

# Совершенствование защиты от повышения напряжения для сетей 500 кВ и выше

БОНДАРЕНКО А.Ф., НАУМОВ А.М., НАУМОВ В.А., ПЕТРОВ В.С.,  
ЛЕВИУШ А.И., ЛОХАНИН А.К., ФОКИН Г.Г.

*Показано, что распространенные в энергосистемах России защиты от повышения напряжения имеют ряд недостатков. Обоснована эффективность применения способа выполнения защиты от повышения напряжения, при котором осуществляется замер относительного интегрального значения перенапряжений на изоляции электрооборудования. Описана структурная схема данного способа.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, перенапряжение, автоматика, релейная защита, изоляция

Широко применяемые в настоящее время в энергосистемах ЕЭС России защиты от повышения напряжения (автоматика ограничения повышения напряжения) имеют ряд недостатков.

Защита на базе электромагнитных реле РН-58 реагирует только на действующее значение напряжения, и поэтому оборудование оказывается не защищенным от повышения напряжения из-за наличия второй и других высших гармоник. Этот вариант защиты имеет низкий коэффициент возврата, из-за чего практически невозможно реализовать более двух ступеней уставок, и не позволяет реализовать ОАПВ с оптимальными бестоковыми паузами на линиях с резонансными параметрами [1].

Защита на базе реле с высоким коэффициентом возврата типа РНВК имеет следующие недостатки: возможность ложного самозапуска вплоть до срабатывания; слишком большое время срабатывания; отсутствие контроля напряжения на каждом полупериоде напряжения; неустойчивость работы при напряжениях, близких к уставке.

Защита, выполненная в шкафу типа ШП 2704, является более совершенной [2]. Она имеет чувствительную ступень, реагирующую на действующее значение напряжения, и грубую ступень, реагирующую на амплитудное значение напряжения, а также контроль за перетоками активной и реактивной мощности. Однако и эта защита имеет недостатки: чувствительная ступень не реагирует на феррорезонансные перенапряжения, так как предусмотрено подавление второй гармоники; чрезвычайно малая выдержка времени срабатывания из-за наличия только двух ступеней, что часто приводит к необоснованному отключению оборудования при перенапряжениях.

*It is shown that the overvoltage protections widely used in the power systems of Russia have a number of drawbacks. The effectiveness of using the overvoltage protection method implying measurements of the relative integral overvoltage on the insulation of electric equipment is substantiated. The block diagram of this method is described.*

**Key words:** power line, overvoltage, automatic controls, relay protection, insulation

Общим недостатком всех перечисленных защит является неучет кумулятивного эффекта воздействия перенапряжения и реального числа воздействий.

Наиболее эффективным представляется способ выполнения защиты от повышения напряжения, при котором непрерывно осуществляется интегральная оценка значения перенапряжения на изоляции высоковольтного оборудования.

Технические требования к электрической прочности изоляции электрооборудования в настоящее время регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 1516.3–96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ». Стандарт, в частности, устанавливает соответствие между каждым из нескольких фиксированных относительных значений перенапряжений (т.е. значений напряжения, превышающих номинальное значение, принятое за 1) и фиксированными значениями максимально допустимых длительностей воздействия этих перенапряжений на изоляцию электрооборудования.

Известен способ автоматического контроля суммарного перенапряжения на изоляции электрооборудования в соответствии с указанным стандартом [3]. Согласно этому способу в каждый полупериод промышленной частоты определяется амплитудное (т.е. максимальное за полупериод) значение напряжения на электрооборудовании, сравнивается измеренное напряжение с несколькими фиксированными значениями перенапряжений, по каждому из которых подсчитываются суммарные перенапряжения, определяемые допустимой длительностью воздействия большего из превышенных фиксированных значений перенапряжений, и оп-

ределяются суммарные перенапряжения, накопленные отдельно по каждому из превышенных фиксированных значений перенапряжений.

Недостаток описанного способа – низкая точность (достоверность) расчета интегрального значения перенапряжений на изоляции. Это вызвано двумя причинами.

Первая из них состоит в следующем. Согласно таблице Б.2 указанного стандарта, где приведены восемь фиксированных значений перенапряжения, допустимая длительность перенапряжения сильно зависит от значения относительных перенапряжений (например, для силовых трансформаторов при изменении относительного перенапряжения от 1,025 до 1,25 его допустимая длительность воздействия меняется от 8 ч до 20 с соответственно). Поэтому сравнение измеренных перенапряжений только с несколькими фиксированными перенапряжениями (например, с приведенными в указанной таблице стандарта) и, как следствие, выбор одного значения допустимой длительности воздействия для всех перенапряжений, попадающих в интервал между двумя стандартизованными значениями, сопровождается значительными погрешностями.

Другая причина низкой достоверности контроля, выполняемого по описанному способу, состоит в том, что измеряется и сравнивается с номинальным амплитудным значением только одно (максимальное за полупериод) значение измеренного напряжения и им характеризуются перенапряжения за весь полупериод. Перенапряжения часто сопровождаются искажением синусоидальной формы напряжения и появлением кратковременных всплесков, превышающих амплитудное значение синусоидального напряжения. Наличие таких всплесков напряжения необходимо учитывать, однако в существующем устройстве учитывается только один (максимальный за полупериод промышленной частоты) всплеск, значение которого относят к целому полупериоду.

В результате рассматриваемый способ дает лишь грубую, приблизительную оценку значения перенапряжений на изоляции оборудования и не дает интегральной оценки значения перенапряжений на изоляции электрооборудования.

Далее рассматривается алгоритм расчета относительного интегрального значения перенапряжений на изоляции, при котором с заданной частотой обработки, по меньшей мере, на порядок превышающей промышленную частоту, измеряются мгновенные значения напряжения на электрооборудовании, сравниваются модули измеренных мгновенных значений со значением максимального рабочего напряжения на электрооборудовании,

выявляются перенапряжения, определяется значение, обратно зависящее от найденной допустимой длительности воздействия каждого выявленного перенапряжения, и она добавляется к текущему относительному интегральному значению перенапряжений на изоляции оборудования.

Если перенапряжения не зафиксированы в течение заданного времени, то из текущего относительного интегрального значения перенапряжений на изоляции периодически вычитается заданное относительное значение.

При выполнении устройства следует учитывать различный характер процессов в изоляции при различных уровнях перенапряжений (ПН). Так, при перенапряжениях кратностью до  $1,2U_{\text{раб max}}$  критерием, определяющим допустимую длительность, является нагрев изоляции [4]. При этом необходимо считаться с кумулятивным эффектом, т.е. суммировать, как приведено ранее, значения ПН и после исчезновения их сбрасывать накопленные значения в соответствии с положениями таблиц Б4–Б9 ГОСТ 1516.3–96. При кратностях ПН больше  $1,2U_{\text{раб max}}$  электрическая прочность изоляции определяется внутренними процессами в изоляции. Однако такие ПН случаются довольно редко и существуют кратковременно; обычно это аварийные режимы или коммутации высоковольтных аппаратов. С кумулятивным эффектом изоляции в таких режимах можно не считаться. Учитывая это, в устройстве защиты следует предусматривать отдельный сумматор, работающий при значениях ПН, превышающих  $1,2U_{\text{раб max}}$ . Сброс накопленных в нем значений ПН осуществляется непосредственно после исчезновения ПН (через 2–3 периода промышленной частоты).

На рис. 1 представлена функциональная структурная схема, иллюстрирующая осуществление нового алгоритма при перенапряжениях, меньших или равных  $1,2U_{\text{раб max}}$ .

Представленная схема содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 1 и функциональные блоки 2–9, отражающие последовательность операций над получаемыми с АЦП 1 цифровыми данными для осуществления предлагаемого способа. Функции блоков 2–9 могут быть реализованы на программируемом микропроцессорном терминале. Блок 2 снабжен вертикальной стрелкой, иллюстрирующей его запуск с частотой обработки, которая выбирается, по меньшей мере, на порядок больше промышленной частоты.

Блок 1 (АЦП) преобразует мгновенные значения аналогового напряжения, поступающего от датчика напряжения на электрооборудовании (например, от измерительного трансформатора напряжения), в цифровые отсчеты.

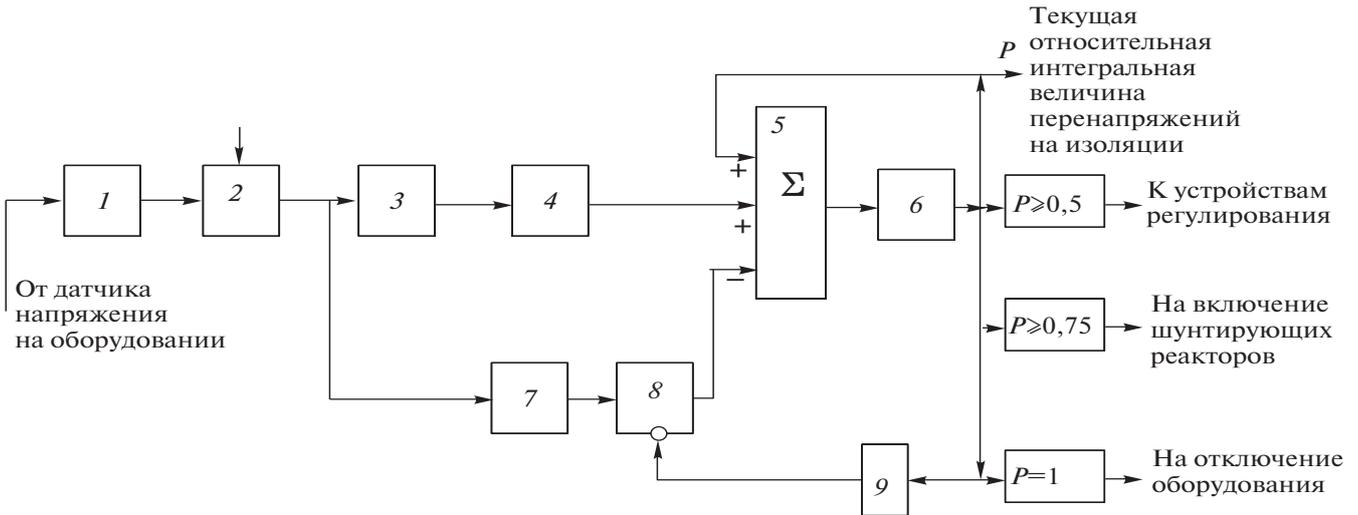


Рис. 1. Структурная схема, осуществляющая предлагаемый способ защиты при ПН, меньших или равных  $1,2 U_{\text{раб max}}$

Блок 2 с заданной частотой обработки принимает от АЦП 1 цифровые отсчеты (мгновенные значения напряжения) и сравнивает их модули с амплитудой максимального рабочего напряжения  $\dot{U}_{\text{раб max}}$ . Частота обработки, по меньшей мере, на порядок превышает промышленную частоту и определяется максимальной частотой спектра контролируемых перенапряжений. В случае превышения  $\dot{U}_{\text{раб max}}$  модуль данного отсчета фиксируется как перенапряжение и его значение выдается в блок 3. В тех случаях, когда значение  $\dot{U}_{\text{раб max}}$  не превышено (т.е. перенапряжения нет), сигнал на выход блока 2 не поступает.

Блок 3 определяет допустимую длительность воздействия перенапряжения на изоляцию, соответствующую значению перенапряжения, зафиксированному блоком 2, следующим образом.

В памяти микропроцессорного терминала хранится (в виде подробной таблицы цифровых значений) зависимость допустимой длительности воздействия от значения перенапряжения, полученного путем интерполяции соответствующих данных, приведенных в указанном стандарте (см. рис. 2). Выбирая из указанной таблицы цифровое значение длительности, соответствующее поступившему из блока 2 значению перенапряжения, блок 3 находит допустимую длительность его воздействия и выдает ее в блок 4.

Блок 4 вычисляет относительное перенапряжение на изоляции на интервале  $Dt$  обработки как величину, обратную допустимой длительности воздействия  $T_i$ , полученной из блока 3 на  $i$ -м интервале обработки. Использование высокой частоты обработки позволяет считать, что перенапряжение на электрооборудовании на одном интервале обработки практически не меняется. Поэтому отно-

сительное значение перенапряжения за этот интервал может быть сразу получено из таблицы, если в ней вместо допустимых длительностей воздействия будут храниться обратные им величины.

Полученное блоком 4 значение относительного перенапряжения за интервал  $Dt$  добавляется сумматором 5 к текущему значению относительного интегрального перенапряжения  $P$  на изоляции, которое хранится в ячейке 6 памяти микропроцессорного терминала, реализующего предлагаемый способ.

Описанные операции выполняются с относительными величинами: значения напряжений могут обрабатываться, например, в виде их отношения к  $\dot{U}_{\text{раб max}}$ , а значение относительного интегрального перенапряжения на изоляции — в виде долей предельного значения этого перенапряже-

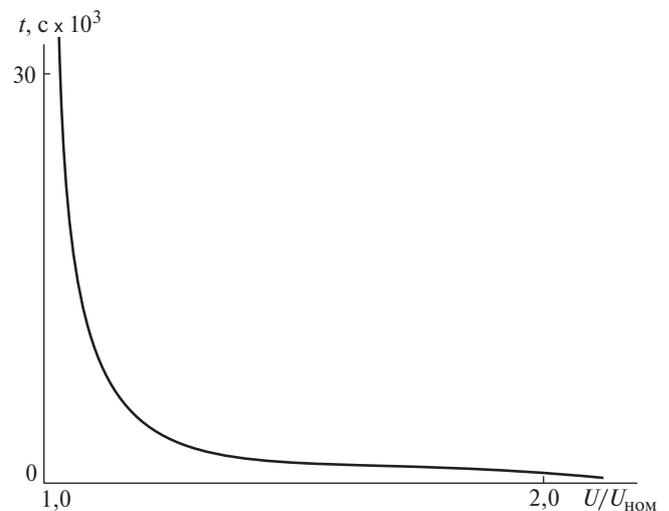


Рис. 2. Зависимость допустимой длительности воздействия перенапряжения от его значения (получена интерполяцией данных таблицы Б2 из ГОСТ 1516–96)

ния, условно принятого за единицу. Таким образом,

$$P = Dt \dot{a} \frac{1}{T_i}$$

При отсутствии перенапряжений в течение достаточно длительного времени накопленное относительное интегральное значение перенапряжений на изоляции оборудования постепенно сбрасывается. Исходя из изложенного способ предусматривает развитие, которое может быть осуществлено следующим образом.

Таймер 7 обнуляется при выдаче блоком 2 в блок 3 данных о каждом перенапряжении. При отсутствии таких обнулений (т.е. при отсутствии сигналов о перенапряжении) таймер 7 через заданное время срабатывает и запускает блок 8, который с помощью сумматора 5 обеспечивает периодическое вычитание заранее заданных относительных значений из текущего относительного интегрального значения перенапряжения на изоляции, хранимого в ячейке 6 памяти микропроцессорного терминала. Когда это значение достигнет нуля, на выходе дешифратора нулевого значения 9 появляется сигнал, поступающий на инверсный вход блока 8 и останавливающий его.

Данные о текущем относительном интегральном значении перенапряжения на изоляции оборудования, хранимые в ячейке 6, могут быть использованы для автоматического управления напряжением на контролируемом оборудовании (например, для компенсации емкостных перенапряжений на линии электропередачи путем подключения шунтирующих реакторов) и/или для информирования персонала.

При уровнях ПН, больших  $1,2U_{\text{раб max}}$ , функциональная структурная схема аналогична рис. 1 и отличается от неё характером выполнения сброса накопленного относительного значения ПН на изоляции при исчезновении перенапряжений. В соответствии с изложенным сумматор сбрасывается через 2–3 периода промышленной частоты после исчезновения ПН, если  $P < 1$ . При  $P = 1$  устройство действует на сигнал или отключение оборудования. Обратное его включение проводится по решению оперативного персонала.

**Вывод.** Использование рассмотренного способа позволяет исключить излишние отключения оборудования при кратковременных повышениях напряжения, не вызывающих повреждения оборудования, а также повысить достоверность контроля от-

носительного интегрального значения перенапряжения на изоляции оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окин А.А., Семенов В.А.** Противоаварийное управление в ЕЭС России/Под. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 1996.
2. **Шкаф** автоматики фиксации повышения напряжения типа ШП 2704 ИГФР 656 456.001.ТО, 1983.
3. **Патент РФ № 2145760.** Способ защиты от повышения напряжения электропередачи высокого напряжения, 2000.
4. **Лоханин А.К., Сапожников А.В.** Допустимые для электрооборудования кратковременные эксплуатационные повышения напряжения частоты 50 Гц. – Электротехника, 1981, №5.

[29.12.10]

*Авторы: Бондаренко Александр Федорович окончил энергетический факультет Львовского политехнического института в 1968 г. Советник первого заместителя председателя правления ОАО СО ЕЭС.*

*Наумов Александр Михайлович окончил электро-механический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова (ЧГУ) в 1973 г. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка быстродействующих фильтровых направленных высокочастотных защит ВЛ» во ВНИИЭ. Технический директор ООО НПП «ЭКРА» (Чебоксары).*

*Наумов Владимир Александрович окончил электроэнергетический факультет ЧГУ в 2001 г. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор» во ВНИИЭ. Заведующий отделом релейной защиты и автоматики станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».*

*Петров Владимир Сергеевич окончил электроэнергетический факультет ЧГУ в 2010 г. Инженер 2-й категории в отделе релейной защиты и автоматики станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».*

*Левуш Александр Ильич окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1958 г. В 1993 г. во ВНИИЭ защитил докторскую диссертацию «Теория и практика выполнения ВЧ защит электрических сетей 110–1150 кВ». Главный научный сотрудник ОАО «ЭНЦ Электроэнергетики».*

*Лоханин Андрей Константинович окончил ЭЭФ МЭИ в 1958 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Вопросы координации изоляции силовых трансформаторов для передач переменного и постоянного тока сверхвысокого напряжения» в ВЭИ. Скончался в 2011 г.*

*Фокин Герман Георгиевич окончил ЭЭФ МЭИ в 1962 г. В 1983 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка способов повышения эффективности трехфазного АПВ линий электропередачи 330–750 кВ». Ведущий научный сотрудник ОАО «ЭНЦ Электроэнергетики».*