

Aleksiej Kosjakow

Обчисление и измерения токов высокой частотности в заземлениях устройств высокого напряжения во время переключений и замыканий

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.241

Data zgłoszenia: 28.01.2020 Data akceptacji: 10.02.2020

Artykuł poświęcony jest obliczeniom impulsowych prądów wysokiej częstotliwości, przepływających przez zaземления устройств высокого напряжения во время переключений и замыканий. Знание значений этих токов является необходимым для оценки совместимости электромагнитной в электростанциях и подстанциях, под углом воздействия во время переключения и замыканий. В статье проанализированы obowiązующие стандарты, результаты измерений и расчётов токов импульсной высокой частотности в устройствах с напряжением от 6 кВ до 35 кВ, которые не являются включёнными в стандарты. Зависимости токов импульсной высокой частотности, распространяющихся через заземления во время переключения и замыканий в устройствах высокого напряжения, определяются в зависимости от конкретной резистивности электрической земли и конструкции этих устройств. В статье даны рекомендации по включению токов импульсной высокой частотности в стандарт „Вытязные по отношению к проектированию устройств заземляющих сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённым нулевым пунктом нейтральным” организации „Зднучона спóлка энергетyczna” S.A. (Москва).

Słowa kluczowe: заземление, высокие напряжения, импульсный ток.

Введение

При коммутациях и коротких замыканиях в электроустановках высокого напряжения по заземляющему устройству электроустановки растекается высокочастотный импульсный ток, обусловленный переходным процессом в цепи высокого напряжения. При коротком замыкании данный ток непосредственно (гальванически) стекает с короткозамкнутого электрического аппарата в заземляющее устройство, при коммутации – через ёмкость изоляции коммутационного аппарата.

Разность потенциалов, возникающая на заземляющем устройстве при протекании по нему высокочастотного импульсного тока, может представлять опасность для микропроцессорного оборудования, установленного в электроустановке и подключённого к тому же самому заземляющему устройству, что и высоковольтное оборудование электроустановки. Расчёт указанной разности потенциалов (кондуктивной помехи) входит в нормативно обозначенный объём расчётов электромагнитной обстановки, выполняемых при проектировании заземляющих устройств и обследовании (диагностике технического состояния) заземляющих устройств [1, 2, 3, 4, 5].

Вместе с тем, в разных нормативных документах указываются разные параметры высокочастотного импульсного тока, причём не для всех классов напряжения и видов электроустановок, что приводит к проблемам при прохождении экспертизы проектной документации и согласовании отчётной документации по обследованию заземляющих устройств. Данная проблема, как правило, обозначается в научных

работах после выхода новых нормативных документов [6, 7], но так и не находит решения, в том числе потому, что:

- а) в настоящее время новые нормативные документы не отменяют действия других нормативных документов. Одновременно действует несколько нормативных документов, в которых для одних и тех же электроустановок указываются различные параметры высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству;
- б) в существующих нормативных документах не указаны параметры высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству, для электроустановок разного типа.

В результате проектировщикам и специалистам по обследованию заземляющих устройств приходится самостоятельно произвольно выбирать параметры высокочастотного импульсного тока для электроустановок того или иного назначения [8, 9, 10], что, возможно, приводит к появлению избыточных или недостаточных технических решений по обеспечению благоприятной электромагнитной обстановки.

В 2019 году ООО «Альфа ЭМС» разрабатывает новый стандарт организации «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» (далее – Стандарт) для АО «Объединённая энергетическая компания» (АО «ОЭК») – крупнейшего собственника распределительных сетей 10-220 кВ города Москвы. Одной из задач разработки Стандарта является разработка мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости на подстанциях АО «ОЭК», включая расчётную оценку кондуктивных помех на портах микропроцессорного оборудования, возникающих при растекании высокочастотного импульсного тока по заземляющим устройствам подстанций. В 2020 году Стандарт будет проходить рецензирование и согласование в ведущих организациях, занимающихся проектированием и обследованием заземляющих устройств. Следовательно, вопросы нормирования параметров высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству, снова становятся актуальными.

Таким образом, целью настоящей статьи является обоснование параметров высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения, принимаемых при проектировании и обследовании заземляющих устройств подстанций и электростанций разного класса напряжения и разных типов исполнения.

1. Параметры высокочастотного импульсного тока в нормативной документации

Сравнительная характеристика параметров высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения, принимаемого при проектировании и обследовании заземляющих устройств

подстанций и электростанций в соответствии с требованиями различных нормативных документов, приведена в таблице 1.

Таб. 1. Параметры высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения

Нормативный документ	Тип электроустановки	Параметры высокочастотного импульсного тока при номинальном напряжении электроустановки		
		6-35 кВ	110 кВ	220 кВ
СО 34.35.311-2004	РУ с ОПН на 1 ячейку	Нет данных	0,48 кА	0,95 кА
	РУ с ОПН на 4 ячейки	Нет данных	1,9 кА	3,8 кА
	РУ с РВ на 1 ячейку	Нет данных	0,88 кА	1,8 кА
	РУ с РВ на 4 ячейки	Нет данных	3,5 кА	7,1 кА
СТО 56947007-29.240.043-2010	Все типы ЭУ	Нет данных	Нет данных	Нет данных
СТО 56947007-29.240.044-2010	ОРУ	Нет данных	1 кА, 1 МГц	2 кА, 0,8 МГц
	КРУЭ	Нет данных	6 кА, 2 МГц	12 кА, 2 МГц
СТО 56947007-29.130.15.105-2011	Все типы ЭУ	Нет данных	1,2 кА	2,5 кА
СТО 56947007-29.130.15.114-2012	Все типы ЭУ	Нет данных	0,95 кА	Нет данных

Обозначения: РУ – распределительное устройство
 ОРУ – открытое распределительное устройство
 КРУЭ – комплектное распределительное устройство элегазовое
 ОПН – ограничитель перенапряжений
 РВ – разрядник вентильный
 ЭУ – электроустановка

В таблице 1 нормативные документы приведены по порядку их издания. Авторы этих документов в комментариях к ним [7] указывают на то, что новые документы были изданы для исправления недостатков и модернизации старых документов. Практика проектирования и обследования заземляющих устройств различными организациями показывает, что такой подход к использованию нормативных документов является правильным – при использовании более новых нормативных документов решения по электромагнитной совместимости на проектируемых и обследуемых объектах оказываются более сбалансированными.

Вместе с тем во всех нормативных документах отсутствуют сведения о параметрах высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 6-35 кВ, а также не приводится зависимость параметров тока от удельного электрического сопротивления грунта.

Следует отметить, что в нормативных документах [1, 2, 3, 4, 5] указано, что параметры высокочастотного импульсного тока можно определять расчётом в компьютерной программе Interferences (рис. 1, 2). В практике проектирования и обследования заземляющих устройств различными организациями такой подход к определению параметров высокочастотного импульсного тока встречается крайне редко, что обусловлено низкой стоимостью работ по обеспечению электромагнитной совместимости – заказчики проектных работ и диагностики заземляющих устройств не готовы оплачивать дополнительные трудозатраты инженеров на составление расчётных моделей и выполнение расчётов в программе Interferences по сравнению с возможностью просто принять параметры высокочастотного

импульсного тока из нормативной документации, пусть и с определёнными допущениями.

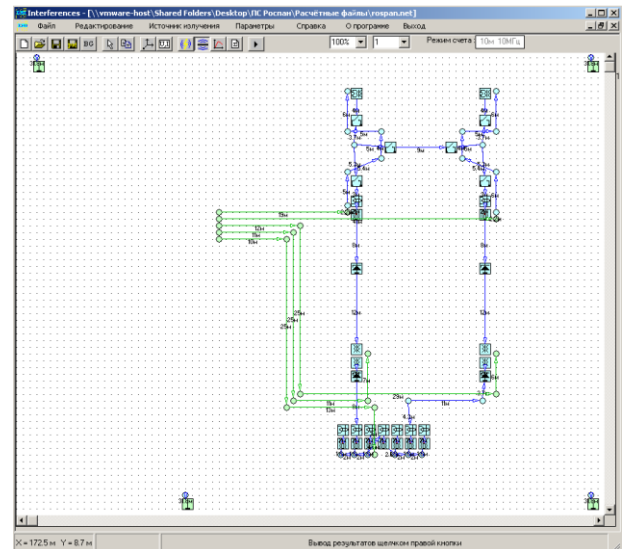


Рис. 1. Расчётная модель подстанции 110/6 кВ в программе Interferences

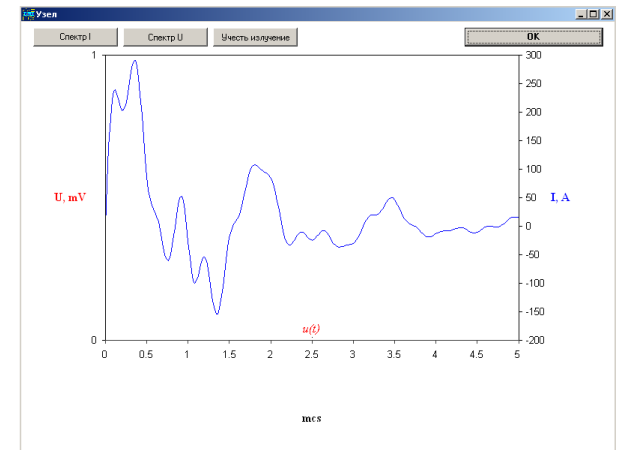


Рис. 2. Результат расчёта в программе Interferences – график импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коротком замыкании трансформатора напряжения 110 кВ

Таким образом, в новом нормативном документе «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» представляется необходимым привести конкретные параметры высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения, а также учесть недостаток всех предыдущих нормативных документов – отсутствие сведений о параметрах высокочастотного импульсного тока в электроустановках 6-35 кВ.

2. Высокочастотный импульсный ток в электроустановках 6-110 кВ

Для выполнения поставленной задачи по определению параметров высокочастотного импульсного тока в электроустановках 6-35 кВ была выполнена серия расчётов в программе Interferences. Расчётные модели составлялись и расчёты выполнялись для типичных распределительных устройств, принятых из многолетней практики

ООО «Альфа ЭМС» по обследованию электромагнитной обстановки на подстанциях и электростанциях различных собственников, и проверялись путём натуральных измерений на подстанциях и электростанциях, выполненных более чем на 300 объектах электроэнергетики в 2014-2019 годах.

В расчётах учтены различные грунтовые условия размещения объектов исследования. Расчёт импульсного тока в электроустановках 110 кВ проводился с целью сравнения расчётных значений с нормативными данными и результатами измерений и, соответственно, для проверки правильности выполнения расчётов и обоснования выводов по результатам расчёта высокочастотного импульсного тока в электроустановках 6-35 кВ.

Результаты расчётов приведены в таблицах 2, 3 и на рис. 3, 4, 5.

Таб. 2. Величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 6-110 кВ при различных грунтовых условиях

Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Величина высокочастотного импульсного тока, А, при номинальном напряжении электроустановки				
	6 кВ	10 кВ	20 кВ	35 кВ	110 кВ
1	37	96	210	355	1020
20	30	75	190	280	950
40	28	68	185	270	920
60	28	64	180	255	910
80	27	63	175	240	900
100	26	61	170	235	890
200	24	56	165	210	860
400	23	52	163	193	820
600	22	49	160	182	800
800	22	48	157	175	790
1000	21	47	155	170	780
1500	21	45	152	162	760
2000	20	44	151	158	740
2500	20	43	150	153	730
3000	19	42	149	150	730
3500	19	42	148	148	725
4000	19	41	145	145	720
4500	19	41	144	143	720
5000	19	41	142	142	715
6000	19	41	141	141	710

Таб. 3. Величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 110 кВ при различном числе ячеек распределительного устройства при удельном сопротивлении грунта 1 Ом·м

Число ячеек распределительного устройства	Величина высокочастотного импульсного тока, А
2	990
4	1020
6	1080
10	1060

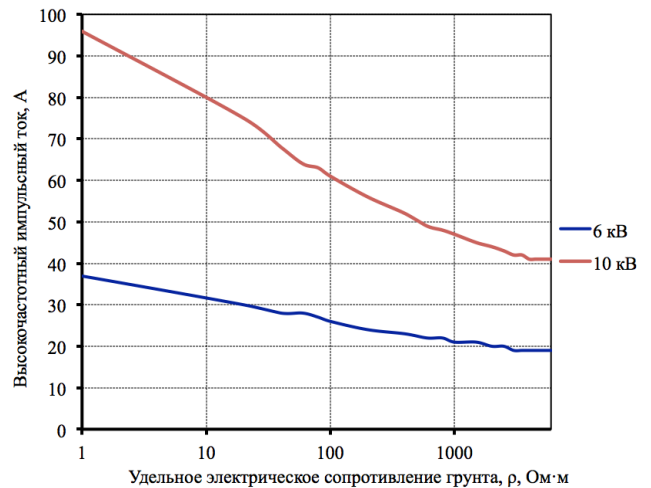


Рис. 3. Зависимость высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 6-10 кВ, от удельного сопротивления грунта

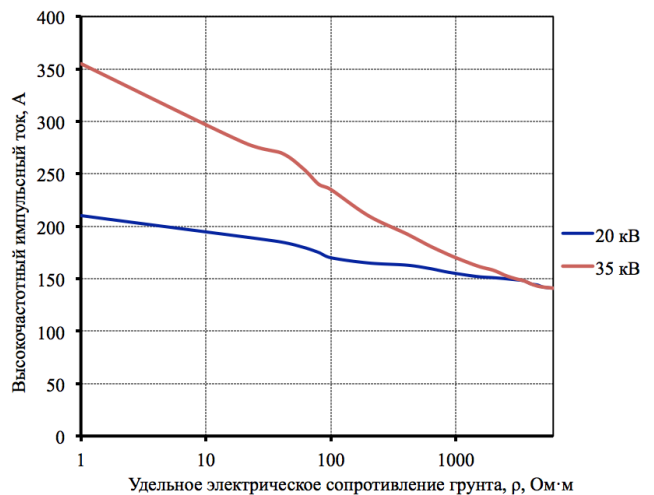


Рис. 4. Зависимость высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 20-35 кВ, от удельного сопротивления грунта

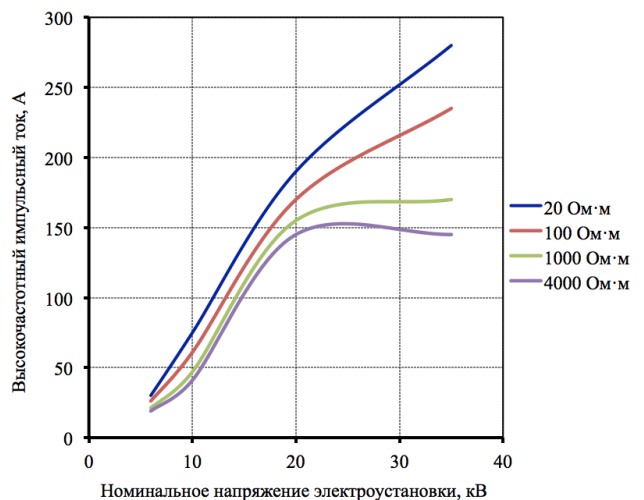


Рис. 5. Зависимость высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, от номинального напряжения электроустановки

Как можно отметить по результатам измерений и расчётов, высокочастотный импульсный ток, растекающийся по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 110 кВ, в зависимости от сопротивления грунта составляет от 710 до 1020 А, что достаточно точно соответствует нормативным значениям, приведённым в СТО 56947007-29.240.044-2010, СТО 56947007-29.130.15.105-2011, СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Следовательно, расчётные модели электроустановок 6-35 кВ и результаты измерений и расчётов высокочастотного импульсного тока в электроустановках 6-35 кВ также можно считать достоверными.

В электроустановках всех классов напряжения, расположенных на площадках с грунтами с низким удельным электрическим сопротивлением (суглинки, супеси, глины), высокочастотный импульсный ток, растекающийся по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, будет максимальным. На площадках с грунтами с высоким удельным электрическим сопротивлением (пески, скальные грунты), величина высокочастотного импульсного тока незначительно снижается (снижение тока в два раза при увеличении сопротивления грунта на два порядка). Поскольку пески и скальные грунты не свойственны грунтовым условиям города Москвы, для стандарта организации «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» АО «ОЭК» представляется возможным принять нормативно закреплёнными значения высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, для типичных грунтов города Москвы (суглинки, глины), имеющих удельное электрическое сопротивление 20 Ом·м.

При новом строительстве и комплексной реконструкции подстанций и линий электропередачи возможно применение привозных грунтов, имеющих высокое удельное электрическое сопротивление – песка, щебня. В таком случае, для снижения кондуктивных импульсных помех, обусловленных протеканием высокочастотного импульсного тока по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях, возможно размещение заземляющего устройства в слое привозного грунта и, соответственно, использование для расчётов кондуктивных импульсных помех сниженных значений высокочастотного импульсного тока в соответствии с данными таблицы 2. Однако, такое техническое решение должно быть обосновано расчётами других параметров заземляющего устройства – сопротивления заземляющего устройства, напряжения на заземляющем устройстве при коротких замыканиях, напряжения прикосновения.

На рис. 4 можно обратить внимание на то, что при высоких удельных сопротивлениях грунтов величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, становится одинаковой. Данный факт можно объяснить схожестью конструктивных решений по изоляции оборудования 20 кВ и 35 кВ – при больших удельных сопротивлениях грунтов на величину импульсного тока удельное электрическое сопротивление грунта влияет в меньшей степени, поскольку в грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением токи (в том числе и импульсные) растекаются в меньшей степени по сравнению с грунтами с низким удельным электрическим сопротивлением грунта. Тем же можно объяснить тот факт, что в

электроустановках всех классов напряжения высокочастотный импульсный ток слабо снижается при удельных сопротивлениях грунтов выше 1000 Ом·м.

В соответствии с результатами измерений и расчётов, приведённых в таблице 3, величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, практически не зависит от числа ячеек распределительного устройства (типа исполнения распределительного устройства).

Таким образом, для стандарта организации «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» АО «ОЭК» представляется возможным принять нормативно закреплёнными значения высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, независимо от типа исполнения распределительных устройств. Значения высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, предлагаемые для включения в названный стандарт организации, приведены в таблице 4.

Таб. 4. Величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования 6-220 кВ, предлагаемая к включению в стандарт организации «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» АО «ОЭК»

Номинальное напряжение электроустановки	Величина высокочастотного импульсного тока, А
6 кВ*	30
10 кВ	80
20 кВ	200
35 кВ	300
110 кВ	1000
220 кВ	2000

Примечание * – приводится справочно, в связи с большим количеством существующего оборудования 6 кВ, находящегося в эксплуатации

Выводы

Результатами настоящей работы являются следующие выводы:

1. В электроустановках всех классов напряжения, расположенных на площадках с грунтами с низким удельным электрическим сопротивлением, высокочастотный импульсный ток, растекающийся по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, будет максимальным. На площадках с грунтами с высоким удельным электрическим сопротивлением, величина высокочастотного импульсного тока незначительно снижается (снижение тока в два раза при увеличении сопротивления грунта на два порядка).
2. При удельных сопротивлениях грунтов выше 1000 Ом·м для электроустановок всех классов напряжения величина импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, практически не зависит от величины удельного электрического сопротивления грунта, и зависит только от класса напряжения электроустановки.
3. При высоких удельных электрических сопротивлениях грунтов величина импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких

замыканиях оборудования 20 кВ и 35 кВ, практически не отличается, что может быть объяснено как схожестью конструктивных решений по изоляции оборудования 20 кВ и 35 кВ, так и тем, что в грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением токи растекаются в меньшей степени по сравнению с грунтами с низким удельным сопротивлением.

4. Величина высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования, практически не зависит от числа ячеек распределительного устройства (типа исполнения распределительного устройства).

Литература:

1. СТО 56947007-29.240.043-2010. Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов.
2. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства.
3. СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ.
4. СТО 56947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок.
5. СО 34.35.311-2004. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях.
6. Матвеев М.В., Кузнецов М.Б., Березовский В.Н. Новые стандарты ФСК по заземляющим устройствам ПС 6-750 кВ. Неточности и противоречия, «Новости электротехники» 2012, № 4 (76).
7. Целебровский Ю.В., Нестеров С.В., Борисов Р.К. Новые стандарты ФСК по заземляющим устройствам ПС 6-750 кВ. Замечания во многом не обоснованы, «Новости электротехники» 2012, № 4 (76).
8. Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Омарова Т.М. Обеспечение электромагнитной совместимости при проектировании заземляющих устройств тяговых подстанций, «ҚазККА Хабаршысы» 2014, № 6 (91).

9. Косяков А.А. Методика проектирования электромагнитной совместимости на электрических подстанциях, «Вестник УрГУПС» 2011, №1 (9).
10. Косяков А.А., Ершов А.Ю. Обеспечение электромагнитной совместимости микропроцессорных технических средств на тяговых подстанциях переменного тока, «Транспорт Урала» 2015, №2 (45).

Оценка величины высокочастотного импульсного тока в заземляющем устройстве при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения

В статье рассмотрены вопросы оценки величины высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения. Указанная величина необходима для оценки электромагнитной обстановки на подстанциях и электростанциях в части выполнения расчётов кондуктивных помех при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения. В статье приведён анализ нормативной документации, результаты измерений и расчётов величины высокочастотного импульсного тока в электроустановках 6-35 кВ, отсутствующей в нормативной документации. Определены зависимости величины высокочастотного импульсного тока, растекающегося по заземляющему устройству при коммутациях и коротких замыканиях оборудования высокого напряжения, от величины удельного электрического сопротивления грунта и конструктивного исполнения распределительных устройств. Приведены рекомендации по включению величины высокочастотного импульсного тока в стандарт организации «Методические указания по проектированию заземляющих устройств сетей 10-20 кВ с резистивно заземлённой нейтралью» АО «Объединённая энергетическая компания» (г. Москва).

Ключевые слова: заземление, высокие напряжения, импульсный ток.

Autor:

dr inż **Aleksiej Kosjakow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, „Alfa EMS” sp. z o.o., m. Jekaterynburg, Rosja, kosakov@yandex.ru