

Обеспечение отключающей способности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи

КОЧУРА Д. В., НАУМКИН И. Е., канд. техн. наук, САРИН Л. И.
ООО «БОЛИД»; 630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., д. 1
pnp_bolid@ngs.ru



Д. В. Кочура



И. Е. Наумкин



Л. И. Сарин

Рассмотрены способы борьбы с опасным для элегазовых выключателей явлением задержки нулей тока в отключаемом токе при коммутации компенсированной линии электропередачи. Представлены новые схемы резисторных установок, временно включаемых в фазные цепи шунтирующих реакторов. Рассмотрено предложение, наряду с резисторами, соединяемыми в заземлённую звезду, подключать конденсаторы (блоки статических конденсаторов), соединяемые в треугольник или эквивалентную изолированную от земли звезду. Новые технические решения позволяют решить проблему задержки нулей тока в различных условиях однофазного короткого замыкания (КЗ), включая близкие КЗ. Также успешно решается проблема устранения резонансных перенапряжений при однофазных автоматических повторных включениях.

Ключевые слова: элегазовый выключатель, задержка нулей тока, шунтирующий реактор, однофазное короткое замыкание, резистор, блок статических конденсаторов, резонансные перенапряжения, однофазное автоматическое повторное включение

Аварийные режимы работы линейных элегазовых выключателей возникают из-за неотключения в здоровых фазах компенсированных воздушных линий (ВЛ) электропередачи переходных токов, длительно не переходящих через нуль из-за наличия в них больших аperiodических составляющих по сравнению с вынужденными составляющими. Для создания процесса аварийного отключения линейного элегазового выключателя необходимо выполнение следующих условий:

- на реактированной линии электропередачи должна быть хотя бы одна фаза без КЗ (здоровая), которая включалась бы только с одной стороны;
- включение этой фазы должно производиться вблизи перехода через нуль напряжения со стороны источника питания;
- отключение указанной фазы осуществляется без специальной выдержки времени после включения.

Аварийные режимы работы элегазовых выключателей могут возникать при разных ситуациях:

- одностороннем включении линии под напряжение и срабатывании быстродействующей релейной защиты на отключение трёх фаз;

- однофазном автоматическом повторном включении (ОАПВ), когда дуга подпитки успешно гасится во время бестоковой паузы, но автоматика срабатывает на отключение трёх фаз сразу после коммутации повторного включения;

- неуспешном трёхфазном автоматическом повторном включении (ТАПВ) в случае неустранившегося несимметричного КЗ или работы ТАПВ вместо ОАПВ.

Исследование проблемы задержки нулей тока при отключении имеет давнюю историю [1, 2]. Особую актуальность она приобрела после массового внедрения в эксплуатацию современных элегазовых выключателей [3]. На рис. 1 приведены реальные и расчётные осциллограммы при аварийном процессе отключения элегазовым выключателем компенсированной ВЛ 500 кВ. В фазе А ток длительно не переходит через нуль после опробования напряжением при неуспешном ТАПВ в условиях однофазного КЗ в фазе В. Длительное горение дуги в межконтактном промежутке привело к взрыву полюса выключателя.

Способы, обеспечивающие работоспособность линейных выключателей при коммутациях КВЛ

Для устранения проблемы неотключения линейными элегазовыми выключателями переходных токов при наличии длительных аperiodических составляющих в здоровых фазах принимаются опрделённые меры. К ним относятся:

- введение задержки в коммутацию «отключение» в здоровых фазах;
- предварительная коммутация присоединённых к ВЛ шунтирующих реакторов (ШР);
- управление фазой включения посредством включения ВЛ вблизи максимума напряжения со стороны источника питания;

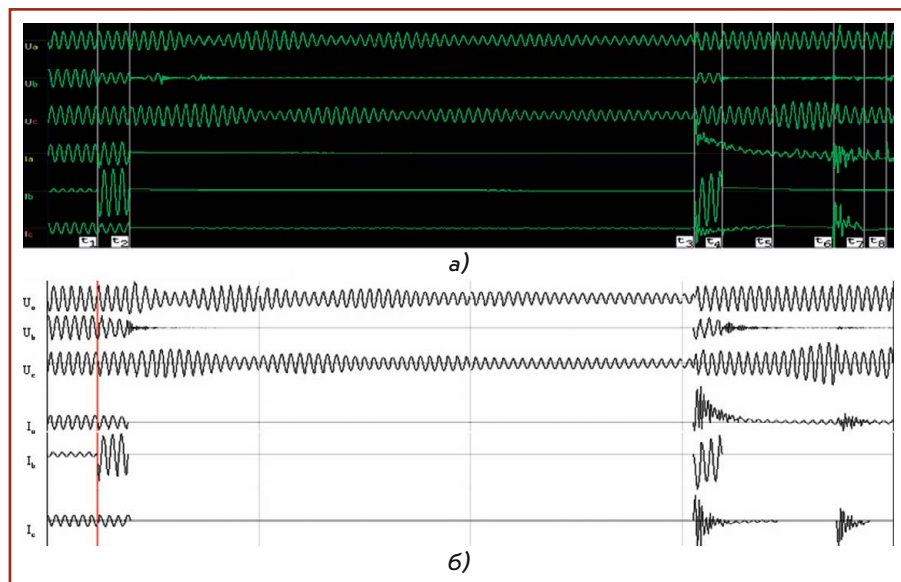


Рис. 1. Пример осциллограмм при аварии: а — записанная регистратором аварийных событий; б — расчётная

- использование выключателей с подключаемыми резисторами;
- временное введение в цепь ШПР активных сопротивлений;
- временное введение активных сопротивлений параллельно ШПР;
- применение управляемых ШПР;
- последовательно-организованные коммутации (после включения линии под напряжение сначала отключается аварийная фаза, затем с одной стороны линии — ШПР на здоровых фазах, в заключение — линейные выключатели здоровых фаз);
- использование комбинированного способа.

Преимущества и недостатки перечисленных действий приведены в [4]. Реально внедрённое средство, обеспечивающее работоспособность элегазовых выключателей, — резисторные установки (РУ) производства ООО «Болид», введённые в фазные цепи ШПР на ПС 500 кВ «Очаково» (рис. 2). Включение РУ производится по схеме, представленной на рис. 3.

Резисторные установки (схема соединения резисторов представлена на рис. 4) наружного исполнения напряжением 35 кВ на ПС 500 кВ «Очаково» подключаются пофазно к выводам нейтралей однофазных ШПР 500 кВ типа РОМ-110000/500-У1. В состав одной фазной РУ входит следующее оборудование:

- резисторы сопротивлением $29,5 \pm 0,5$ Ом типа РКЭ-29-УХЛ1 (восемь штук) с общим эквивалентным активным сопротивлением 59 ± 1 Ом/фаза;
- один вакуумный выключатель ВВН-СЭЩ-35-25/1600УХЛ1;
- три трансформатора тока (ТТ) типа GIF 36.

Группы резисторов собираются в эквивалентное сопротивление путём параллельно-последовательного соединения с помощью медной шины. Резисторы вместе с опорными изоляторами монтируются на металлических опорах высотой 2 м. Вакуумный выключатель нормально включён и своими контактами шунтирует резисторы. При включении кабельно-воздушной линии 500 кВ Очаково — Западная шунтирующий выключатель одновременно отключается и подключает между ШПР 500 кВ и землёй эквивалентное сопротивление 59 ± 1 Ом. К трансформаторам тока присоединяются устройства автоматики и защиты РУ.

Развитие идеи применения РУ в цепи ШПР

При близких КЗ к ШПР, возникающих вблизи нуля напряжения, в аварийной



Рис. 2. Общий вид резисторной установки в цепи ШПР на ПС 500 кВ «Очаково»

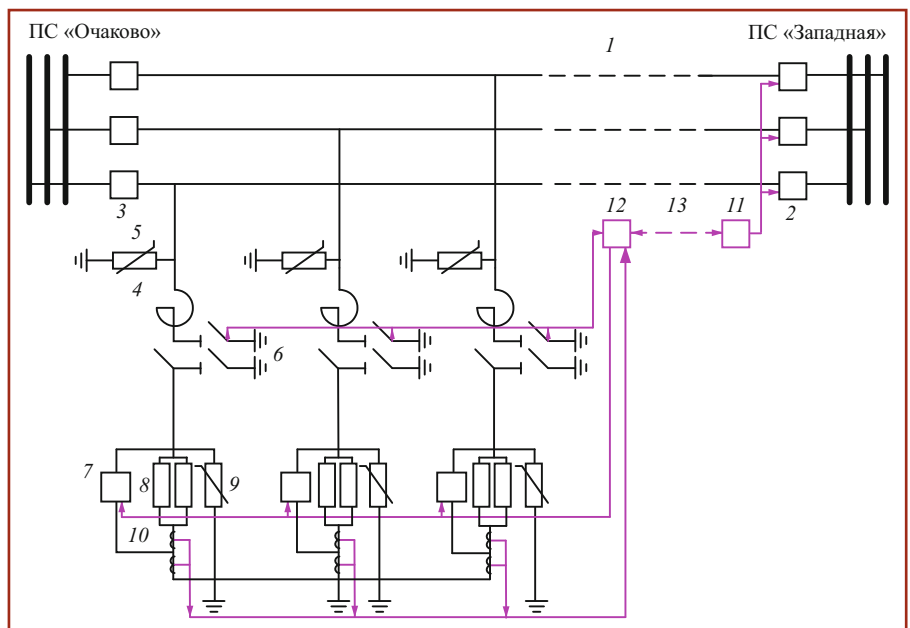


Рис. 3. Схема включения в цепь ШПР активных сопротивлений:

1 — ВЛ 500 кВ; 2, 3 — линейные выключатели 500 кВ; 4 — ШПР 500 кВ; 5 — ОПН 500 кВ для защиты ШПР от перенапряжений; 6 — разъединитель 35 кВ с заземляющими ножами (при заземлённых ножах разъединителя блок автоматики РУ даёт запрет на АПВ); 7 — вакуумный выключатель 35 кВ; 8 — РУ с двумя параллельными цепями (производство ООО «Болид», Россия); 9 — ОПН 35 кВ для защиты нейтрали ШПР от перенапряжений; 10 — трансформатор тока 35 кВ; 11 — релейная защита и автоматика ПС 500 кВ «Западная»; 12 — цифровой блок автоматики РУ; 13 — линия связи между ПС 500 кВ «Очаково» и ПС 500 кВ «Западная»

фазе ШПР протекает переходной ток, который в предельном случае вообще не имеет нулевых значений (осциллограмма 1 на рис. 5). Если считать такое событие практически вероятным, необходимо учитывать, что при указанных КЗ невозможно отключить в аварийной фазе шунтирующий выключа-

тель и соответственно включить резисторы последовательно с ШПР. По той же причине гашение дуги подпитки в паузу ОАПВ становится крайне затруднительным (осциллограмма 2 на рис. 5).

Исходя из статистики КЗ на землю для ВЛ высокого и сверхвысокого на-

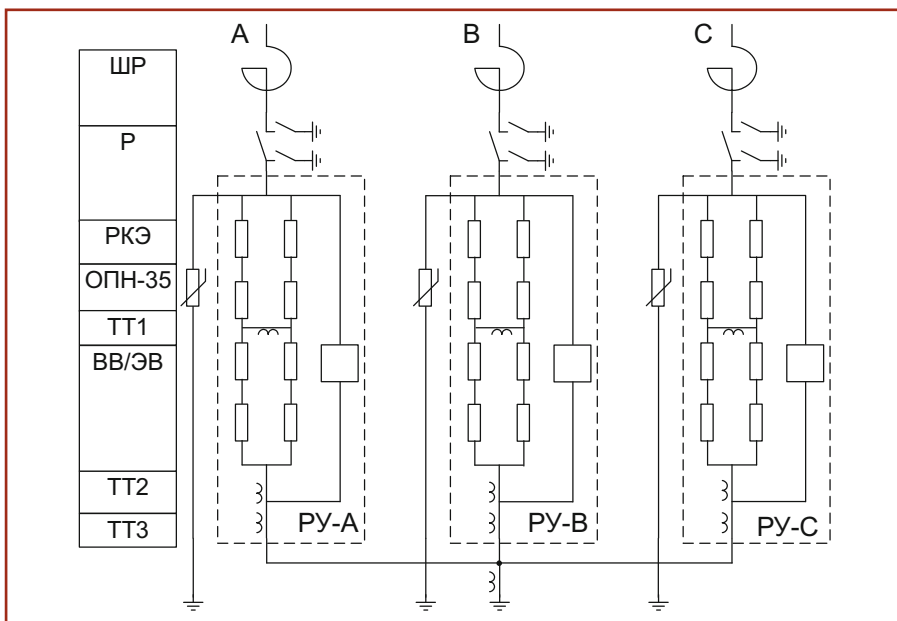


Рис. 4. Схема соединения резисторов в фазных цепях ШПР: Р — разъединитель; РКЭ — резистор производства ООО «Болид»; ВВ/ЭВ — шунтирующий вакуумный или элегазовый выключатель

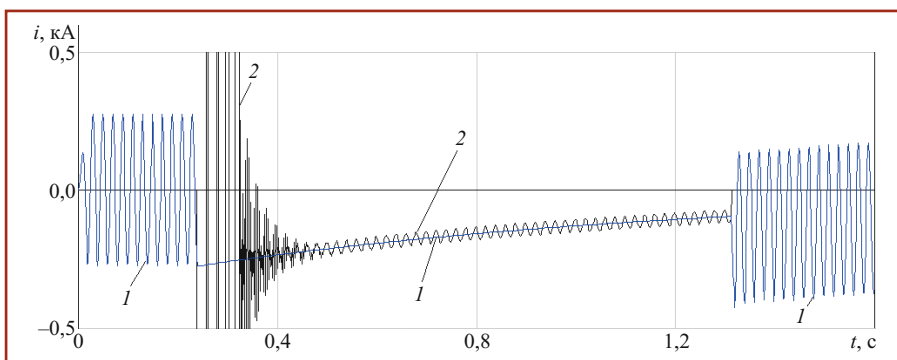


Рис. 5. Ток в месте близкого КЗ к ШПР и ток в цепи шунтирующих выключателей: 1 — ток в аварийной фазе шунтирующего РУ выключателя; 2 — ток в месте КЗ

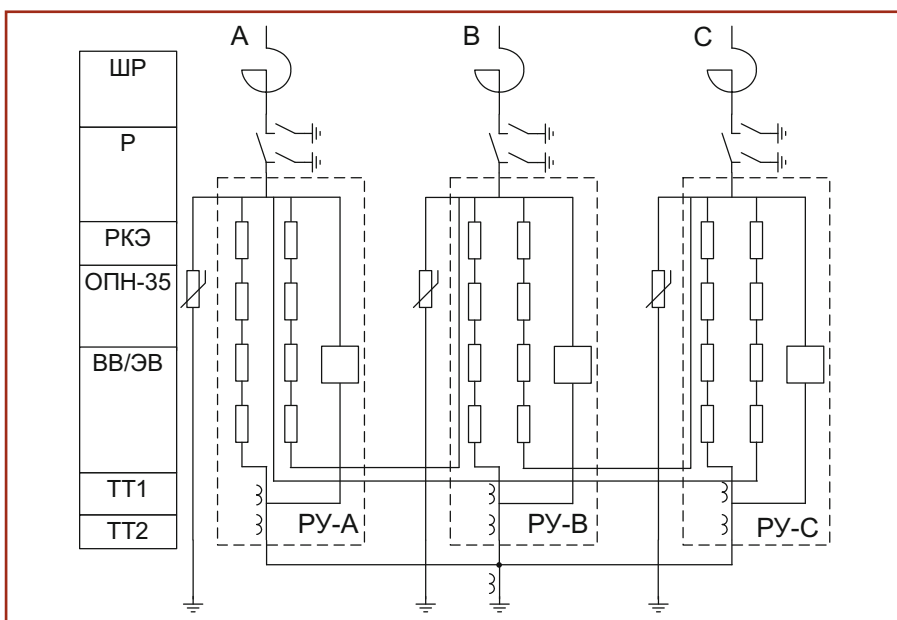


Рис. 6. Схема включения РУ в цепь ШПР с резисторами, соединёнными в заземлённую звезду и треугольник

пряжения (доля однофазных КЗ в сетях 500 кВ составляет 80 – 90 %, а в сетях 750 кВ — практически 100 % [5]) и учитывая, что проблемы с отключением линейных выключателей возникают именно при несимметричных КЗ, предлагается использовать изменённую схему соединения резисторов в фазных цепях ШПР: резисторы во второй колонке РУ соединяются в треугольник (рис. 6) или эквивалентную, изолированную от земли звезду.

Осциллограмма на рис. 7, полученная в тех же условиях, что и приведённая на рис. 5, но с использованием изменённой схемы соединения резисторов (см. рис. 6), иллюстрирует принципиально другое изменение как тока через ШПР, так и тока КЗ. Треугольник (или незаземлённая звезда) из сопротивлений позволяет току в аварийной фазе ШПР приобрести гармоническую составляющую и впоследствии осуществить успешное отключение шунтирующего выключателя в нуле тока. При этом в аperiodической составляющей тока КЗ происходит изменение, приводящее к её быстрому затуханию и гашению дуги подпитки.

Рассмотренная схема РУ вполне работоспособна, но в ней требуется усложнить блок автоматики. Поскольку ток в аварийной фазе шунтирующего РУ выключателя всё-таки сохраняет большую аperiodическую составляющую, команду на его отключение необходимо подавать только по признаку перехода тока через нуль. Такое сложное управление шунтирующим выключателем может представлять значительную преграду на пути практического внедрения предложенной схемы.

Если треугольник (незаземлённую звезду) резисторов заменить конденсаторами (в общем случае блоком статических конденсаторов 35 кВ — рис. 8), все проблемы решаются. При этом ток в шунтирующем выключателе без задержки переходит через нуль и выключатель отключается, а ток в месте КЗ затухает за 30 – 40 мс и КЗ ликвидируется, повторное включение ВЛ не приводит к появлению аperiodической составляющей в токе через линейный выключатель, поскольку в цепи ШПР работают резисторы (рис. 9).

Устранение резонансных перенапряжений при ОАПВ

Следует отметить, что наряду с возможностью отключения шунтирующих выключателей обеспечивается отключение и реакторных выключателей в рассмотренных условиях. Это дополнительное преимущество данного технического решения. Кроме того,

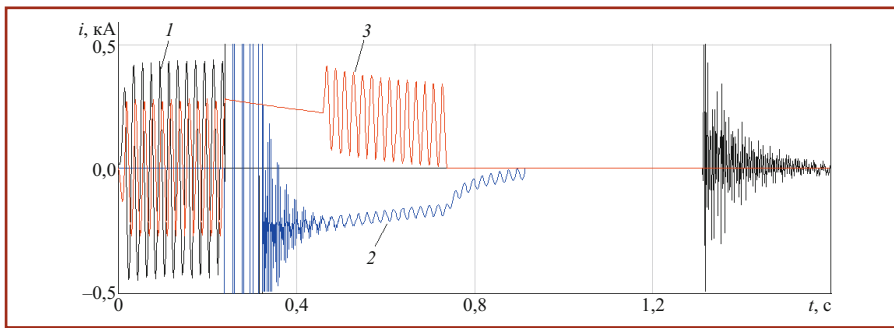


Рис. 7. Осциллограммы токов при использовании новой схемы включения РУ в цепь ШПР: 1 — ток через линейный выключатель; 2 — ток в месте КЗ; 3 — ток в аварийной фазе шунтирующего РУ выключателя

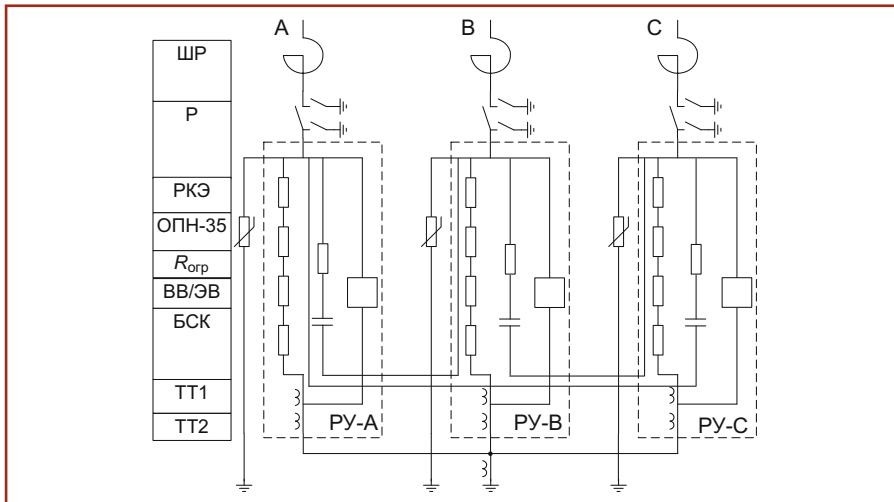


Рис. 8. Схема включения РУ и БСК в цепь ШПР: $R_{огр}$ — низкоомный ограничительный резистор

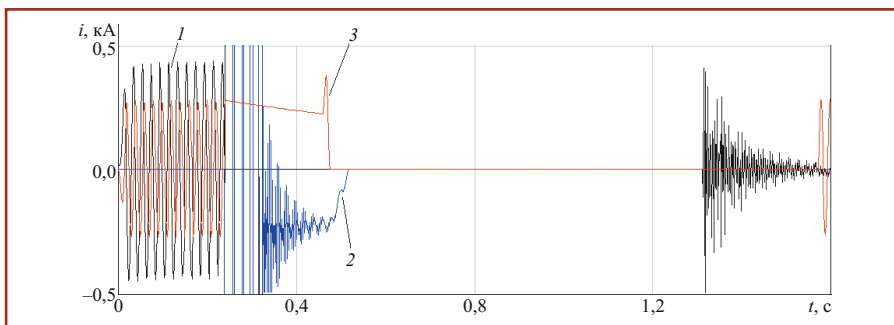


Рис. 9. Осциллограммы токов при использовании схемы включения БСК и РУ в цепь ШПР: 1 — ток через линейный выключатель; 2 — ток в месте КЗ; 3 — ток в аварийной фазе шунтирующего РУ выключателя

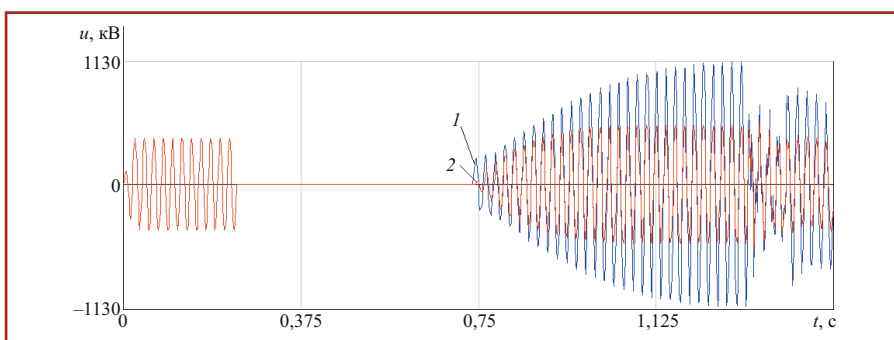


Рис. 10. Осциллограммы напряжений на отключённой фазе во время бестоковой паузы при ОАПВ: 1, 2 — соответственно при отсутствии и наличии в фазных цепях ШПР резисторной установки с БСК

подключение к РУ блока статических конденсаторов (БСК), соединённых в треугольник или эквивалентную изолированную от земли звезду, позволяет устранить проблему резонансных перенапряжений на отключённой фазе во время бестоковой паузы при ОАПВ. На рис. 10 показаны осциллограммы напряжений на отключённой фазе во время бестоковой паузы при ОАПВ. Они свидетельствуют, что резонанс срывается при включении в фазные цепи ШПР резисторной установки с БСК.

Выводы

1. Из рассмотренных мер по предотвращению аperiodических составляющих тока через элегазовый линейный выключатель, вызывающих задержку нулей тока, эффективным представляется вариант временного введения в фазные цепи шунтирующего реактора активных сопротивлений.

2. Проблема близких КЗ к шунтирующему реактору решается посредством включения в фазные цепи ШПР изменённой схемы резисторной установки. Наряду с заземлённой звездой, составленной из резисторов, подключается треугольник или изолированная от земли эквивалентная звезда из конденсаторов.

3. Предложенные новые технические решения с подключением к резисторной установке блока статических конденсаторов позволяют устранять резонансные перенапряжения при однофазных автоматических повторных включениях ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Canay M., Werren L. Interrupting sudden asymmetric short-circuit currents without zero transition // Brown Boveri Rev. 1969. Vol. 56. No. 10. P. 484 – 493.
2. Kulicke B., Schramm H. Clearance of Short-circuits with Delayed Current Zeros in the Itaipu 550 kV-Substation // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1980. Vol. PAS-99. Issue 4. P. 1406 – 1414.
3. Наумкин И. Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500 – 1150 кВ // Электричество. 2012. № 10. С. 31 – 38.
4. Опыт обеспечения работоспособности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи / И. Е. Наумкин, Л. И. Сарин, Д. В. Кочура и др. // Энергетик. 2015. № 3. С. 40 – 47.
5. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн и др. // Под ред. М. Л. Левинштейна. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 256 с.