pp. 28–34. – DOI: 10.65599/ENG3328. – EDN KXWHTF.
32. Faria, V. The Influence of Field Voltage Variation in the Sudden Three-Phase Short-Circuit Test. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test. – November 2018.
33. Faria, V. A. D. Parameter Estimation of Synchronous Machines Considering Field Voltage Variation During the Sudden Short-Circuit Test / V. A. D. Faria, J. V. Bernardes, E. C. Bortoni // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 114. – Art. 105421. – ISSN 0142-0615. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105421.
34. Wang, H. Simulation of Three-Phase Short Circuit Electromagnetic Transient Process of Synchronous Generator / H. Wang // Vibroengineering PROCEDIA. – 2020. – Vol. 35. – Pp. 33–38. – DOI: 10.21595/vp.2020.21800.
35. Yin, J. A New Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method Suitable for Doubly Fed Wind Farm Groups / J. Yin, W. Qian, X. Huang // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Art. 8372. – DOI: 10.3390/s23208372.
36. Zhang, L. Analytical Calculation of Stator Short Circuit Current of DFIG Considering PLL Dynamics Under Asymmetric Fault / L. Zhang, S. Li, S. Xu, X. Zhou, S. Li, Q. Xu, J. Shen, W. Zhao, J. Song, T. Wang // Energy Reports. – 2025. – Vol. 14. – Pp. 3547–3562. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2025.10.027.
37. Zhou, N. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators / N. Zhou, F. Ye, Q. Wang, X. Lou, Y. Zhang // Energies. – 2016. – Vol. 9. – Art. 277. – DOI: 10.3390/en9040277.
38. Li, J. Short-Circuit Current Calculation and Harmonic Characteristic Analysis for a Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine Under Converter Control / J. Li, T. Zheng, Z. Wang // Energies. – 2018. – Vol. 11. – Art. 2471. – DOI: 10.3390/en11092471.
39. Yin, J. Improved Short-Circuit Current Calculation of Doubly Fed Wind Turbines With Uninterrupted Excitation / J. Yin // Frontiers in Energy Research. – 2021. – Vol. 9. – Art. 686138. – DOI: 10.3389/fenrg.2021.686138.

40. Sorrentino, E. Comparison Between Peak Values of Induction Motor Currents' Waveforms During Nearby Three-Phase Short-Circuits and Results From Standardized Calculations / E. Sorrentino, A. Vera // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2023. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 1400–1408. – DOI: 10.1049/gtd2.12746.

41. Yin, J. Influence of Reactive Power Support Control Strategy on Short-Circuit Current Calculation and Fault Analysis Method of DFIG / J. Yin // Energy Reports. – 2021. – Vol. 7. – Pp. 5933–5942. – ISSN 2352-4847. – DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.008.

42. Klontz, K. W. Short-Circuit Analysis of Permanent-Magnet Generators / K. W. Klontz, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, H. Karmaker, P. Zhong // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – Pp. 1670–1680. – DOI: 10.1109/TIA.2011.2154370.

43. Gulov, D. Yu. Detection of Interturn Short Faults in the Winding of a Synchronous Generator / D. Yu. Gulov, A. M. Davlatov, N. Kh. Odinaev [et al.] // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2026. – No. 1 (73). – P. 35–42. – DOI: 10.65599/ENG6423. – EDN BFLWFR.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Қаюмов Алишер Гафурҷонович	Каюмов Алишер Гафурджонович	Kayumov Alisher Gafurdzhonovich
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: kayumov_ag@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0005-0068-7361		
TJ	RU	EN
Амонуллоев Азизхон Резмонов	Амонуллоев Азизхон Резмонов	Amonullov Azizkhon Rezmonov
саромӯзгор	старший преподаватель	Senior Lecturer
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: azizkhon.ar@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0005-6577-2524		
TJ	RU	EN
Ҷаборова Манучеҳр Камолович	Джаборова Манучеҳр Камолович	Jaborova Manuchehr Kamolovich
саромӯзгор	старший преподаватель	Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: manuchehrjkm@mail.ru		
https://orcid.org/0009-0001-8539-2044		
TJ	RU	EN
Аминов Дилшод Саидов	Аминов Дилшод Саидов	Aminov Dilshod Saidov
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетикии Таджикистана	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: aminov_ds@mail.ru		
https://orcid.org/0000-0001-8712-8063		
TJ	RU	EN
Қосимов Бахтиёр Исматуллоев	Косимов Бахтиёр Исматуллоев	Kosimov Bakhtiyor Ismatulloev
н.и.т., саромӯзгор	к.т.н., старший преподаватель	Candidate of Technical Sciences Senior teacher
Донишқадаи энергетикии Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Institute of Energy of Tajikistan
E-mail: kosimov.energy@mail.ru		
https://orcid.org/0000-0001-8807-3260		