

3. **Chukreyev Yu.Ya., Chukreyev M.Yu.** *Modeli otsenki pokazatelei balansovoi nadezhnosti pri upravlenii razvitiyem elektroenergeticheskikh sistem* (Valuation models carrying performance reliability in managing the development of electric power systems). Syktyvkar, Publ. Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAN, 2014, 207 p.

4. **Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 2, pp. 21–29.

5. **Belyayev N.A., Egorov A.E., Korovkin N.V., Chudnyi V.S.** *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy – in Russ. (News of the JSC «Scientific and Technical Centre of the Unified Energy System»)*, 2014, No. 2(71), pp. 57–77.

6. **Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S.** *Elektrotehnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya – in Russ. (Electrical Engineering Complexes and Systems)*, 2012, No. 1, pp. 77–80.

7. **Krupenev D.S., Perzhabinskii S.M.** *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2014, No. 2, pp. 96–106.

8. **Oboskalov V.P.** *Nadezhnost' obespecheniya balansa moshchnosti elektroenergeticheskikh sistem* (The reliability ensure a balance of electric power systems). Ekaterinburg, Publ. Ural State Technical University, 2002, 210 p.

9. **Billington Roy, Ronald N. Allan.** *Reliability Evaluation of Power Systems. Second Edition.* – New York and London: Plenum Press, 1996, 509 p.

10. **Karmanov V.G.** *Matematicheskoye programmirovaniye. 3 izd. (Mathematical programming. 3rd Edition).* Moscow, Publ. «Nauka», 1986, 288 p.

11. **Sobol' I.M.** *Chislennyye metody Monte-Karlo (The Monte-Karlo numerical methods).* Moscow, Publ. «Nauka», 1973, 313 p.

12. **Faddeyev D.K., Faddeyeva V.N.** *Vychislitel'nyye metody lineinoi algebrы (The calculating methods of linear algebra).* Moscow, Publ. «Lan'», 2009, 736 p.

* * *

Электричество, 2016, № 4, с. 10–14.

Электрические поля в высоковольтных распределительных устройствах классом напряжения 10 кВ

КОВАЛЕВ Д.И., БОРИСОВ Р.К.

Представлены результаты исследования электрических полей в ячейках комплектных распределительных устройств напряжением 10 кВ. Определена структура электрических полей сложной конфигурации в зависимости от различных источников. Приведены расчетные и экспериментальные значения распределения напряженности электрического поля для различных типов высоковольтных ячеек. Определены параметры устройства индикации напряженности электрического поля. Проведено тестирование разработанного индикатора напряжения для ячеек КРУ 10 кВ. Определен порог чувствительности индикатора, составляющий 1,0±2,0 кВ на расстоянии 12–15 см от фазных контактов выключателя. Проведена отстройка индикатора от других потенциальных источников напряженности, кроме фазных контактов выключателя, на которых требуется непосредственная индикация напряжения.

Ключевые слова: распределительное устройство, напряженность электрического поля, высоковольтная ячейка

В процессе разработки высоковольтного электрооборудования необходимо выполнять расчет электрических полей, чтобы определить максимальные значения напряженностей электрического поля в элементах электрооборудования. К одним из наиболее важных задач расчета электрических полей относятся вопросы правильности выбора изоляционной конструкции, а также вопросы электробезопасности персонала, обслуживающего электрооборудование.

В последнее время ведется разработка бесконтактных индикаторов напряжения. Параметры таких устройств и место их установки весьма трудно определить, не имея данных о распределении напряженности электрического поля не только при нормальном, но и при неполнофазном режимах.

Электрооборудование напряжением 6÷35 кВ при относительно небольших размерах имеет сложные конструкции, что значительно усложняет кон-

фигурацию электрического поля. Одним из видов такого оборудования являются ячейки комплектных распределительных устройств.

Для решения представленных вопросов необходимо проводить исследование распределения электрического поля не только в общем виде от всех элементов, находящихся в ячейке, но и от отдельно взятых элементов. Большинство методик, применяемых для расчета электрических полей, ограничены упрощенными конфигурациями электрических полей. Таким образом, встает вопрос разработки методики расчета трехмерных электрических полей, с помощью которой можно было бы выделять электрические поля, созданные отдельными элементами ячеек и аналогичных объектов на электрических станциях и подстанциях. В литературных источниках, например [1, 2], данным вопросам уделяется значительное внимание, но при этом рассматриваемые вопросы не в полной мере решены.

Рассмотрим расчет электрического поля высоковольтной ячейки в программном комплексе Comsol Multiphysics. Для примера расчета используем срез ячеек КРУ – 10 кВ типа К-26, К-104, К2-10 и КМ-2.

Внутренняя часть ячейки состоит из различных элементов, имеющих различные геометрические характеристики. Для различных типов ячеек геометрические расстояния между фазными контактами разные. Боковые фазные контакты выключателя закреплены на трансформаторах тока, средний фазный контакт закреплен на опорном изоляторе. Расстояние между различными элементами может составлять десятки сантиметров, что сильно влияет на общую конфигурацию электрического поля в ячейке и оказывает влияние на работу устройств индикации.

Целью расчетов является определение распределения напряженности электрического поля в ячейке относительно ее отдельных стенок с учетом сложной геометрии ячейки и возможных мест установки индикаторов, реагирующих на напряженность электрического поля.

Расчеты распределения напряженности электрического поля проводились для трех плоскостей:

на нижней перегородке ячейки под фазными контактами на расстоянии 0,15 м;

Таблица 1

Тип ячейки	Максимальные значения напряженности E_{\max} , кВ/м		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Трехфазный режим			
К-26	4,30	3,60	4,30
К-104	2,36	2,15	2,35
К2-10	2,10	0,69	1,51
КМ-2	4,70	3,86	4,70
Двухфазный режим			
К-26	–	4,40	4,40
К-104	–	2,68	2,58
К2-10	–	2,25	1,90
КМ-2	–	5,60	5,10
Однофазный режим			
К-26	–	–	4,90
К-104	–	–	2,80
К2-10	–	–	2,45
КМ-2	–	–	6,10

по левой стенке ячейки в плоскости фазных контактов выключателя;

по правой стенке ячейки в плоскости фазных контактов выключателя.

Эти плоскости для расчета напряженностей были выбраны исходя из оптимальной возможности установки устройств индикации внутри ячеек КРУ.

Расчет проводился для различных режимов работы высоковольтных ячеек. Был рассмотрен вариант, когда под напряжением после выкатывания выключателя из ячейки, находятся три фазных контакта выключателя. Далее расчет проводился для случаев, когда под напряжением оказываются два контакта и затем один контакт.

В результате проведенных расчетов были получены значения напряженности электрического поля, представленные в табл. 1 (в плоскости нижней перегородки) и в табл. 2 (для правой и левой стенок перегородки).

Таблица 2

Тип ячейки	Значения напряженности электрического поля в плоскости стенки ячейки, кВ/м			
	левой		правой	
	E_{\max}	E_{\min}	E_{\max}	E_{\min}
Трехфазный режим				
К-26	8,5	3,0	8,3	2,9
К-104	7,1	0,2	6,4	0,1
К2-10	9,0	0,1	9,9	0,1
КМ-2	13,9	0,1	13,8	0,1
Двухфазный режим				
К-26	8,7	3,5	1,68	0,05
К-104	7,2	0,2	0,94	0,05
К2-10	9,4	0,1	1,60	0,10
КМ-2	14,1	0,1	2,10	0,10
Однофазный режим				
К-16	9,4	4,1	0,69	0,05
К-104	7,6	0,2	0,19	0,01
К2-10	10,1	0,1	0,67	0,05
КМ-2	14,9	0,1	0,76	0,05

Графики распределения напряженности электрического поля для трех случаев наличия напряжения в ячейке типа К-26 после выкатывания выключателя из ячейки представлены на рис. 1.

Из результатов расчетов видно, что во всех случаях наличия напряжения на фазных контактах значения напряженности электрического поля достаточно большие и достаточные для срабатывания

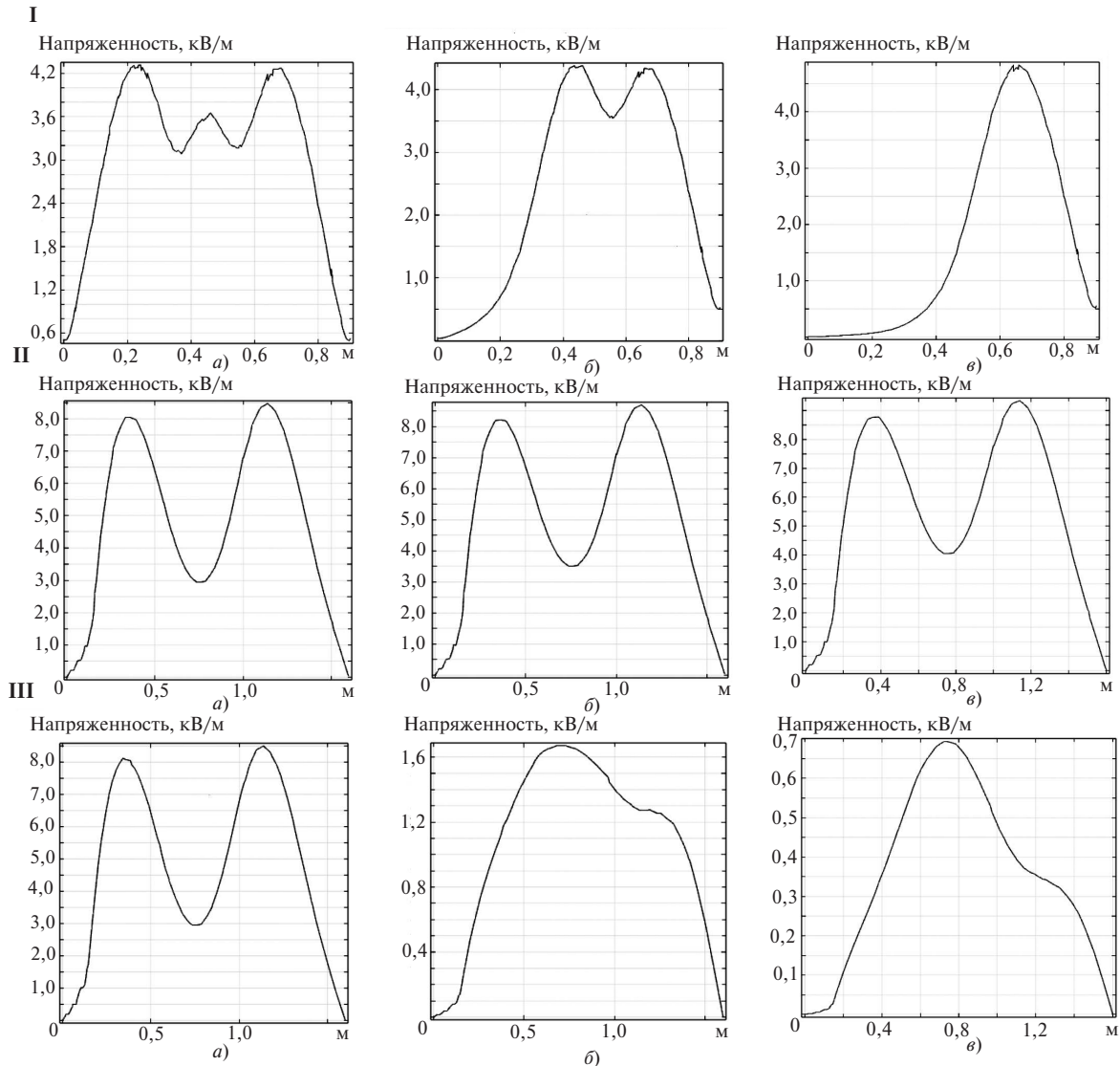


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля: I — на расстоянии 0,15 м в плоскости нижней перегородки ячейки под фазными контактами; II — в плоскости левой стенки ячейки под фазными контактами; III — то же правой стенки при наличии напряжения: а — на трех фазах; б — на двух фазах; в — на одной фазе

устройств индикации в любом из мест их расположения. При этом, независимо от места расположения устройство индикации не сможет определить, на каких именно контактах есть напряжение и всегда будет реагировать на напряженность от любого контакта вне зависимости от того, на каком из них находится напряжение, что не позволит оперативно выявить причину возникновения напряжения на данном контакте и оперативно ее устранить.

Проведенное моделирование показало сложность конфигурации электрического поля в ячейках КРУ и идентификации наличия напряжения на отдельных элементах рассматриваемых ячеек.

По результатам расчетов были определены уровни напряженностей электрического поля в оптимальных с точки зрения геометрических характеристик ячеек, местах установки индикаторов напряженностей. Наиболее оптимальным местом яв-

ляется нижняя часть высоковольтных ячеек, расположенная под фазными контактами выключателя.

При этом индикаторы должны реагировать на напряженность, созданную фазными контактами выключателя, и определять источник напряженности электрического поля.

Для индикации напряжения в высоковольтных ячейках в НИУ «МЭИ» кафедра техники и электрофизики высоких напряжений был разработан индикатор напряжения для ячеек КРУ 6÷10 кВ.

Индикатор (рис. 2) включает в себя блок электроники 1 с кабелем 4 для подключения к источнику питания постоянного тока 12 В, к индикаторам, к внешнему реле и три датчика поля 2, присоединяемые с помощью кабеля 3 к блоку электроники 1.

Бесконтактный индикатор высоких напряжений работает следующим образом. При наличии напряжения электрическое поле наводит емкостный ток

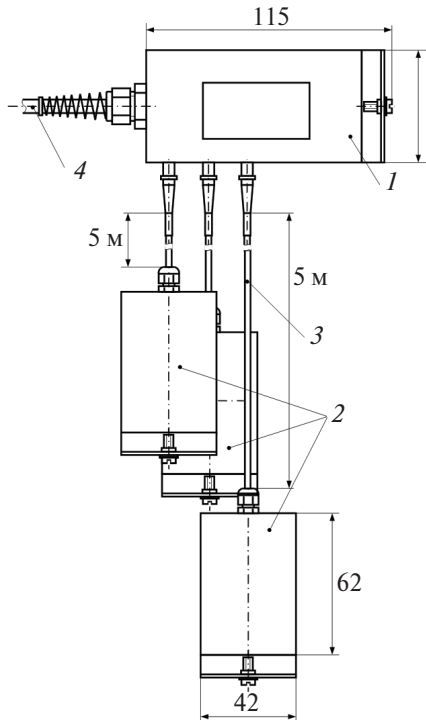


Рис. 2. Схема индикатора

через датчик 2. Точковый сигнал поступает на вход полосового усилителя, который выделяет и усиливает сигнал промышленной частоты и подает его на вход АЦП, встроенного в контроллер, находящегося в блоке I. Контроллер сохраняет выборку периода сигнала от каждого канала. Путем обработки зарегистрированных сигналов контроллер определяет максимальный уровень и по нему устанавливает некоторый пороговый уровень. При сравнении зарегистрированных сигналов с этим пороговым уровнем делается вывод: есть ли в выбранной фазе напряжение. Превышение порога означает наличие напряжения и наоборот. Дополнительно к контролю по уровню сигнала контроллер определяет фазовые соотношения между зарегистрированными сигналами. Если фазовые углы порядка 120° , то это подтверждает наличие напряже-

ния во всех фазах. В противном случае имеет место неполнофазный режим. По соотношению фаз сигналов контроллер определяет, в какой (каких) фазах отсутствует напряжение. Результат отражается на блоке индикации (на рис. 2 не показан), который имеет три пары индикаторов.

Для отстройки датчика от других возможных источников электрических полей было проведено его тестирование в ячейке К-26. В процессе тестирования датчика и определения его уровня чувствительности были также измерены уровни напряженности электрического поля в ячейке. Распределение напряженности представлено на рис. 3.

Распределение напряженности под фазными контактами выключателя, полученное экспериментальным путем, совпадает с распределением, полученным при расчетном моделировании, что свидетельствует о правильности выбора основных параметров устройства индикации.

Проведенное тестирование показало, что пороговое напряжение срабатывания индикатора при расположении его датчиков поля на расстоянии 0,15 м от фазных контактов выключателя $1,0 \pm 2,0$ кВ.

Проведенное моделирование распределения напряженности электрического поля показало, что расположение датчика напряженности, реагирующего на электрическое поле, необходимо выбирать с учетом его чувствительности и удобства расположения и работы с ним в ячейке КРУ. Исходя из приведенных расчетов и конструкции ячейки, устанавливать датчик можно на расстоянии 12–15 см непосредственно под нижними контактами выключателя.

Для отстройки работы индикатора высоких напряжений от напряженностей электрического поля, формируемых другими источниками, а не фазными контактами выключателя, пороговое напряжение срабатывания индикатора при расположении его датчиков поля на указанном расстоянии от фазных контактов выключателя равно $1,0 \pm 2,0$ кВ.

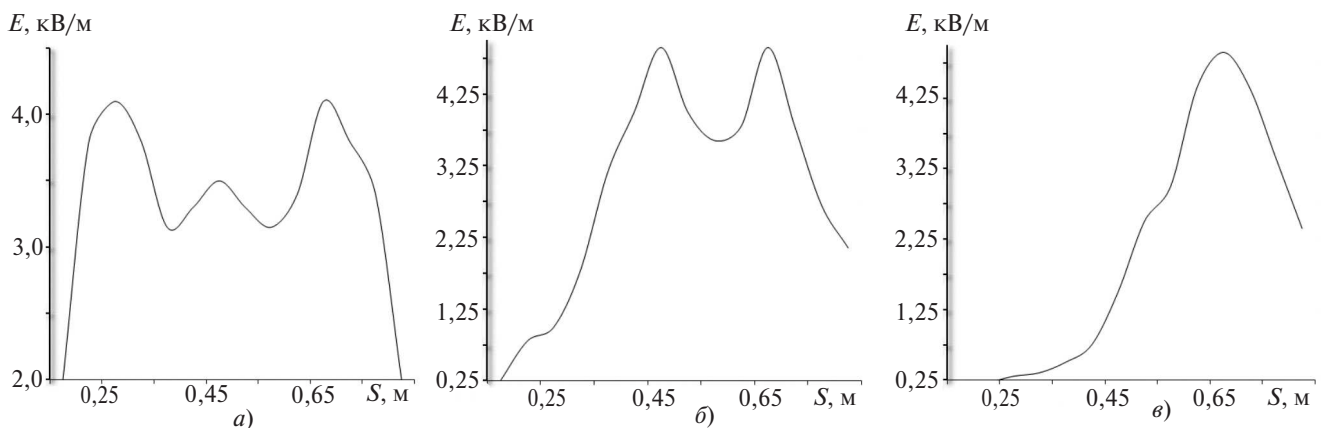


Рис. 3. Распределение напряженности на расстоянии 0,15 м в плоскости нижней перегородки ячейки под фазными контактами при наличии напряжения: а — на трех фазах; б — на двух; в — на одной фазе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко С.Ю., Окунь А.А. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений. — Электротехника и электромеханика (Украина), 2010, № 4, с. 59–62.

2. Белоедова И.П., Елисеев Ю.В., Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Изд-во МЭИ, 2008, 248 с.

[23.11.15]

Авторы: Ковалев Дмитрий Игоревич окончил Национальный исследовательский университет «Мо-

сковский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») в 2007 г. Старший преподаватель, аспирант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

Борисов Руслан Константинович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (ныне НИУ «МЭИ») в 1971 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 4, pp. 10–14.

Electric Fields in 10 kV High-Voltage Switchgears

KOVALEV Dmitrii Igorevich (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) — Senior Lecturer, Ph. D. student

BORISOV Ruslan Konstantinovich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Leading Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

Results from investigations of electric fields in 10 kV switchgear and control gear cubicles are presented. The structure of electric fields with complex configuration as a function of different sources is determined. Calculated and experimentally obtained values of electric field distribution are given for different types of high-voltage cubicles. The parameters of a device for indicating the electric field strength are determined. The voltage indicator developed for 10 kV switchgear cubicles is tested. The indicator's sensitivity threshold, equal to 1,0–2,0 kV at a distance of 12–15 cm from the circuit breaker line contacts, is determined. The indicator is set off from other potential electric field sources other than the circuit breaker phase contacts, for which voltage indication is directly required.

Key words: switchgear, electric field strength, high-voltage cubicle

REFERENCES

1. Shevchenko S.Yu., Okun' A.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika — in Russ. (Electrical Engineering and Electromechanics) (Ukraine)*, 2010, No. 4, pp. 59–62.

2. Beloyedova I.P., Yeliseyev Yu.V., Kolechitskii Ye.S. *Rasschet elektricheskikh polei ustroystv vysokogo napryazheniya (Calculation of electric fields of high-voltage devices)*. Moscow, Publ. «Moscow Power Engineering Institute», 2008, 248 p.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

