

Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ: теоретические аспекты¹

МАТВЕЕВ Д.А., ХРЕНОВ С.И.

Рассмотрены задачи, которые необходимо решить для преодоления недостатков режима заземления нейтрали сети через дугогасящие реакторы, отмечены преимущества реакторов, управляемых подмагничиванием. С помощью простой аналитической формулы и расчетной модели сети показано, что быстрдействие реакторов, определяемое через время, необходимое для компенсации составляющей тока замыкания промышленной частоты, зависит от фазового угла напряжения в момент замыкания. Если замыкание происходит не в максимум напряжения, то в токе реактора появляется аperiodическая составляющая, не позволяющая мгновенно компенсировать емкостный ток замыкания. Показана необходимость проведения экспериментальных исследований, имеющих своей целью определение быстрдействия реакторов и разработку критерия оценки необходимого быстрдействия при дуговых замыканиях на землю.

Ключевые слова: электрическая сеть, однофазные замыкания на землю, перенапряжения, компенсация емкостных токов, дугогасящие реакторы

В соответствии с [1] электрические сети 3–35 кВ должны работать с изолированной, заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью. В п. 1.2.16 этого документа приведены значения емкостных токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), при превышении которых должна выполняться их компенсация. В качестве устройств компенсации в электрических сетях РФ применяются ступенчато и плавно регулируемые дугогасящие реакторы (ДГР). На сегодняшний день полностью осознана необходимость автоматического управления настройкой ДГР [2, 3]. Наиболее широко в распределительных сетях применяются управляемые ДГР плунжерного типа [4] и ДГР серии РУОМ, управляемые подмагничиванием [5, 6].

Последние два десятилетия ведется дискуссия об отказе от применения компенсации емкостных токов и переходе на режим резистивного заземления нейтрали с селективным отключением тока однофазного короткого замыкания [7]. Объективные трудности реализации резистивного заземления нейтрали и недостатки существующего подхода с применением ДГР не позволяют осуществить однозначный выбор. В статье рассматриваются достоинства и недостатки сетей с компенсацией емкостных токов ДГР и очерчивается круг задач, которые необходимо решить для обеспечения их надежной работы.

Основная задача, которую решают ДГР в нейтрали трехфазной сети, — это снижение тока в месте однофазного дугового замыкания на землю до значений, при которых устойчивое горение дуги невозможно или затруднено, что обеспечивает возможность самоликвидации замыканий, в особенности на воздушных линиях и ошиновках распре-

делительных устройств. Также снижаются вероятности возникновения пожаров и переходов дугового замыкания в двухфазное или трехфазное короткое замыкание. Как при металлическом, так и при дуговом ОЗЗ сохраняется возможность электропитания потребителя без отключения поврежденного фидера. Основное условие реализации указанных достоинств режима заземления нейтрали через ДГР — точная настройка ДГР на ток компенсации, соответствующий текущей конфигурации сети. В условиях частых изменений емкости сети (при отключении и подключении фидеров, замены кабелей) наиболее успешно это можно обеспечить путем применения плавно и автоматически регулируемых ДГР с надежно работающей системой управления. Точная настройка компенсации также способствует снижению уровня перенапряжений на электрооборудовании сети и облегчению условий самопогасания дуги за счет медленного восстановления напряжения на поврежденной фазе.

Однако, несмотря на указанные достоинства, режим заземления нейтрали через ДГР имеет ряд недостатков. В первую очередь, это повышение напряжения на неповрежденных фазах в $\sqrt{3}$ раз в течение всего времени существования ОЗЗ. На это повышенное установившееся значение напряжения накладываются свободные составляющие напряжения переходных процессов, возникающих при замыканиях и, особенно, при перемежающемся характере дуги ОЗЗ. Даже при идеальной настройке ДГР, когда уровень перенапряжений минимален, в сетях со сниженной за счет старения электрической прочностью изоляции перенапряжения приводят к повреждениям и двухместным коротким замыканиям. Ограничить эти перенапряжения с помощью ОПН нельзя, ограничители должны быть

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0096).

отстроены от них по причине их большой длительности и возникающих недопустимых энергетических нагрузок на защитные аппараты. Проблема усугубляется тем, что большинство распределителей не оборудованы надежно работающими устройствами определения поврежденных фидеров. Поиск поврежденного фидера зачастую ведется их последовательным отключением, при этом возрастает уровень перенапряжений и возникают временные расстройки компенсации ДГР, что нивелирует достоинства точной автоматической компенсации.

Из рассмотрения указанной проблемы следует, что важным условием надежной работы сетей с нейтралью, заземленной через ДГР, является их оснащение устройствами селективного определения поврежденных фидеров. Эта тема выходит за рамки настоящей статьи, ей будет посвящена отдельная публикация.

Другие недостатки режима заземленной через ДГР нейтрали обусловлены постоянной резонансной настройкой контура нулевой последовательности [8]. При резонансной настройке реактора даже небольшая несимметрия фазных емкостей сети приводит к значительному смещению нейтрали и, как следствие, к перекосу фазных напряжений. Обусловленное несимметрией смещение нейтрали U_N может быть определено по следующей формуле [9]:

$$U_N = U_\phi \frac{m-1}{m+2} \frac{1}{\sqrt{J^2 + d^2}}, \quad (1)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети; m – степень уменьшения емкости на одной фазе; $d = I_a / I_C$ – коэффициент успокоения сети; $J = \frac{I_C - I_L}{I_C}$ – степень расстройки компенсации;

I_L – индуктивная составляющая тока ДГР; I_a , I_C – активная и емкостная составляющие тока ОЗЗ.

На рис. 1 построены зависимости отношения смещения нейтрали к фазному напряжению сети при характерных значениях коэффициента успокоения и $m = 0,9$. Видно, что в пределах 20%-й расстройки компенсации смещение нейтрали во всех случаях превышает допустимое значение 15% U_ϕ . При этом в случае идеальной настройки ДГР смещение нейтрали максимально. Приведенное в примере значение степени уменьшения емкости на одной фазе $m = 0,9$ характерно для воздушных линий электропередачи, где проблема емкостной несимметрии стоит остро: в соответствии с [11] необходимо применять выравнивание емкостей фаз, что часто осложнено на практике.

Отметим, что указанного недостатка полностью лишены ДГР серии РУОМ, управляемые подмаг-

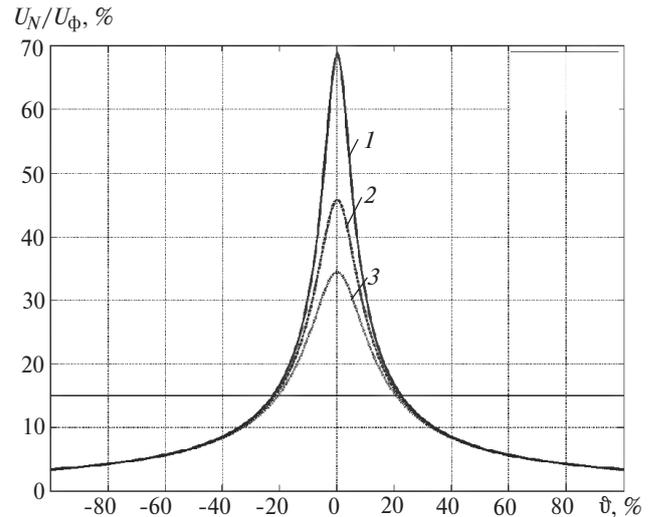


Рис. 1. Смещение нейтрали сети в зависимости от степени расстройки компенсации при характерных значениях коэффициента успокоения и $m = 0,9$: 1 – $d = 0,05$; 2 – $0,075$; 3 – $0,1$

ничиванием. Эти реакторы в нормальном режиме работы сети находятся в состоянии глубокой недокомпенсации и в соответствии с зависимостями рис. 1 не создают предпосылок для недопустимых смещений нейтрали. При этом ДГР серии РУОМ при возникновении ОЗЗ способны выходить в режим компенсации за время, исчисляемое единицами миллисекунд, что оказывается достаточно для того, чтобы предотвратить разогревание канала при дуговом замыкании [10].

Упомянутый вопрос касается быстродействия реакторов – характеристики, которая, по нашему мнению, недостаточно исследована и осмыслена в литературе. При изменении емкости сети реакторы всех конструкций в нормальном режиме должны быстро определять емкостный ток и приходиться в состояние готовности к его компенсации. В настоящее время принято считать, что для резонансно настроенных ДГР (как ступенчато, так и плавно регулируемых) переход в режим компенсации при возникновении ОЗЗ происходит безынерционно, т.е. практически мгновенно. Реакторам, управляемым подмагничиванием, требуется некоторое время на перевод стали магнитопровода в насыщенное состояние.

Однако безынерционность ДГР возможна только при замыканиях, возникающих в момент максимума напряжения на повреждаемой фазе. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Для реактора с заранее настроенной линейной индуктивностью после замыкания на землю индуктивная составляющая тока равна

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt, \quad (2)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения на реакторе; L – индуктивность реактора; начальное значение тока $i(0) = 0$.

Если напряжение на реакторе синусоидально, то

$$i(t) = \frac{1}{L_0} \int U_m \sin(\omega t + j_0) dt = \frac{U_m}{\omega L} [\cos j_0 - \cos(\omega t + j_0)], \quad (3)$$

где j_0 — фазовый сдвиг напряжения в момент замыкания (угол замыкания).

Если замыкание происходит не в момент максимума напряжения ($j_0 \neq 90^\circ$), то в токе ОЗЗ, представляющем собой сумму емкостного тока замыкания и тока реактора, возникает постоянная составляющая $(U_m / \omega L) \cos j_0$, которая при учете потерь затухает, обеспечивая апериодическое снижение тока в месте замыкания.

На рис. 2 показана модель распределительной сети 10 кВ с емкостным током 54 А, сделанная в программе EMTLab. На рис. 3 показаны результаты расчета переходного процесса при однофазном замыкании на землю в разные моменты времени. Из рис. 3,а следует, что при замыкании в максимум напряжения на поврежденной фазе составляющая 50 Гц тока в месте замыкания практически полностью компенсируется током реактора. Нескомпенсированной остается только высокочастотная составляющая, которая быстро затухает. При

замыкании в промежуточный момент времени (угол замыкания 45° , рис. 3,б) в токе реактора видна апериодическая составляющая, которая и определяет остаточный ток.

При замыкании в ноль напряжения на поврежденной фазе (рис. 3,в) апериодическая составляющая оказывается наибольшей. Видно, что остаточный ток в месте замыкания подходит к нулю в течение примерно восьми периодов промышленной частоты, при этом он ни разу не переходит через нулевое значение, тем самым не создавая предпосылок для гашения дуги ОЗЗ.

Очевидно, что периодическая составляющая тока замыкания компенсируется с помощью ДГР, а апериодическая — нет. Апериодическая составляющая существует тем дольше, чем выше добротность сети и, в частности, реактора. Отметим, что наиболее вероятные моменты дугового ОЗЗ находятся вблизи максимума напряжения, а апериодическая составляющая максимальна при замыканиях вблизи нуля напряжения. Однако и при напряжениях, близких к максимальным, эта составляющая может быть существенной. Так например, углу замыкания $j_0 = 60^\circ$ соответствует мгновенное значение напряжения на повреждаемой фазе $0,87U_m$ (дуговые ОЗЗ, особенно повторные, при таких напряжениях

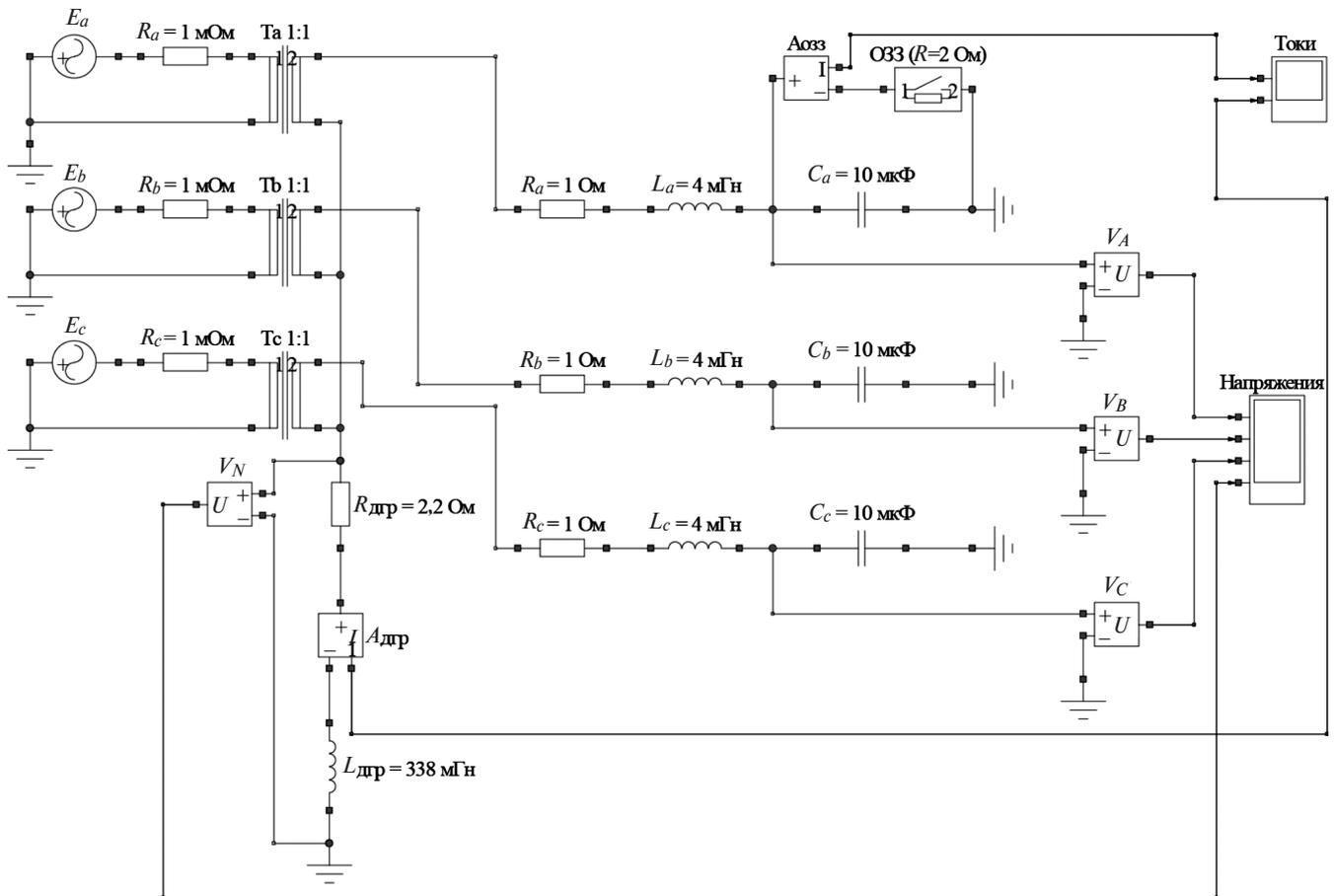


Рис. 2. Модель электрической сети с однофазным замыканием на землю

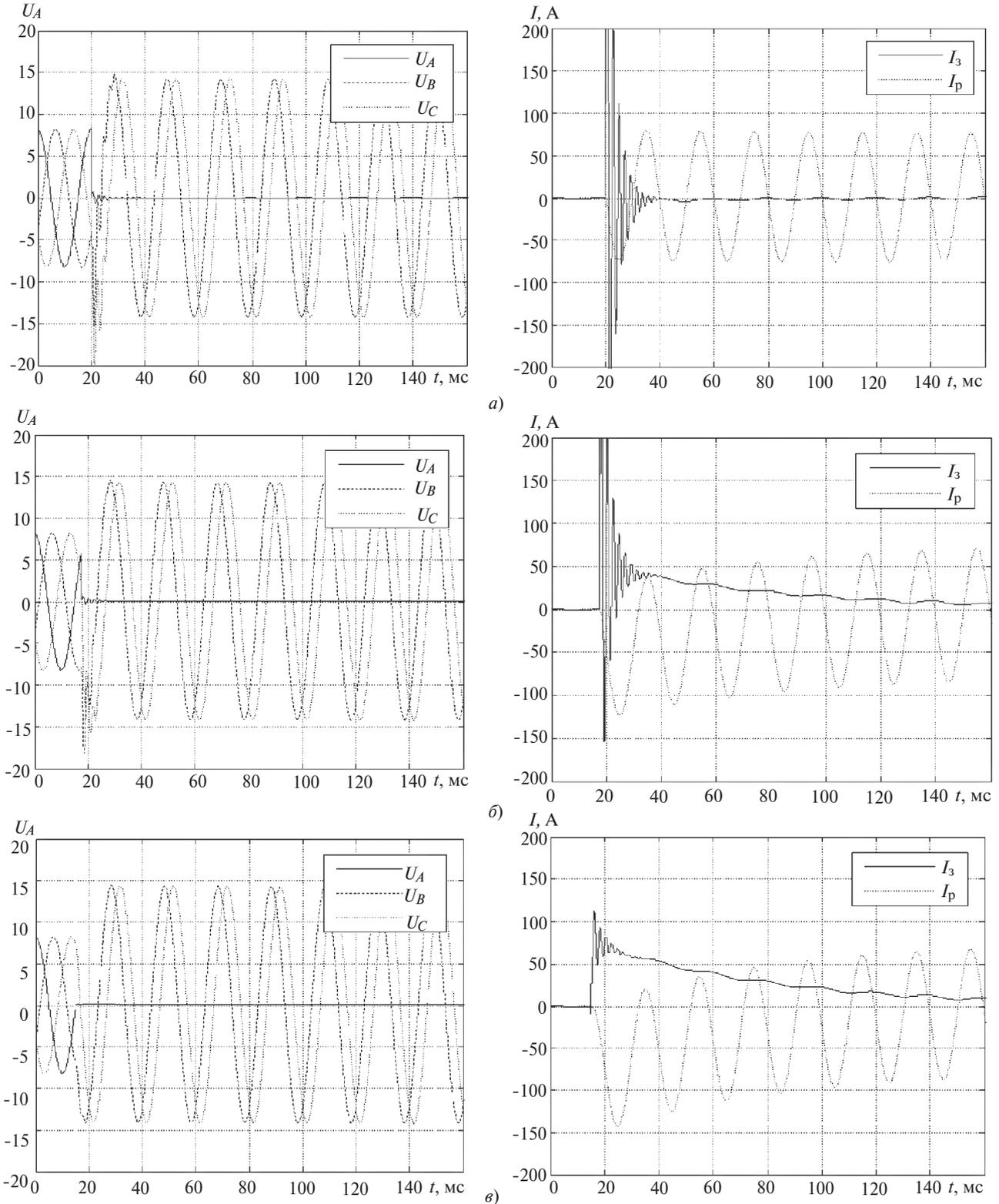


Рис. 3. Расчетные напряжения и токи при замыкании: а — с углом $j_0 = 90^\circ$; б — 45° ; в — 0

весьма вероятны), при этом начальное значение аperiodической составляющей тока реактора в соответствии с (3) составляет половину тока компенсации, что не позволяет реактору безынерционно скомпенсировать емкостный ток ОЗЗ.

Рассмотренная модель позволяет лишь качественно проанализировать процесс, так как в ней не

учтена реальная вольт-амперная характеристика дуги, которая меняется во времени и, в первую очередь, зависит от места и условий горения разряда. Для реакторов серии РУОМ в модели не учтены характеристики цепи подмагничивания, которые усиливают затухание аperiodической составляющей тока. Определить эффективность работы ДГР

в реальных условиях может только эксперимент с искусственными дуговыми замыканиями, когда есть возможность измерения остаточного тока.

Выводы. 1. Автоматически настраиваемые ДГР способны обеспечить надежную работу электрических сетей 6–35 кВ как при металлических, так и при дуговых однофазных замыканиях на землю. Одним из важнейших условий является применение устройств селективного определения поврежденных фидеров.

2. Управляемые подмагничиванием ДГР серии РУОМ имеют преимущество перед реакторами других конструкций, так как не создают предпосылок для резонансных смещений нейтрали в нормальном режиме работы сети.

3. Распространенное мнение о том, что предварительно настроенные в резонанс ДГР обладают «мгновенным быстрым действием», справедливо только для ОЗЗ, возникающих в момент максимума напряжения. При замыканиях, возникающих в другие моменты времени, в остаточном токе замыкания на землю появляется некомпенсируемая апериодическая составляющая, которая препятствует гашению дуги. Необходимы экспериментальные исследования, которые определяют условия погасания дуги апериодической составляющей остаточного тока ОЗЗ при работе реакторов различных конструкций и позволяют выработать критерий достаточного быстрого действия реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. — СПб.: ДЕАН, 2013, 706 с.
2. **Евдокунин Г.Н.** Возможные способы заземления нейтрали сетей 6–10 кВ. — *Новости электротехники*, 2003, № 6, с. 25–29.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 1, pp 34–38.

3. **Мионов И.А.** Современное оборудование для компенсации емкостного тока замыкания на землю в сетях 6–35 кВ: тенденции развития. — *Энергоэксперт*, 2013, № 4, с. 48–54.

4. **Козлов В.Н., Петров М.И.** Дугогасящие реакторы в сетях среднего напряжения. Компенсация емкостных токов замыкания на землю. — *Новости электротехники*, 2012, № 2, с. 60–62.

5. **Базылев Б.И., Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Лурье А.И., Таджикибаев А.И.** Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю. — СПб: Изд-во Петербургского энергетического института повышения квалификации, 1999, 184 с.

6. **Алиев Р.Г., Долгополов С.Г., Долгополов А.Г.** Особенности дугогасящих реакторов с подмагничиванием и способы их совершенствования. — *Энергетик*, 2012, № 8, с. 12–17.

7. **Аношин О.А.** Режимы заземления нейтрали. Распределительные сети XXI века: куда идти? — *Энергоэксперт*, 2008, № 1, с. 20–23.

8. **Матвеев Д.А.** Дугогасящие реакторы серии РУОМ. Преимущества очевидны, недостатки преувеличены. — *Новости электротехники*, 2012, № 5, с. 48–50.

9. **Техника** высоких напряжений/Под ред. Д.В. Разевига. — М.: Энергия, 1976, 488 с.

10. **Брянцев А.М., Лурье А.И., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Базылев Б.И.** Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6–35 кВ. — *Электричество*, 2000, № 7, с. 59–68.

11. **РД 34.20.179** Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ. — М.: СПО Союзтехэнерго, 1988, 26 с.

[21.11.14]

Авторы: Матвеев Даниил Анатольевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1997 г. Старший преподаватель «НИУ «МЭИ».

Хренов Сергей Иванович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1980 г. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию «Рациональная организация процесса нанесения порошковых покрытий в электрическом поле». Заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ».

Performance of the controlled arc suppression coils in electric networks of 6–35 kV: theoretical aspects

D.A. MATVEYEV, S.I. KHRENOV

The drawbacks of neutral grounding through reactors are discussed and the problems to be solved are raised. The benefits of reactors controlled by magnetic biasing are pointed out. It is shown with the help of simple formula and numerical network simulation that the reactor's response time (required to compensate the 50 Hz component of capacitive fault current) depends on the sinusoidal voltage phase angle at the moment of ground fault. If an instantaneous voltage value at this moment is not a peak value the aperiodic component occurs in the reactor's current which prevents the immediate complete compensation. The necessity of experimental investigations of the response speed of reactors (of all types) is revealed. One of the important goals of these investigations is a response speed criteria determination.

Key words: electrical network, one-phase earth faults, overvoltages, compensation of earth faults, arc suspension reactors

REFERENCES

1. **Pravila ustroystv elektroustanovok. 7-e izdaniye** (Rules of the structure of electrical installation. 7th edition). St. Petersburg, Publ. «DEAN», 2013, 706 p.
2. **Yevdokunin G.N.** *Novosti elektrotehniki (Power Engineering News)*, 2003, No. 6, pp. 25–29.
3. **Mironov I.A.** *Energoekspert (Energy Expert)*, 2013, No. 4, 48–53 pp.
4. **Kozlov V.N., Petrov M.I.** *Novosti elektrotehniki (Power Engineering News)*, 2012, No. 2, pp. 60–62.
5. **Bazylev B.I., Bryantsev A.M., Dolgopolov A.G., Yevdokunin G.A., Lur'ye A.I., Tadjibayev A.I.** *Dugogasyashchiye reaktory s avtomaticheskoi kompensatsiyei emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu* (Arc-control reactors with automatic compensation of capacitive earth faults current). St. Petersburg, Publ. Petersburg Power Engineering Institute of Professional Development, 1999, 184 p.
6. **Aliyev R.G., Dolgopolov S.G., Dolgopolov A.G.** *Energetic (Power Engineering Specialist)*, 2012, No. 8, pp. 12–17.
7. **Anoshin O.A.** *Energoekspert (Energy Expert)*, 2008, No. 1, pp. 20–23.
8. **Matveyev D.A.** *Novosti elektrotehniki (Power Engineering News)*, 2012, No. 5, pp. 48–50.
9. **Tekhnika vysokikh napryazhenii/Pod red. D.V. Razeviga** (High Voltage Equipment/Edit. by D.V. Razevig). Moscow, Publ. «Energiya», 1976, 488 p.
10. **Bryantsev A.M., Lur'ye A.I., Dolgopolov A.G., Yevdokunin G.A., Bazylev B.I.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2000, No. 7, pp. 59–68.
11. **RD 34.20.179.** *Tipovaya instruktsiya po kompensatsii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–35 kV* (Standart manual compensation capacitive earth fault current in electric networks 6–35 kV). Moscow, Publ. «Soyuztekhnenergo», 1988, 26 p.

Authors: Matveyev Daniil Anatol'yevich (Moscow, Russia) – Senior Lecturer, the National Research University «Moscow Power Engineering Institute (NRU «MPEI»).

Khrenov Sergei Ivanovich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci., Head of the Department, NRU «MPEI».