

КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ГЕНЕРАТОРОВ МАЛЫХ ГЭС

ГУСЕВ Ю.П., ОМОКЕЕВА А.А.

GusevYP@mpei.ru

Aiza9@mail.ru

Московский энергетический институт (технический университет)
Ю.П. Гусев – к.т.н., доц. каф. «Электрические станции», Россия, г. Москва
А.А. Омокеева – аспирант каф. «Электрические станции», Россия, г. Москва

SWITCHING PROCESSES IN CIRCUIT OF GENERATORS OF LOW POWER HYDROELECTRIC STATIONS

GUSEV Y.P., OMOKEEVA A.A.

Aiza9@mail.ru

GusevYP@mpei.ru

Moscow Power Engineering Institute (technical university)
Gusev Y.P. – c.i.s., lecturer of faculty «Electric power station», Russia, Moscow
Omokeeva A.A. – graduate student of faculty «Electric power station», Russia, Moscow

В докладе рассматриваются условия работы генераторных выключателей на малых ГЭС и с помощью специализированной программы EMTP-RV анализируются коммутационные перенапряжения

Особенности работы генераторных выключателей на малых ГЭС. Энергосистема Кыргызстана представлена 19 электростанциями, из них 17 ГЭС и 2 ТЭЦ. В соответствии с классификацией ООН в Кыргызстане к малым ГЭС (гидроустановки мощностью от 1 до 10 МВт) относятся действующие каскад Аламединских ГЭС (АГЭС) из девяти станций общей мощностью 35,37 МВт и Быстровская ГЭС мощностью 8,7 МВт. Как правило, схемы электрических соединений малых ГЭС выбираются с учетом их переменного режима работы, высокой маневренности и относительной простоты технологического процесса.

Особенности режимов работы ГЭС малой мощности обусловлены широким применением укрупненных и объединенных блоков. На электрических станциях малой мощности обычно устанавливают несколько синхронных генераторов, подключаемых к трансформатору общим выключателем. На рис. 1 изображены блоки действующих электростанций. Их схемы даны для двухмашинных агрегатов, на рис. 1, б два гидроагрегата подключены к одному выключателю. В этом случае необходима их групповая синхронизация. Генераторные выключатели, устанавливаемые в цепях генераторов энергоблоков, осуществляют как оперативные, так и защитные функции.

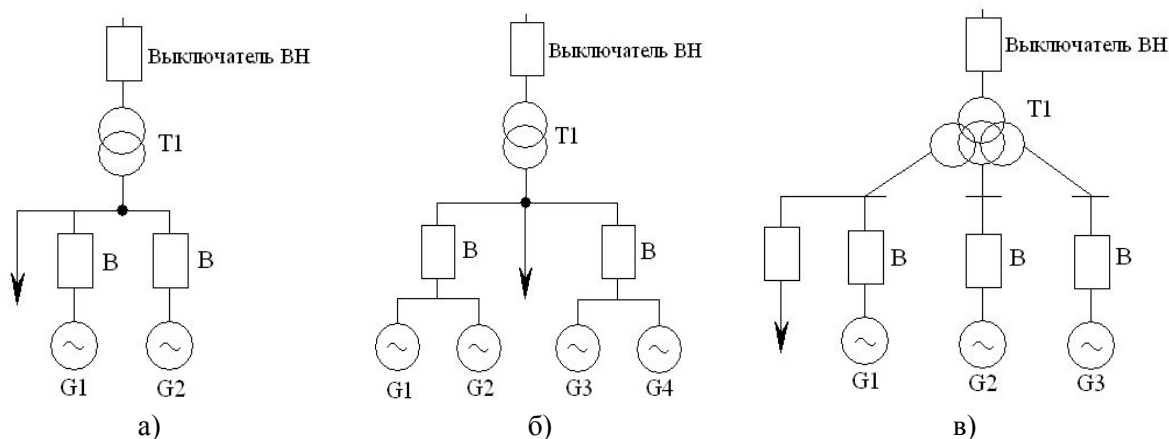


Рис.1. Варианты схем блоков малых ГЭС

Для схем с укрупненными электрическими блоками на ГЭС (рис.1, б, в) токи короткого замыкания (КЗ) от системы и других генераторов через выключатель превышают токи КЗ от генератора в 3 – 6 раз. Установка генераторного выключателя в схеме блока уменьшает перегрузки генератора и трансформатора собственных нужд (ТСН) при несимметричных КЗ в сети высшего напряжения и при неправильной синхронизации. Это связано с тем, что выключатели на стороне высшего напряжения имеют обычно меньшее время отключения по сравнению со временем отключения генераторного выключателя. Поэтому при повреждении в цепи генераторного выключателя сначала отключается выключатель на стороне высшего напряжения, а затем генераторного выключателя. Применение генераторного выключателя в данном случае предпочтительно, так как позволяет сократить продолжительность тока КЗ до 0,06—0,1 с.

В настоящее время в электроэнергетической системе эксплуатация электроустановок осложнена большим количеством старого электрооборудования с малым остаточным ресурсом и низкой надежностью, что приводит к необходимости совершенствования условий эксплуатации силового оборудования. Установленные на электрических станциях генераторные выключатели масляного типа не только выработали свой назначенный срок службы, но морально и физически устарели. Из всех существующих современных типов выключателей по параметрам высокой надежности, экологичности, простоте эксплуатации, экономичности наиболее перспективными являются вакуумные и элегазовые выключатели. Но практика показывает, что работа этих выключателей сопровождается большими перенапряжениями. Поэтому внедрению таких выключателей в сетях генераторного напряжения блока электрических станций должны предшествовать исследования процессов, происходящих при отключении выключателями токов нагрузки, короткого замыкания и пусковых токов генераторов в блоках, что особенно важно для пиковых и полупиковых гидроэлектростанций. Наиболее тяжелым режимом является срабатывание выключателей при групповых прямых пусках генераторов. Это событие в эксплуатационной практике достаточно маловероятное, но сопровождается опасными перенапряжениями.

Техническое перевооружение и реконструкция распределительных устройств имеют высокую эффективность. Тем не менее необходимо тщательное технико-экономическое сопоставление целесообразности поддержания в работоспособном состоянии устаревших и снятых с производства выключателей по сравнению с заменой их на новые типы оборудования.

Существенной характеристикой выключателей разных типов являются характер и скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка. Они достаточно неоднозначны вследствие случайного поведения дуги в межэлектродном пространстве выключателя. В большинстве случаев закон изменения электрической прочности межконтактного промежутка полагают линейным независимо от наличия повторных пробоев. В выключателях более ранних разработок скорость роста электрической прочности составляет ($K = du_{эп} / dt$) 15 – 30 кВ/мс, в то время как у современных – 50 кВ/мс и более. Быстрый спад с последующим *срезом тока* и *эскалацией напряжения* являются причинами перенапряжений, возникающих при срабатывании выключателей.

Процесс восстановления напряжения на полюсах выключателя и его аналитический расчет. Напряжение, появляющееся на полюсах выключателя в переходном процессе непосредственно после погасания дуги, называется *восстанавливающимся напряжением*. Процессы, сопровождающие отключение первого полюса генераторного выключателя зависят как от параметров расчетной схемы, так и характеристик дугогасящей камеры (ДК). Параметры схемы определяют так называемое собственное переходное восстанавливающееся напряжение (СПВН) на контактах выключателя. Под СПВН понимается напряжение на контактах выключателя, моделируемого в виде идеального ключа, т.е. без учета процессов в дуге.

Если замыкание произошло вблизи выключателя (для однофазной цепи, рис.2, а), то пока выключатель замкнут, а также после размыкания контактов, пока дуга еще горит, напряжение $u_B = 0$, а ток:

$$i_k = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

где U_m – амплитудное значение напряжения источника, r, L – параметры цепи с источником, $\varphi = \arctg \omega L/r$, а ψ – фаза включения.

Через выключатель идет ток $i_k(t)$. Если в момент времени, когда ток равен нулю, замкнут источник энергии и в ветвь дугового промежутка ввести ток $i_k(t)$, направленный встречно (рис.2, в), то напряжение на разомкнутых контактах выключателя будет соответствовать искомому восстанавливающему напряжению.

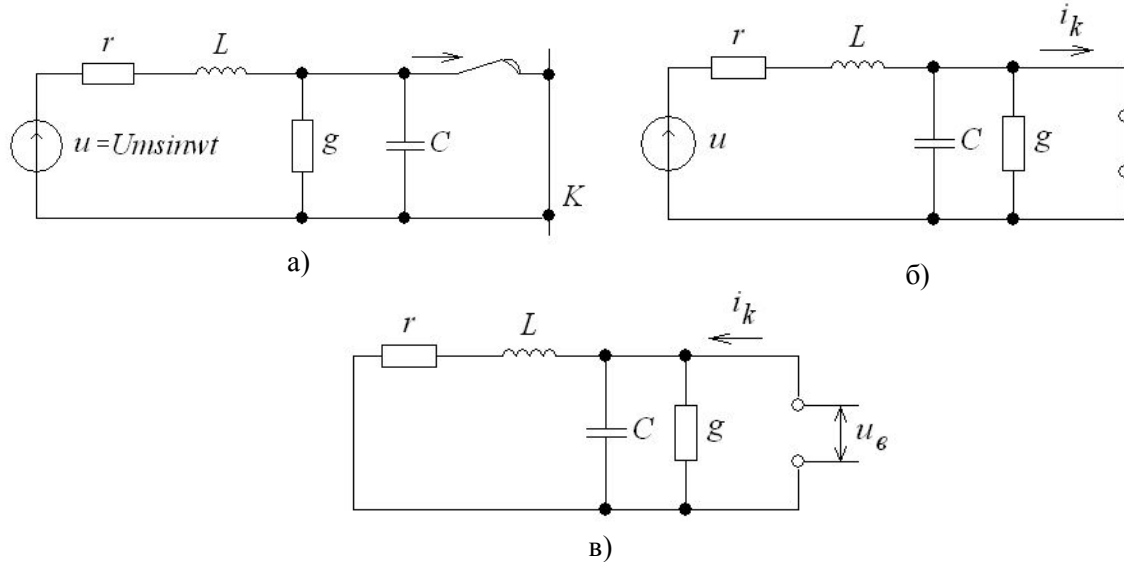


Рис. 2. Схемы, для определения восстанавливающего напряжения на полюсе выключателя

Операторное выражение для восстанавливающегося напряжения имеет следующий вид:

$$u_B(p) = \frac{1}{Y(p)} i_k(p), \quad (1)$$

где $i_k(p)$ – операторное выражение отключаемого тока КЗ; $Y(p)$ – входная проводимость схемы на рис. 2, в в операторной форме.

Изменение тока КЗ вблизи его нулевого значения примем линейным, что упрощает задачу и соответствует максимальной скорости восстанавливающегося напряжения. Следовательно, выражение для тока может быть приближенно представлено следующим образом:

$$i_k = I_m \sin \omega t \approx I_m \omega t.$$

При таком допущении изображение тока по Лапласу будет:

$$i_k(p) = \frac{I_m \omega}{p^2}. \quad (2)$$

Оператор входной проводимости схемы на рис.2, в

$$Y(p) = pC + g + \frac{1}{pL + r}. \quad (3)$$

Подставив выражения для тока (2) и проводимости (3) в равенство (1), получим:

$$u_B(p) = \frac{I_m \omega}{LC} \cdot \frac{pL + r}{p^2 \left[p^2 + p \left(\frac{r}{L} + \frac{g}{C} \right) + \frac{1}{LC} (1 + rg) \right]}, \quad (4)$$

где p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения

$$p^2 + 2bp + \omega_1^2 = 0,$$

в котором

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{1}{2} \left(\frac{r}{L} + \frac{g}{C} \right); \\ \omega_1 &= \sqrt{\frac{1}{LC} (1 + rg)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Отношение $d = b/w_1$ называется *показателем затухания*.

Операторному выражению (4) соответствует следующая функция восстанавливающегося напряжения во времени:

$$u_B = \frac{I_m w}{C} (Ae^{p_1 t} + Be^{p_2 t} + K + K_1 t), \quad (6)$$

где

$$A = \frac{p_1 + \frac{r}{L}}{p_1^2 (p_1 - p_2)}; \quad B = \frac{p_2 + \frac{r}{L}}{p_2^2 (p_2 - p_1)}; \quad K = \frac{p_1 p_2 + \frac{r}{L} (p_1 + p_2)}{p_1^2 p_2^2}; \quad K_1 = \frac{\frac{r}{L}}{p_1 p_2}.$$

Характер переходного процесса определяется видом корней уравнения (5):

$$p_{1,2} = -b \pm \sqrt{b^2 - w_1^2}. \quad (7)$$

Для расчета восстанавливающегося напряжения вместо формулы (6) удобно использовать, в зависимости от значения показателя затухания d , одно из следующих упрощенных выражений:

а) при $d > 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\Pi,0} w L (1 - \cos w_0 t), \quad (8)$$

где $w_0 = 1/\sqrt{LC}$;

б) при $d = 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\Pi,0} w L \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{2r}{L} t \right) e^{-\frac{2r}{L} t} \right]; \quad (8,a)$$

в) при $d < 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\Pi,0} w L \left(1 - e^{-\frac{r}{L} t} \right). \quad (8,b)$$

В первом случае (при $d > 1$) имеет место одночастотный колебательный процесс восстановления напряжения с частотой, кГц,

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (9)$$

амплитудой, кВ,

$$U_{B,\max} = \sqrt{2} I_{\Pi,0} w L \quad (10)$$

и средней скоростью восстановления напряжения, кВ/мкс,

$$v_{cp} = 2f u_{B,\max}. \quad (11)$$

Таким образом, процесс восстановления напряжения на полюсах выключателя принято характеризовать *частотой, скоростью восстанавливающегося напряжения и коэффициентом превышения амплитуды*. Скорость восстанавливающегося напряжения, В/с, для одночастотного контура может быть определена как отношение максимального напряжения в

переходном процессе к половине периода свободных колебаний: $v_{cp} = \frac{U_{B,\max}}{T_1/2}$.

Компьютерный анализ перенапряжений в цепях генераторного напряжения, вызванных коммутациями выключателями. При исследовании работы существующих электрических сетей, а также проектировании новых, возникает ряд задач, связанных с проведением расчетов процессов и режимов эксплуатации как отдельных компонентов сети, так и энергосистемы в целом. При анализе эксплуатационных или аварийных режимов сети необходимо учитывать различного рода коммутации, возмущения и временные изменения параметров электрооборудования и связанные с этим изменения токов и напряжений, в общем случае носящие нелинейный характер.

Расчет восстанавливающегося напряжения на контактах генераторного выключателя может быть проведен с использованием компьютерной техники. В настоящее время во всем мире исследователи-электроэнергетики широко используют программу расчета электромагнитных

переходных процессов ЭМТР (Electro- Magnetic Transient Program), которая обладает мощным графическим интерфейсом EMTPWorks. С помощью этой программы могут моделироваться сложные сети и системы управления произвольной структуры, анализируются коммутационные и грозовые перенапряжения, исследуются координация изоляции и вращательные колебания электрических машин и т.д.

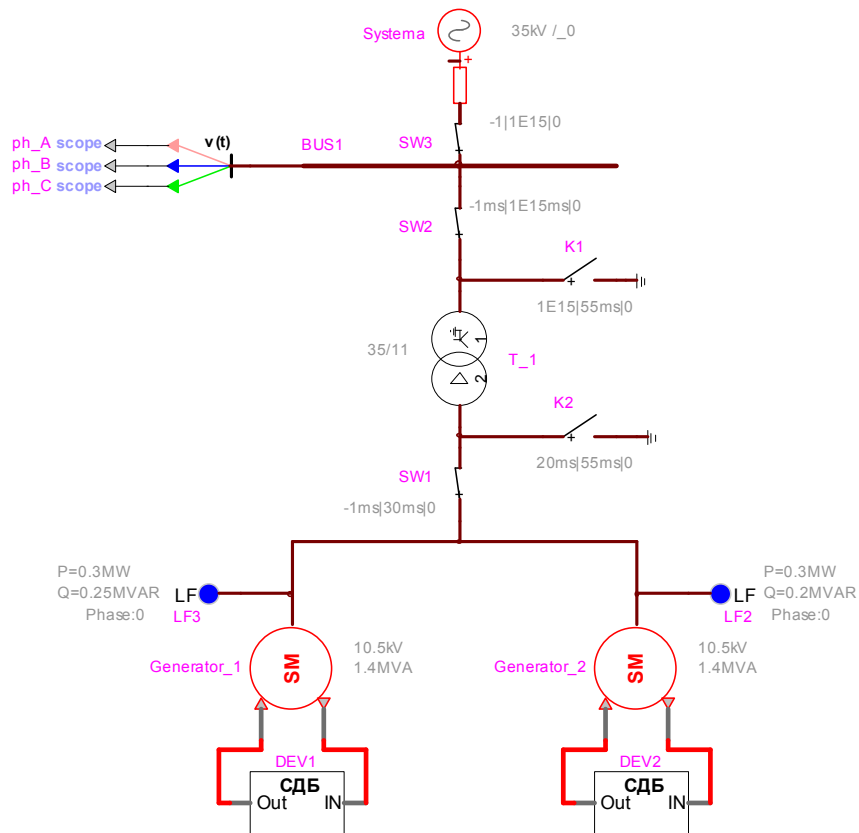


Рис. 3. Расчетная схема математической модели энергоблока малой ГЭС

В данной работе для компьютерного анализа перенапряжений, возникающих при коммутациях выключателями использовалась, реализованная в программном комплексе EMTP-RV, расчетная схема математической модели энергоблока станции малой мощности (рис. 3). Расчетными случаями являются отключение тока нагрузки, трехфазное КЗ (продолжительностью 55 мс) на стороне высокого напряжения трансформатора (точка K1) и в сети генераторного напряжения (точка K2).

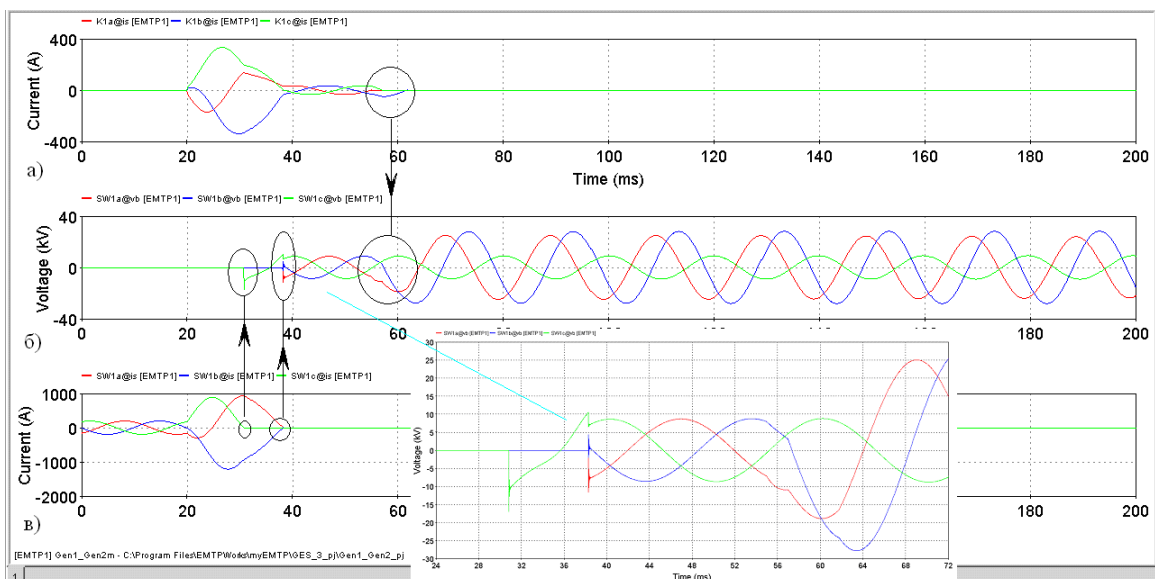


Рис. 4. Осциллограммы: а) фазные токи в месте возникновения КЗ на стороне высокого напряжения трансформатора (точка K1); б) восстанавливающиеся напряжения фаз на контактах выключателя; в) фазные токи протекающие через выключатель

На рис. 4. приведен процесс отключения выключателя при учете повторных зажиганияй дуги, восстановление напряжений фаз на контактах выключателя при срезах токов соответствующих фаз. При КЗ в сети генераторного напряжения токи КЗ от системы через выключатель превышают токи КЗ от генератора почти в 4 раза. Выключатель отключает ток при прохождении его через ноль (со сдвигом по времени в разных фазах). КЗ в сети генераторного напряжения (точка K2) сопровождается большими токами и перенапряжениями на контактах выключателя ($2 \cdot U_{\phi}$).

С момента размыкания контактов выключателя начинается переходной процесс, в течение которого напряжение на полюсе выключателя должно восстановиться от 0 до напряжения источника. Чем больше время между началом расхождения контактов и моментом прохождения током промышленной частоты через нулевое значение, тем менее вероятны повторные зажиганияй и соответственно – эскалация напряжения. Полученные осциллограммы показали, что основной характеристикой процесса, определяющей возможность повторных зажиганияй дуги в выключателе, является восстановление электрической прочности межконтактного промежутка после погасания дуги.

Исследования процессов отключения в цепях генераторного напряжения с помощью выключателей определили основные характеристики в расчетах: ток среза при отключении тока промышленной частоты; скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка после погасания дуги; время сдвига между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока промышленной частоты через нулевое значение; предельная крутизна тока высокочастотных колебаний в момент прохождения тока при повторных зажиганияй дуги через нулевое значение, определяющая возможность погасания дуги при ее повторных зажиганияй.

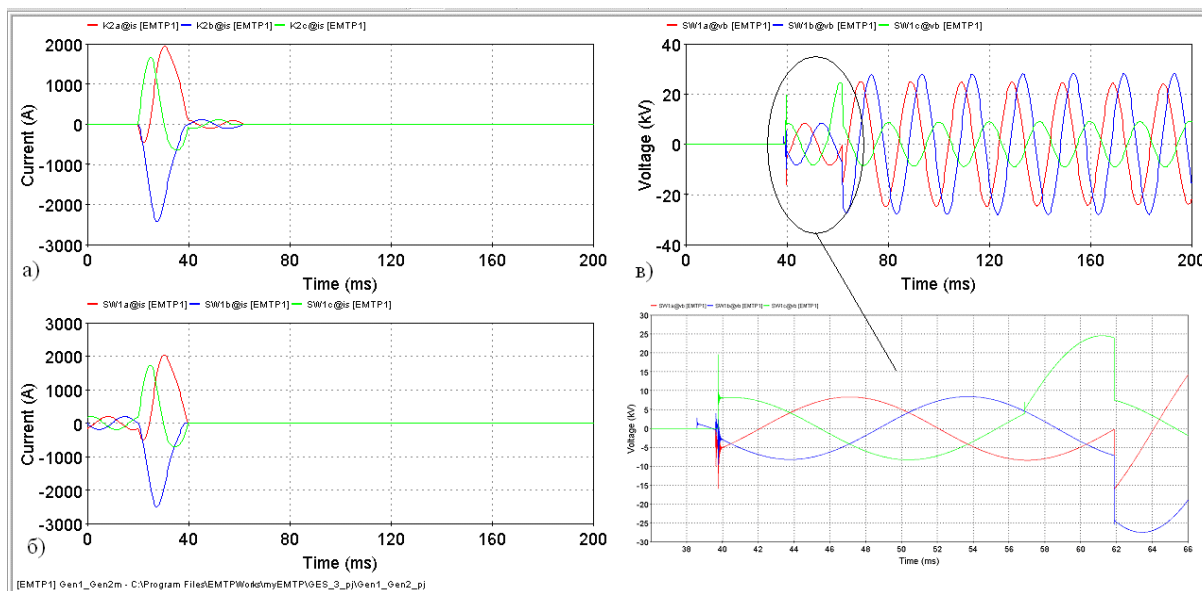


Рис. 5. Осциллограммы: а) токов в месте возникновения КЗ в сети генераторного напряжения (точка K2); б) токов протекающих через выключатель; в) восстанавливающиеся напряжения фаз на контактах выключателя

Вывод: Тяжесть процессов, сопровождающих отключение выключателя, зависит от параметров генератора и трансформатора блока, определяющих частоту собственных колебаний переходного коммутационного процесса, а также протяженности и конструкции токоведущих цепей, связывающих генератор – выключатель – трансформатор. Внедрение выключателей нового поколения требует проведения исследований переходных процессов. Для

повышения коммутационного ресурса генераторных выключателей блоков ГЭС малой мощности необходимо обоснование типа и характеристик выключателей; оценка уровней и причин возникновения перенапряжений при коммутации различными видами выключателей; определение и анализ степени оправданности перехода от маломасляных к вакуумным и элегазовым выключателям; разработка рекомендаций по областям применения каждого вида выключателей.

Литература

1. Васильев А.А. Электрическая часть станций и подстанций. –М.: Энергия, 1980.
2. Борисов С.А., Качесов В.Е. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки// Электрические станции. 2006. №11. С. 51 – 59.
3. Кадомская К.П., Хныков В.А. Процессы в сети генераторного напряжения энергоблоков при коммутациях вакуумными выключателями// Энергетик. 2003. №2. С. 27 – 29.
4. Tadashi K., Takeshi Sh., Susumi N., Satoru Y., Yoshihiro K.// Electrical Engineering in Japan, Vol. 141, No. 4, 2002.
5. Ezra P.A., Rene Peter Paul Smeets, Marjan Popov, Lou van der Sluis//IEEE Transaction on plasma science, Vol. 35, No. 4, August 2007.