

УДК 621.316.722.3

Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматриваются адаптивные алгоритмы цифровой автоматики ограничения повышения напряжения (АОПН). Вводится понятие остаточного ресурса электрической изоляции, под которым понимается условная интегральная величина, характеризующая запас времени работы защищаемого оборудования под данным повышенным напряжением без потери работоспособности и разрушения электрической изоляции. Введенное понятие остаточного ресурса позволяет преобразовать вольт-временную характеристику в удобную для реализации в АОПН диаграмму расхода остаточного ресурса электрической изоляции. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции и показывает, как меняется остаток ресурса изоляции в течение времени существования повышения напряжения.

Введенные в рассмотрение понятия остаточного ресурса и диаграммы расхода остаточного ресурса являются основой предлагаемых в настоящей статье новых адаптивных алгоритмов управления техническими мероприятиями по ликвидации повышения напряжения и учета восполнения ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения. Гибкость управления техническими мероприятиями обеспечивается контролем уровня остаточного ресурса согласно диаграмме расхода остаточного ресурса защищаемого оборудования и адаптивным изменением порога срабатывания признака отказа технических мероприятий предыдущих ступеней.

Ключевые слова: автоматика ограничения повышения напряжения, повышение напряжения, технические мероприятия, электрическая изоляция, диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции.

Antonov V.I., Naumov V.A., Petrov V.S.

THE NOVEL ADAPTIVE ALGORITHMS OF DIGITAL OVERVOLTAGE PROTECTION

Abstract: in the article adaptive algorithms of digital overvoltage protection are considered. The residual resource of electrical insulation concept is introduced. This concept is an abstract integral value which characterizes the time reserve of the safe operation of protected equipment under the operating voltage. The residual resource of electrical insulation concept allows converting the voltage-time characteristic to convenient for implementation in overvoltage protection flow

diagram of residual resource of electrical insulation. The diagram simplifies control of residual resource of electrical insulation and shows his change during the overvoltage.

Both the estimation of residual resource and the flow diagram of residual resource are basis of proposed in this article the novel adaptive algorithms to control of overvoltage eliminate actions and to accounting residual resource of electrical insulation recovery after overvoltage eliminating. The flexibility of overvoltage eliminate actions control is provided by monitoring of residual resource according to flow diagram of residual resource of electrical insulation and adaptive changing threshold of tripping flag of previous overvoltage elimination steps non-operation.

Keywords: overvoltage protection, overvoltage, technical actions, electrical insulation, flow diagram of residual resource of electrical insulation.

Автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН) предназначена для устранения длительного повышения напряжения сети выше наибольшего рабочего уровня в различных режимах, возникающих при аварийных переключениях в электрической сети. Такие повышения напряжения ограничиваются путем изменения режима работы синхронных компенсаторов на подстанции либо коэффициента трансформации силового трансформатора, либо путем изменения схемы сети включением шунтирующих реакторов. Все вместе эти действия АОПН на элементы сети называются техническими мероприятиями [1], поэтому далее в статье они будут объединены этим термином.

Повышенное напряжение действует на изоляцию высоковольтного оборудования по-разному. При незначительных повышениях напряжения главным фактором разрушения электрической изоляции высоковольтного оборудования является ее нагрев [2], а при высоком уровне напряжения решающую роль уже играют процессы ионизации изоляционного промежутка. Действительно, допустимое время нахождения изоляции под высоким напряжением относительно невелико, и процессы нагрева в этом случае не успевают оказать на изоляцию сколь-нибудь заметного эффекта [3]. Исходя именно из этих предпосылок, национальный стандарт Российской Федерации [4] и стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» [5] предписывают использовать в современной АОПН в качестве *контролируемой величины* действующее значение при невысоких повышениях напряжения и максимальное значение – при напряжениях значительного уровня. Эти же особенности свойств электрической изоляции должны быть учтены и при управлении техническими мероприятиями [6, 7]. Поэтому АОПН должна адаптивно изменять стратегию управления техническими мероприятиями в зависимости от уровня повышенного напряжения и предыстории работы защищаемого высоковольтного оборудования.

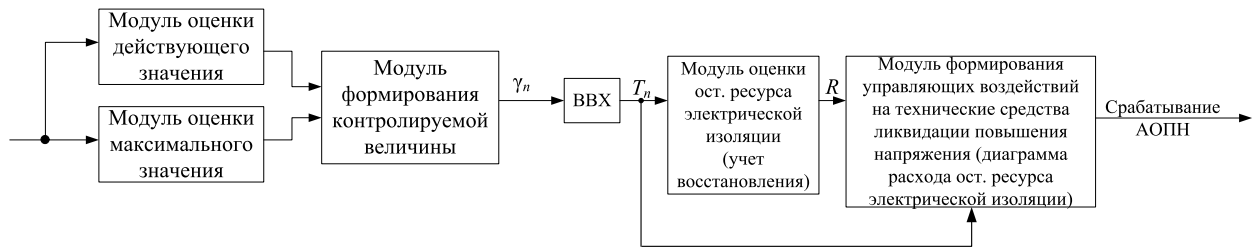


Рис. 1. Функционально-логическая схема новой цифровой АОПН

Рассмотрению новых адаптивных алгоритмов АОПН, основанных на непрерывном учете условий работы защищаемого высоковольтного оборудования и гибком управлении техническими мероприятиями, и посвящена настоящая статья. Предлагаемые алгоритмы осуществляют интегрированный учет работы защищаемого оборудования в условиях изменяющегося во времени уровня повышенного напряжения и интеллектуальное резервирование отказа ступеней АОПН (рис. 1).

Остаточный ресурс электрической изоляции

Здесь под остаточным ресурсом электрической изоляции понимается условная интегральная величина R , характеризующая запас времени работы защищаемого оборудования под данным повышенным напряжением без потери работоспособности и разрушения электрической изоляции. Если оборудование не было под действием повышенного напряжения или прошло достаточное время для восстановления электрической изоляции после предыдущего повышения напряжения, то остаточный ресурс принимается равным 1.

Остаточный ресурс может быть определен по вольт-временной характеристике (ВВХ) высоковольтного оборудования [8 (табл. Б.1, Б.2)], регламентирующей допустимое время T_n нахождения высоковольтного оборудования под повышенным напряжением данного уровня $\gamma_n = U_n / U_{\max}$, где U_n – измеренное действующее значение текущего режима повышенного напряжения (или вычисленное по максимальному значению), U_{\max} – действующее значение наибольшего рабочего напряжения.

Для придания адаптивности алгоритмам цифровой АОПН удобно рассматривать ВВХ под другим углом зрения, чем в технике высоких напряжений. Если там ВВХ задают как зависимость допустимого уровня повышения напряжения γ_n от длительности T_n нахождения изоляции высоковольтного оборудования под этим напряжением, то при разработке АОПН предпочтительнее определять ее как зависимость допустимого времени T_n нахождения изоляции под повышенным напряжением γ_n . Такой подход упрощает определение интенсивности расхода остаточного ресурса изоляции $\Delta_{R}^{T_n}$

с помощью ВВХ. Алгоритм ее расчета следует непосредственно из определения ВВХ. Положим, что остаточный ресурс изоляции не расходован и составляет 1. Если высоковольтное оборудование подвергнется повышению напряжения γ_n , то ресурс его изоляции будет полностью израсходован за время T_n . Отсюда следует, что интенсивность расхода ресурса изоляции при постоянном уровне повышенного напряжения γ_n определяется как

$$\Delta_R^{T_n} = \frac{1}{T_n}. \quad (1)$$

Остаточный ресурс электрической изоляции

$$R(k) = R(k-1) - \Delta R(k) \quad (2)$$

предлагается определять на каждом полупериоде напряжения путем вычитания из остаточного ресурса предыдущего полупериода $R(k-1)$ части ресурса $\Delta R(k)$, расходуемой в течение текущего полупериода (k – номер полупериода). Величина расходуемого на полупериоде ресурса $\Delta R(k)$ определяется с учетом формулы для интенсивности расхода (1):

$$\Delta R(k) = T_0 \Delta_R^{T_n}(k), \quad (3)$$

где учтено, что интенсивность расхода ресурса может быть разной на каждом из полупериодов напряжения.

Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции

Введенное выше понятие остаточного ресурса позволяет преобразовать неудобное для реализации в АОПН вольт-временную характеристику в *диаграмму расхода остаточного ресурса электрической изоляции*. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции и показывает, как меняется остаток ресурса R изоляции в течение времени существования повышения напряжения γ_n . Если γ_n не меняется во времени, то, как следует из (3), интенсивность расхода ресурса будет тоже постоянной, и ресурс изоляции уменьшается по линейному закону от 1 до 0 за время T_n . Поэтому диаграмма расхода ресурса R представляет собой семейство прямых, имеющих общее начало в точке $R = 1$ (при $T = 0$) и заканчивающихся на оси допустимого времени T в точках T_n . На рис. 2 показана схема конвертации ВВХ в диаграмму расхода остаточного ресурса. Сплошные наклонные линии соответствуют линиям расхода ресурса изоляции при повышении напряжения $\gamma_I \div \gamma_{III}$ (допустимые времена $T_I \div T_{III}$), регламентируемые стандартом [8].

Промежуточные точки ВВХ определяются путем интерполяции.

Далее линии расхода ресурса при повышенном напряжении неизменно-го уровня γ_n с допустимым временем T_n будем обозначать как $\gamma(T_n)$.

Адаптивный алгоритм управления техническими мероприятиями

Необходимый уровень технического совершенства АОПН в значительной мере зависит от обоснованности и своевременности применения технических мероприятий. В зависимости от уровня повышенного напряжения должны приводиться в действие различные технические мероприятия. Причем в случае отказа или неэффективности технических мероприятий данной ступени приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени, решение о вводе которых принимается на основе контроля успешности

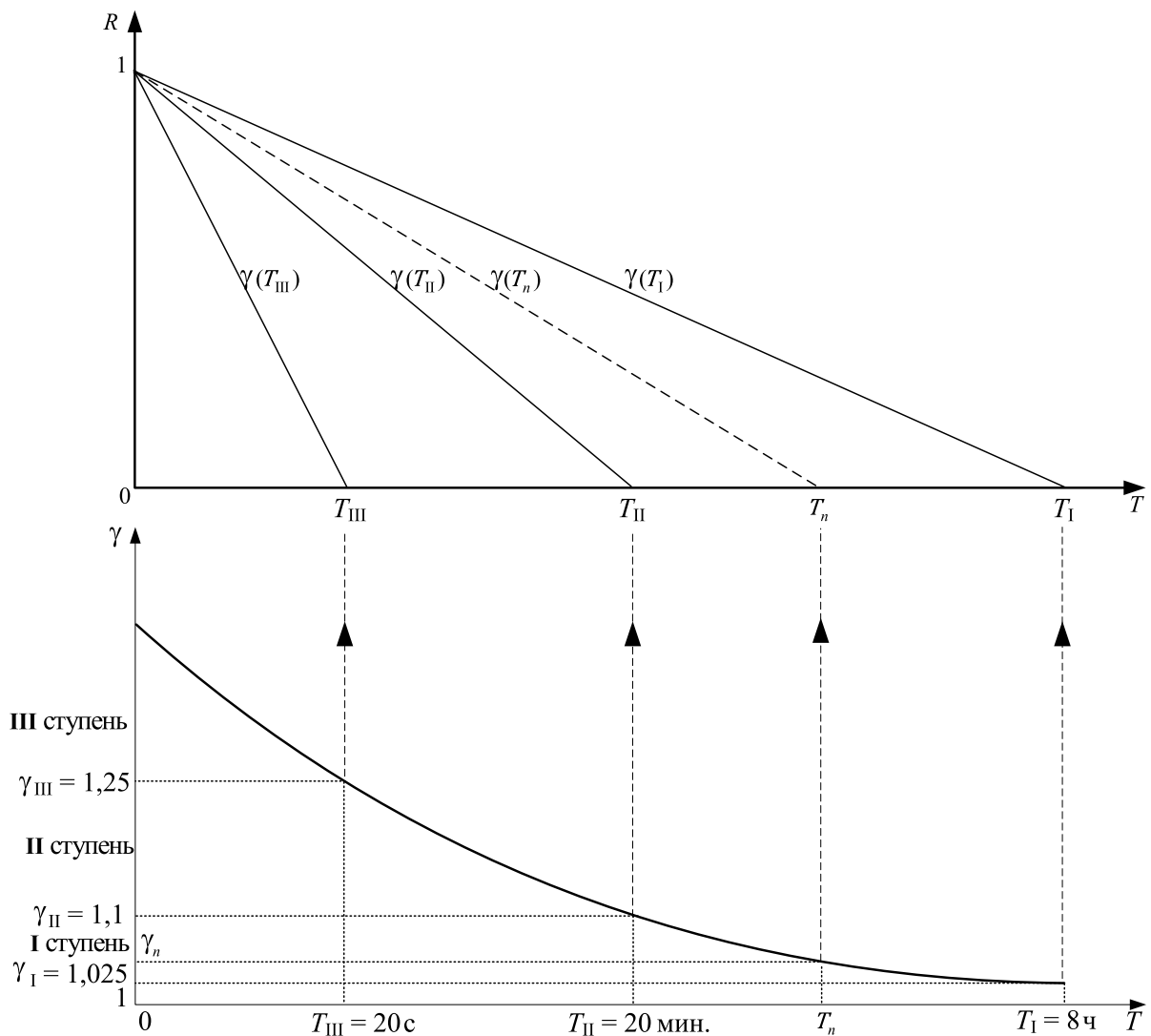


Рис. 2. Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования

технических мероприятий данной ступени. Известные устройства АОПН, например, ШП 2704 [9], успешность действия технических мероприятий ступени контролируют путем измерения длительности повышения напряжения. Если она превысит заданное время, то формируется признак отказа технических мероприятий ступени и приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени. Использование фиксированного времени для контроля успешности технических мероприятий снижает эффективность применения технических мероприятий, особенно в случае перемежающихся повышений напряжения, поскольку не учитывается расход ресурса изоляции при предыдущих повышениях напряжения. В связи с этим защищаемое оборудование может быть либо отключено преждевременно, либо, наоборот, необоснованно оставлено под напряжением.

С целью повышения гибкости управления техническими мероприятиями предлагается адаптивный способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации повышения напряжения [10].

В предлагаемом способе контроль успешности технических мероприятий ступени осуществляется по уровню остаточного ресурса. При этом учет расхода ресурса изоляции осуществляется согласно диаграмме расхода остаточного ресурса защищаемого оборудования, благодаря чему интенсивность расхода ресурса изоляции полностью согласуется с текущим уровнем повышения напряжения. Это позволяет вводить технические мероприятия следующей ступени в действие вовремя, не допуская ни преждевременного приведения их в действие (исключая недоиспользование ресурсов электрооборудования), ни их запаздывания (предотвращая повреждение оборудования).

Способ может иметь неограниченное число ступеней для управления техническими мероприятиями. Однако с целью упрощения пояснения принципа его работы будем считать, что на ВВХ и диаграмме расхода остаточного ресурса технические мероприятия представлены тремя ступенями.

Способ в первую очередь и без замедления вводит в действие технические мероприятия той ступени, на которую приходится повышение напряжения $\gamma(T_n)$. И логика действия ступеней такова, что отказ предпринятых данной ступенью технических мероприятий (отказ оборудования или неэффективность действия) должен привести в действие технические мероприятия следующей ступени.

Поясним вначале работу предлагаемого способа при возникновении повышенного напряжения невысокого уровня, когда будет задействована первая ступень. В этом случае приводятся в действие технические мероприятия

невысокого быстродействия, связанные с изменением напряжения с помощью переключения РПН и т.п. Если по каким-либо причинам они не сработают, то способ должен привести в действие техническое мероприятие следующей, второй, ступени.

Для выявления отказа технических мероприятий используется специальный признак, действующий при снижении остаточного ресурса R изоляции до пороговой величины текущей ступени. Порог должен быть таким, чтобы способ успевал последовательно, по мере необходимости, привести в действие технические мероприятия остальных ступеней. В случае первой ступени пороговой величиной будет $R_1^{\gamma(T_1)}$, при достижении которой приводятся в действие технические мероприятия второй ступени. Здесь верхний индекс указывает, что порог ассоциирован расходом остаточного ресурса вдоль линии $\gamma(T_1)$. Порог должен быть достаточно велик для того, чтобы при данном повышении напряжения оставшегося до снижения остаточного ресурса до нуля времени $T_{\Sigma 1}$ хватило для осуществления технических мероприятий всех оставшихся ступеней с учетом вероятности их отказа, кроме последней – ступени отключения оборудования от сети. Под действием текущего повышенного напряжения $\gamma(T_1)$ расход ресурса будет происходить с интенсивностью, определяемой выражением (1) [на рис. 3 изменение ресурса происходит по штриховой наклонной линии $\gamma(T_1)$]. Поэтому пороговая величина

$$R_1^{\gamma(T_1)} = \Delta_R^{T_1} T_{\Sigma 1} = \frac{T_{\Sigma 1}}{T_1} \quad (4)$$

будет тем выше, чем круче линия расхода ресурса на диаграмме (чем меньше T_1).

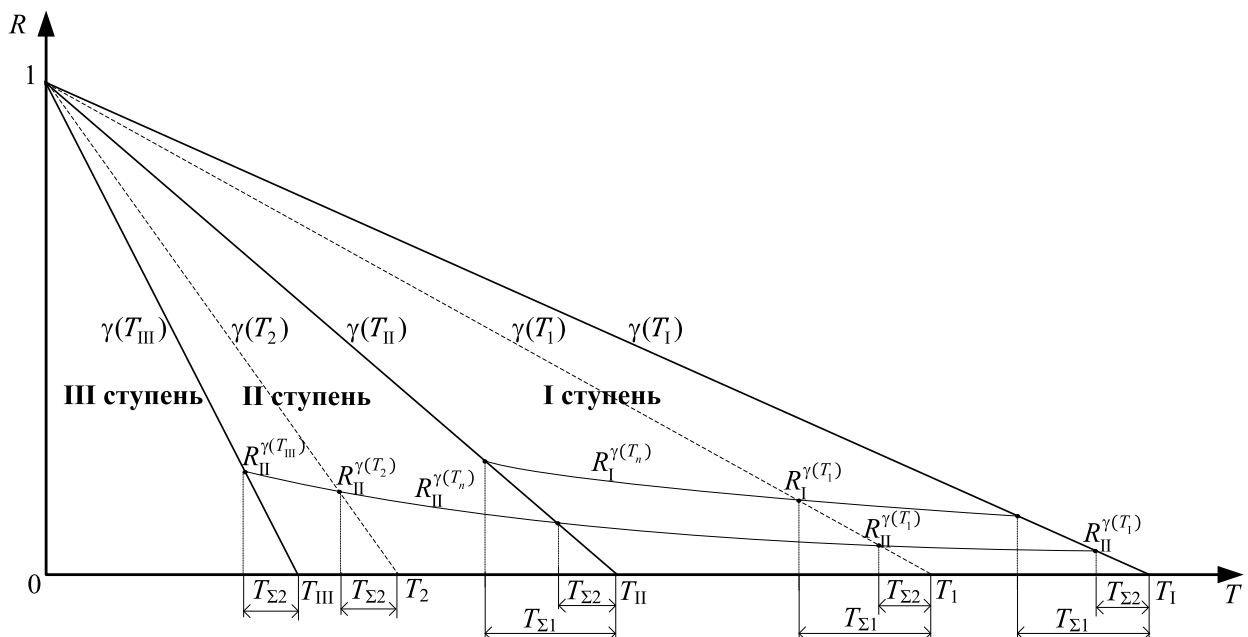


Рис. 3. Иллюстрация работы адаптивного способа управления техническими мероприятиями

Как видно из (4), уставка $R_I^{\gamma(T_1)}$ признака отказа технических мероприятий первой степени будет адаптивно меняться в зависимости от уровня повышенного напряжения, и на диаграмме расхода остаточного ресурса будет представлять собой гиперболу (рис. 3).

Поведение способа на второй степени практически полностью совпадает с поведением на первой степени. Разница лишь в том, что пороговая величина $R_{II}^{\gamma(T_2)}$ признака отказа технических мероприятий второй степени рассчитывается исходя из времени $T_{\Sigma 2}$, нужного для осуществления технических мероприятий третьей степени – отключения оборудования от сети

$$R_{II}^{\gamma(T_2)} = \Delta_R^{T_2} T_{\Sigma 2} = \frac{T_{\Sigma 2}}{T_2}. \quad (5)$$

Величина порога $R_{II}^{\gamma(T_2)}$ (5) также будет зависеть от уровня повышенного напряжения $\gamma(T_2)$. Поэтому для каждой линии расхода ресурса будет свое значение пороговой величины. И, как видно из рис. 3, оно может быть определено как точка пересечения кривой $R_{II}^{\gamma(T_n)}$ с линиями расхода остаточного ресурса. Например, на второй степени пороговая величина $R_{II}^{\gamma(T_2)}$ – точка пересечения с линией $\gamma(T_2)$, а на первой степени $R_{II}^{\gamma(T_1)}$ – с линией $\gamma(T_1)$.

На диаграмме кривая пороговой величины $R_{II}^{\gamma(T_n)}$ берет начало на левой граничной линии $\gamma(T_{III})$ второй степени (точка $R_{II}^{\gamma(T_{III})}$) и заканчивается на правой граничной линии $\gamma(T_I)$ первой степени (точка $R_{II}^{\gamma(T_I)}$). Это дает возможность, в случае последовательного отказа мероприятий первой, а затем и второй степени, выработать признак их отказа и ввести в действие третью степень (в данном случае – дать сигнал на отключение оборудования). Сценарий такого действия способа иллюстрируется примером развития событий по линии $\gamma(T_1)$: при неуспешной работе технических мероприятий в точке $R_I^{\gamma(T_1)}$ способ вводит в действие технические мероприятия второй степени, а затем, при их отказе, в точке $R_{II}^{\gamma(T_1)}$ – мероприятия третьей степени.

При работе способа на последней степени (в данном примере – третьей) оборудование отключается от сети без выдержки времени.

Несложно увидеть разницу в признаках отказа технических мероприятий в устройствах АОПН с контролем продолжительности повышения напряжения и предлагаемого способа. В первых из них считается, что признак отказа технических мероприятий данной степени появился, если длительность повышения напряжения достигла уставки по времени. Предполагается, что начальное значение ресурса изоляции $R = 1$. Тогда уставка должна быть выбрана такой, чтобы на линии с максимальным повышением напряжения данной степени оставалось достаточно времени для срабатывания технических мероприятий других степеней с учетом вероятности последовательного отка-

за последующих ступеней. Для них уставка времени отказа первой ступени на диаграмме (рис. 4) будет представлять вертикальный отрезок, исходящий из точки пересечения линии максимального повышения напряжения $\gamma(T_{II})$ ступени с кривой пороговой величины $R_I^{\gamma(T_n)}$ (из точки $R_I^{\gamma(T_{II})}$). В случае последующего отказа второй ступени в таких устройствах будут приведены в действие технические мероприятия третьей ступени; уставка времени будет выбираться исходя из точки пересечения линии $\gamma(T_{II})$ с кривой пороговой величины $R_{II}^{\gamma(T_n)}$ (точка $R_{II}^{\gamma(T_{II})}$). Аналогично выбирается уставка признака отказа второй ступени (исходя из точки $R_{II}^{\gamma(T_{III})}$).

Как видно из рис. 4, известные устройства во многих случаях преждевременно вводят технические мероприятия следующих ступеней. Например, при повышении напряжения $\gamma(T_I)$ признак отказа первой ступени возникает в точке P_1 , что приведет к преждевременному вводу технических мероприятий второй ступени. Если же и вторая ступень будет неэффективна, то в точке P_2 пересечения линии расхода ресурса $\gamma(T_I)$ с порогом признака отказа второй ступени будет приведено в действие техническое мероприятие третьей ступени, преждевременно отключая оборудование от сети.

Но самый существенный недостаток известных устройств заключается в том, что они не учитывают вероятность возникновения случая, когда начальное значение ресурса может быть не равно 1. Такое возможно, когда повышения напряжения носят перемежающийся характер. Каждый раз при появлении перемежаю-

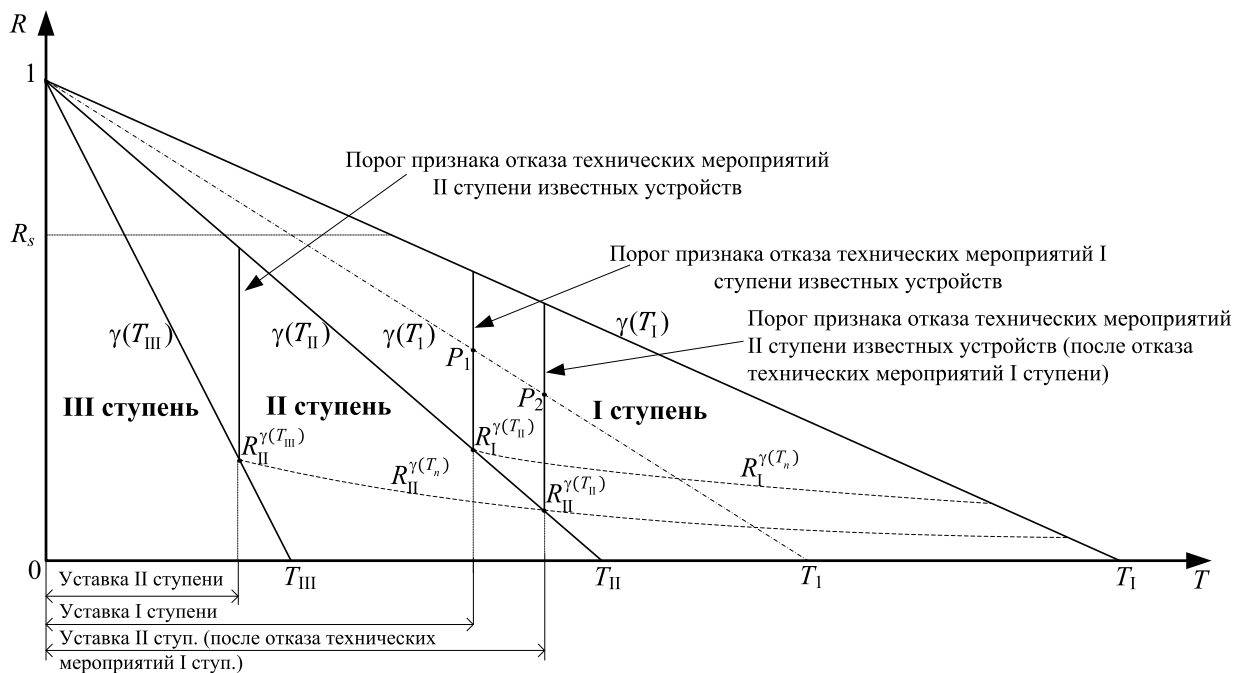


Рис. 4. Пороги признака отказа для АОПН с контролем длительности повышения напряжения на диаграмме расхода остаточного ресурса электрической изоляции

щихся повышений напряжения они начинают отсчитывать их длительность заново. Поскольку истинное начальное значение ресурса в этом случае $R = R_s < 1$, а длительность повышения напряжения эти устройства отсчитывают без учета затраченного ресурса, то технические мероприятия ступеней могут быть введены в действие уже при исчерпанном ресурсе изоляции. Это может привести к повреждению высоковольтного оборудования.

Предлагаемый же способ приводит в действие технические мероприятия ступеней всегда исходя из оценки остаточного ресурса изоляции, что позволяет осуществлять их вовремя.

Адаптивный способ учета восполнения ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения

Способность учитывать процессы восстановления свойств электрической изоляции после устранения повышения напряжения является еще одной важной характеристикой АОПН, определяющей ее уровень технического совершенства. Так, уровни повышения напряжений и допустимые времена нахождения высоковольтного оборудования под их действием регламентированы в стандарте [8] с учетом того, что их воздействие не должно снизить эксплуатационную надежность электрооборудования и не сокращать срок его службы [11, 12]. Полагается, что после уменьшения уровня напряжения до длительно допустимого по прошествии определенного времени ресурс электрической изоляции восстанавливается до исходного значения. При этом должно приниматься во внимание, что процесс восстановления ресурса изоляции зависит от уровня напряжения, действовавшего во время повышения напряжения [8, 12]. Это связано с зависимостью характера деструктивных

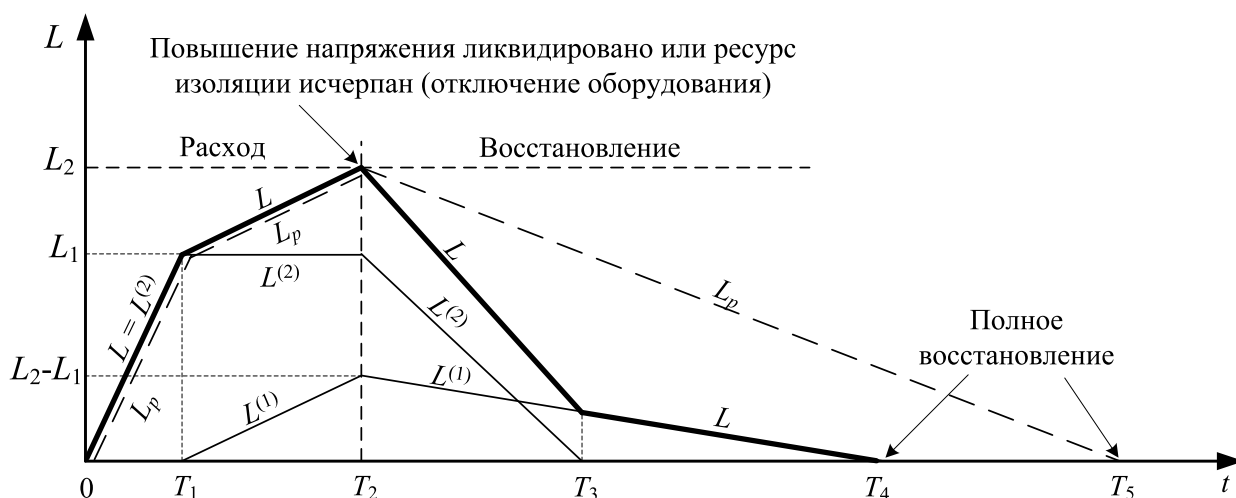


Рис. 5. Процессы учета восстановления ресурса электрической изоляции при изменении уровня повышенного напряжения в предлагаемом способе и существующих устройствах

процессов от уровня действующего напряжения. Например, при повышенном напряжении невысокого уровня изоляция оборудования может находиться под напряжением достаточно долго, и при этом главным фактором разрушения изоляции является ее нагрев. При повышенных напряжениях с высоким уровнем решающую роль играют процессы ионизации изоляционного промежутка, в связи с чем допустимое время нахождения изоляции под напряжением относительно невелико. Из-за относительно короткого времени нахождения изоляции под таким высоким напряжением процессы нагрева изоляции не оказывают столь заметного эффекта на расход ресурса изоляции. Поэтому интенсивность восстановления изоляции в первом случае будет невысокой, а во втором случае будет значительной. Эта разница в процессах восстановления изоляции должна учитываться в АОПН.

Удобно раскрывать сущность работы предлагаемого способа [13] в режиме устранения повышения напряжения или отключения высоковольтного оборудования из-за истощения ресурса изоляции (рис. 5). Будем считать, что с помощью предпринятых технических мероприятий повышенное напряжение снижено до некоторого все еще повышенного уровня в момент времени T_1 , а затем повышение напряжения устранено (или высоковольтное оборудование отключено) в момент времени T_2 .

Рассмотрим вначале для сравнения работу АОПН, использующей фиксированный учет восстановления электрических свойств изоляции защищаемого высоковольтного оборудования. Каждому из уровней повышенного напряжения соответствует своя интенсивность расхода ресурса изоляции. Поэтому вначале расход ресурса изоляции L_p накапливается с интенсивностью $\Delta_L^{(2)}$ (наклонная L_p на рис. 5 при $0 \leq t \leq T_1$);

а затем, при снижении уровня напряжения – с интенсивностью $\Delta_L^{(1)}$ (наклонная L_p при $T_1 < t \leq T_2$):

$$L_p = (t - T_1)\Delta_L^{(1)} + L_1, \quad T_1 < t \leq T_2,$$

(6)

где $L_1 = T_1\Delta_L^{(2)}$ – оценка затраченного ресурса изоляции, вычисленная к моменту времени T_1 применения технических мероприятий по снижению напряжения. К моменту устранения повышения напряжения T_2 оценка расхода ресурса L_p достигнет величины L_2 .

После устранения повышения напряжения (или отключения высоковольтного оборудования из-за истощения ресурса изоляции) известные устройства

начинают учитывать процесс восстановления ресурса изоляции, уменьшая оценку расхода ресурса L_p с фиксированной интенсивностью восстановления Δ_R (наклонная L_p при $T_2 < t \leq T_5$) $L_2 - (t - T_2) \Delta_R$, $T_2 < t \leq T_5$.

(7)

Как видно из (6), оценка величины истраченного ресурса изоляции ведется известными устройствами путем накопления его расхода в единственной переменной L_p . В связи с этим известные устройства в принципе не могут учитывать зависимость характера деструктивных процессов в изоляции от уровня напряжения, действовавшего во время его повышения, и вынуждены использовать некоторый усредненный (фиксированный) учет восстановления ресурса изоляции согласно выражению (7). Как уже отмечалось выше, такой подход к учету восстановления ресурса не соответствует реальным процессам восстановления изоляции.

Этот недостаток известных устройств устраняется предлагаемым способом путем деления диапазона возможных повышений напряжений на ступени восстановления и ведения учета расхода и восстановления ресурса изоляции для каждой ступени отдельно. Своим названием они обязаны новому свойству предлагаемого способа, заключающемуся в его способности учитывать процессы восстановления ресурса после исчезновения повышения напряжения в зависимости от его уровня во время повышения напряжения. Ступени восстановления учитывают разницу в процессах восстановления электрических свойств изоляции в зависимости от характера деструктивных процессов, происходящих в изоляции при различном уровне действующего напряжения. На каждой ступени восстановления учет восстановления ресурса электрической изоляции ведется со своей интенсивностью.

Способ может иметь неограниченное число ступеней восстановления. Стандарт [8] предусматривает их две, поэтому далее работа способа поясняется на примере двух ступеней восстановления. В частности, упомянутый стандарт регламентирует промежуток времени между двумя повышениями напряжения, устанавливая его для повышений напряжения с допустимыми временами меньше 20 мин. (20 с, 1 мин., 5 мин. и 20 мин.) не менее 1 часа, а с допустимыми временами больше 20 мин. (1, 3 и 8 часов) – не менее 12 часов. Поэтому на каждом из этих промежутков времени учет восстановления ресурса электрической изоляции необходимо вести отдельно.

Используя введенное выше понятие ступеней восстановления, будем полагать, что первоначально повышение напряжения в течение времени T_1

находится на уровне 2-ой ступени восстановления, а затем, благодаря принятым техническим мероприятиям, повышенное напряжение понижается до уровня 1-ой ступени восстановления. Поэтому на ступенях восстановления расход ресурса учитывается $t\Delta_L^{(2)}$ для $T_1 < t \leq T_2$ способом отдельно как затраченный ресурс 2-ой ступени

(8)

$$L^{(1)} = (t - T_1)\Delta_L^{(1)}, \quad L^{(2)} = T_1\Delta_L^{(2)} = L_1, \quad T_1 < t \leq T_2.$$

и как затраченный ресурс 1-ой ступени

(9)

На рис. 5 изменение оценок затраченных ресурсов ступеней показано как наклонные $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$.

Общий расход ресурса изоляции определяется суммированием затраченных ресурсов ступеней (8) и (9):

(10)

После устранения повышения напряжения (при $t > T_2$) восполнение ресурса изоляции для каждой ступени восстановления учитывают путем одновременного уменьшения затраченных ресурсов ступеней с интенсивностью восстановления, соответствующей каждой ступени:

$$L^{(1)} = (L_2 - L_1) - (t - T_2)\Delta_R^{(1)}, \quad T_2 < t \leq T_4. \quad (11)$$

и

(12)

На рис. 5 выражения (11) и (12) представлены наклонными $L^{(2)}$ и $L^{(1)}$ при $t > T_2$.

Изменение общего ресурса изоляции оборудования определяется выражением (10) и на рис. 5 показано в виде наклонной L .

Предлагаемый способ позволяет учитывать процессы восстановления электрической изоляции в зависимости от уровня повышения напряжения,

действовавшего до его устранения. Благодаря такому свойству способа повышается точность оценки ресурса изоляции и обеспечивается полноценная эксплуатация высоковольтного оборудования.

Выводы:

1. Новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции.

2. Новый способ формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства устранения повышения напряжения, основанный на адаптивном изменении порога формирования признака отказа технических мероприятий предыдущих ступеней в зависимости от уровня повышения напряжения, позволяет повысить своевременность и обоснованность применения тех или иных технических мероприятий по устранению затянувшихся повышений напряжения.

3. Новый способ учета восстановления ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения использует зависимость характера процесса восстановления ресурса электрической изоляции от уровня повышения напряжения, существовавшего до его устранения. Благодаря этому способ исключает преждевременное отключение электрооборудования, а также его эксплуатацию при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

Литература

1. Петров В.С. Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Петров Владимир Сергеевич. – Чебоксары, 2015. – 154 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ). – М.: Издательство ДЕАН, 2012. – 145 с.
3. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. – М.: Знак, 2011. – 528 с. – 2 т.
4. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
5. СТО 56947007-33.040.20.123-2012. Аттестационные требования к устройствам противоаварийной автоматики (ПА). – ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2012. – 71 с.
6. Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С. Эффективные алгоритмы обработки входных сигналов цифровой автоматики ограничения повышения напряжения // Электрические станции. – 2013. – № 11. – С. 42-45.

7. Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С. Контролируемые величины цифровых систем автоматического ограничения повышения напряжения: новые методы оценки и их характеристики // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 4. – С. 24-29.
8. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998.
9. Розенблюм Ф.М., Салова Г.Л., Брухис В.А., Гладышев И.З., Глускин В.Г. Устройство автоматического ограничения повышения напряжения на базе шкафа автоматики ШП 2704 // Электрические станции. – 1989. – № 4. – С. 60-65.
10. Пат. на изобретение 2556033 РФ, МПК H02H 9/04, G01R 31/02. Способ автоматического ограничения повышения напряжения высоковольтного оборудования // Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». – № 2014121980/07; заявл. 29.05.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
11. Белецкий, З.М. Электрическая прочность изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения при кратковременных воздействиях // Электричество. – 1978. – № 9. – С. 64-67.
12. Лоханин А.К., Сапожников А.В. Допустимые для электрооборудования кратковременные эксплуатационные повышения напряжения частоты 50 Гц // Электротехника. – 1981. – № 5. – С. 3-8.
13. Пат. на изобретение 2556037 РФ, МПК H02H 9/04. Способ автоматического ограничения повышения напряжения высоковольтного оборудования // Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». – № 2014106471/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.

Сведения об авторах



Антонов Владислав Иванович

Окончил в 1978 году факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1985 году защитил в Ленинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование новых принципов построения измерительных органов направленных защит линий электропередачи». Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, главный специалист отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



Наумов Владимир Александрович

Окончил в 2001 году электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, по специальности «инженер», в 2002 году защитил магистерскую диссертацию. В 2005 году защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию по теме «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заместитель генерального директора — технический директор ООО НПП «ЭКРА».



Петров Владимир Сергеевич

Окончил в 2009 году электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2015 году там же защитил кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». Инженер отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».