

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЛАВНОЙ СХЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИЯХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н.

Донецкий национальный технический университет  
svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsnars@skif.net

*The article includes perfection of mathematical simulation methods for open-phase conditions of circuit-breakers simulation in main electrical connections scheme of thermal and nuclear power plants. The new discrete simulator is describing in this article. There is conversion of differential equations system to algebraic form take place in this simulator or mathematical model. Also sample of open-phase condition with using this simulator are shown.*

В настоящее время на тепловых и атомных электрических станциях применяются схемы открытых распределительных устройств (ОРУ), собранных по схемам две системы сборных шин с обходной и полуторная схема (3/2). С целью обеспечения устойчивой работы генераторов электростанций при симметричных и несимметричных коротких замыканиях (КЗ) применяются быстродействующие автоматические выключатели и устройства релейной защиты и автоматики. На большинстве ОРУ Украины эксплуатируются воздушные выключатели напряжением 110-750 кВ типа ВВД, ВВБ, ВВН, ВВВ и т.д. Коммутационные аппараты такого типа имеют модульное исполнение и пневматический привод. Опыт эксплуатации показывает, что эти выключатели имеют большое количество отказов в срабатывании из-за различного рода неисправностей [1]. Из-за неполнофазных отключений выключателей в нормальных и аварийных режимах обязательным является применение устройств резервирования отказа выключателей (УРОВ). При этом для выбора уставок устройств релейной защиты и автоматики и оценки динамической устойчивости генераторов требуется совершенствование методов математического моделирования с учётом неисправностей выключателей и устройств релейной защиты и автоматики. Этим вопросам посвящена настоящая работа.

В настоящее время, как правило, для исследования неполнофазных режимов применяют метод симметричных составляющих, который справедлив для анализа стационарных режимов и в котором используются схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Однако этот метод вызывает затруднения и не совсем корректен при рассмотрении электромеханических переходных процессов, происходящих в турбогенераторах, трансформаторах, автотрансформаторах и в другом оборудовании при коротких замыканиях, сопровождающихся неполнофазными отключениями выключателей. Для создания такого класса математических моделей требуется полные математические описания всех элементов главной схемы электрических соединений электрической станции на основе полных дифференциальных уравнений.

Уравнения для элементов, обладающих пофазной симметрией (ЛЭП, трансформатор, кабель), записываются в трёхфазной системе координат  $a, b, c$  или в двухфазной системе  $\alpha, \beta$ , то есть в неподвижной относительно статоров генераторов. Для симметричных электрических машин (асинхронные двигатели) используются система координат  $\alpha, \beta$ , а для несимметричных (синхронные генераторы и двигатели) – система координат, жёстко связанная с осями  $d, q$  ротора. При этом на каждом шаге расчёта для синхронных машин осуществляется пересчёт режимных параметров от осей  $d, q$  к осям всех остальных элементов  $a, b, c$  или  $\alpha, \beta$ .

В соответствии с заданной схемой соединений записываются уравнения связи между элементами, с помощью которых определяются узловое напряжения в схеме, а затем решаются дифференциальные уравнения отдельных агрегатов.

В ранее разработанных математических моделях многомашинных систем [2] для анализа переходных процессов (ПП) используются системы дифференциальных уравнений, решаемые с помощью явных методов численного интегрирования. При вычислении подобных систем часто возникают трудности, связанные с нарушением численной устойчивости, особенно при моделировании режимов коммутаций выключателей, а также при исследовании систем с большим количеством элементов.

Наиболее перспективным для получения устойчивой численной модели энергосистемы является использование неявных методов интегрирования. Для реализации неявных методов разрабатываются дискретные модели (ДММ) [3], цель которых – замена системы дифференциальных уравнений системой алгебраических путём замены производных конечными разностями различного порядка.

Преобразованные для ДММ уравнения Парка-Горева синхронной машины в матричной форме имеют вид:

$$L pI = U - R I - \Omega L I; \quad p\omega = \frac{1}{T_j}(m - mc); \quad p\gamma = \omega,$$

$$m = \left( L_{\mu d} i_{sq} \left( i_{sd} + i_{rd1} + i_{rd2} + i_{fd} \right) = L_{\mu q} i_{sd} \left( i_{sq} + i_{rq1} + i_{rq2} \right) \right) \cdot (\cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном})^{-1}$$

где

$$L = \begin{pmatrix} Ld & 0 \\ 0 & Lq \end{pmatrix}; \quad Ld = \begin{pmatrix} Lsd & L\mu d & L\mu d & L\mu d \\ L\mu d & Lrd1 & L\mu d & L\mu d \\ L\mu d & L\mu d & Lrd2 & L\mu d \\ L\mu d & L\mu d & L\mu d & Lfd \end{pmatrix}; \quad Lq = \begin{pmatrix} Lsq & L\mu q & L\mu q \\ L\mu q & Lrq1 & L\mu q \\ L\mu q & L\mu q & Lrq2 \end{pmatrix};$$

$$Lsd = Ls + L\mu d; \quad Lsq = Ls + L\mu q; \quad Lfd = Lf + L\mu d; \quad R = \text{diag}(Rs, Rrd1, Rrd2, Rfd, Rs, Rrq1, Rrq2);$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega R \\ \Omega R & 0 \end{pmatrix}; \quad \Omega R = \begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$I = (i_{sd}, i_{rd1}, i_{rd2}, i_{fd}, i_{sq}, i_{rq1}, i_{rq2})^T; \quad pI = (pi_{sd}, pi_{rd1}, pi_{rd2}, pi_{fd}, pi_{sq}, pi_{rq1}, pi_{rq2})^T;$$

$$U = (u_{sd}, 0, 0, u_{fd}, u_{sq}, 0, 0)^T,$$

где  $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd1}, i_{rd2}, i_{fd}, i_{rq1}, i_{rq2}, pi_{sd}, pi_{sq}, pi_{rd1}, pi_{rd2}, pi_{fd}, pi_{rq1}, pi_{rq2}$  - токи и производные токов обмотки статора, роторных контуров и обмотки возбуждения по осям  $d, q$ ;

$u_{sd}, u_{sq}, u_{fd}$  - напряжения обмотки статора по осям  $d, q$  и напряжение возбуждения;

$Rs, Rrd1, Rrq1, Rrd2, Rrq2, Rfd$  - активные сопротивления обмотки статора, контуров ротора и обмотки возбуждения по осям  $d, q$ ;

$Lsd, Lsq, Lrd1, Lrq1, Lrd2, Lrq2, Lfd$  - синхронные индуктивности обмотки статора, контуров ротора и обмотки возбуждения по осям  $d, q$ ;

$Ls, Lf$  - индуктивности рассеяния обмотки статора и обмотки возбуждения;

$L\mu d, L\mu q$  - индуктивности ветвей намагничивания по осям  $d, q$ ;

$\omega$  - частота вращения ротора СМ;

$Tj$  - постоянная времени привода СМ, с;

$m, mc(\omega)$  - электромагнитный вращающий момент и момент сопротивления соответственно;

$\gamma$  - угол поворота ротора (между осью фазы А обмотки статора и осью  $d$  ротора СМ).

Приведенным выше уравнениям соответствует схема замещения СМ, показанная на рис. 1.

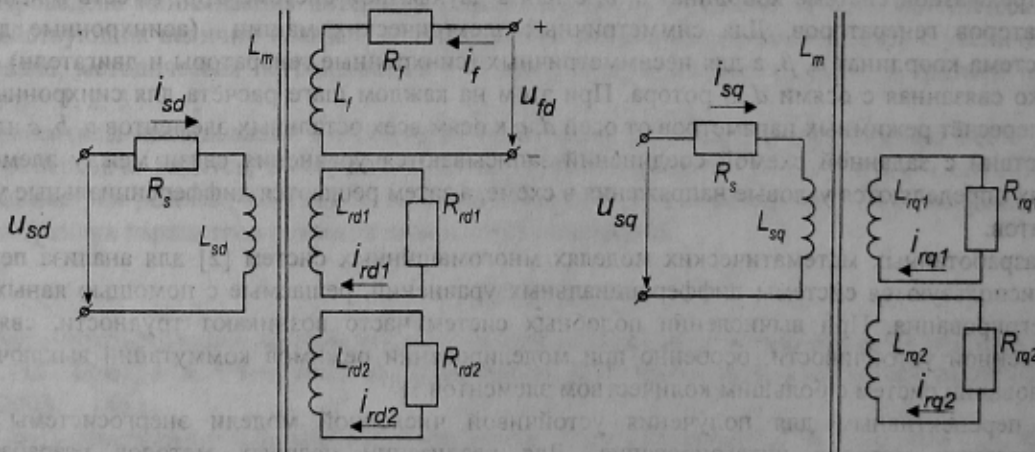


Рис. 1 - Схема замещения синхронной машины по осям  $d$  и  $q$

С помощью ДММ производится расчёт мгновенных значений токов и напряжений, оценивается поведение генераторов при различных видах КЗ и различной их удалённости, поведение асинхронных и синхронных двигателей на секциях собственных нужд, а также может быть выполнен анализ асинхронных режимов турбогенераторов, возникающих при потере возбуждения и неполнофазных отключениях выключателей. При этом представляется возможным определять предельное время допустимой длительности КЗ из условия обеспечения динамической устойчивости синхронных генераторов и с учётом получаемых результатов осуществлять выбор и уточнение уставок устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Модели коммутационных аппаратов выполнены в виде активных сопротивлений в каждой из фаз.

При включённом аппарате данные сопротивления малы, а при отключённом – большие. Для моделирования КЗ предусмотрены шунты с фазными и междуфазными активно-индуктивными сопротивлениями. Модель реализована в программном продукте PowerNet™ benchmark.

Для примера приведём результаты моделирования несимметричного режима, вызванного неполнофазным отключением выключателя в главной схеме электрических соединений Южно-Украинской атомной электростанции (ЮУ АЭС) при однофазном коротком замыкании в конце ЛЭП 330 кВ. Фрагмент данной схемы представлен на рис. 2. Главная схема ЮУ АЭС состоит из трёх энергоблоков, с установленными турбогенераторами типа ТВВ-1000, мощностью 1000 МВт каждый. Открытые распределительные устройства (ОРУ) напряжением 330 кВ и 750 кВ собраны по схеме 3/2 и связаны между собой автотрансформаторной связью.

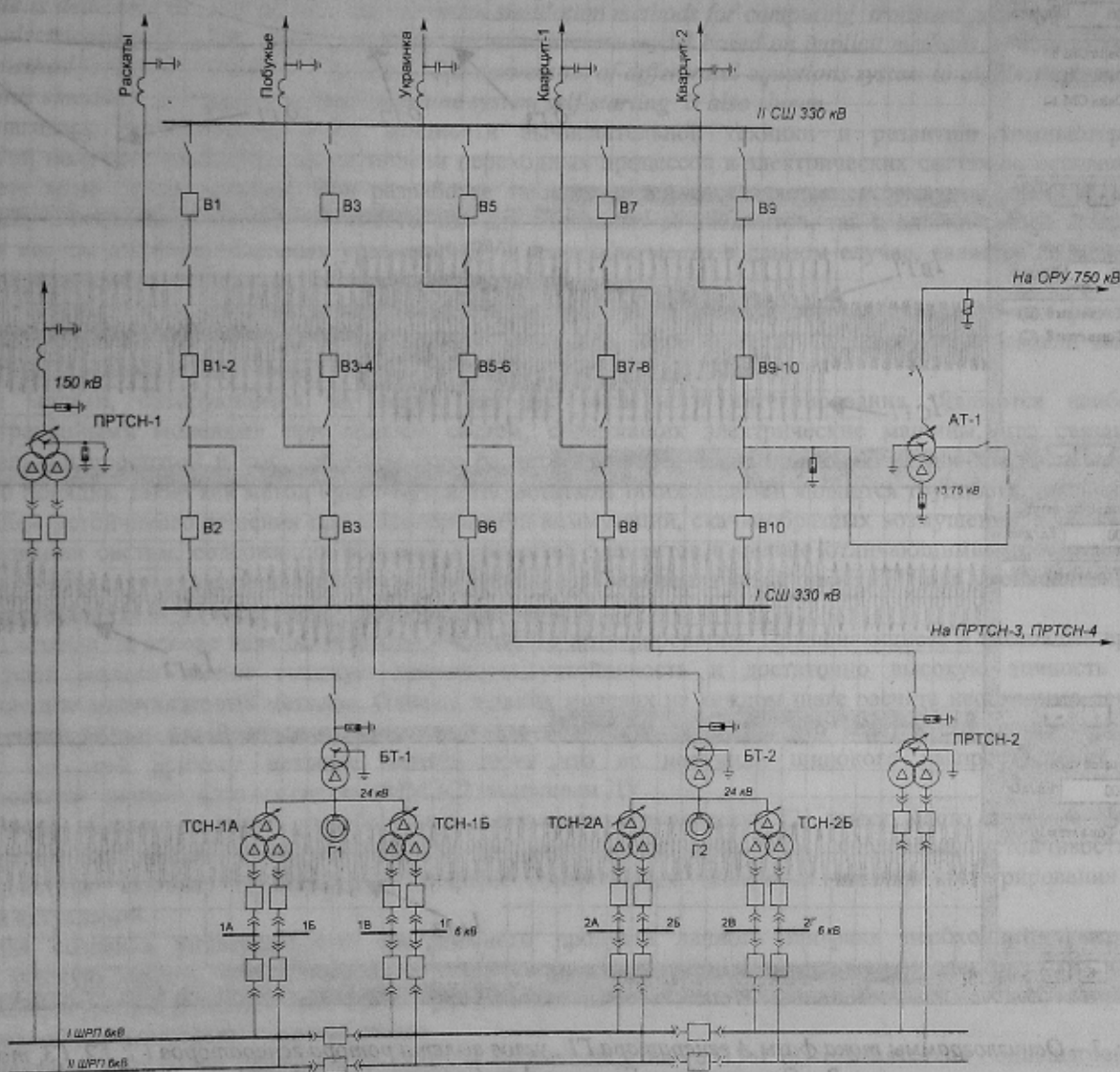


Рис. 2 – Фрагмент схемы главных электрических соединений Южно-Украинской АЭС

На рис. 3 представлены расчётные осциллограммы переходного процесса, на которых показаны токи статоров и углы вылета роторов генераторов. Доаварийный режим зафиксирован от 0 до 0,25 с; однофазное КЗ фазы А на землю в конце ЛЭП 330 кВ (Раскаты) продолжалось от 0,25 до 0,75 с; при 0,75 с возникло неполнофазное отключение выключателя 330 кВ В1-2 (фаза А осталась включенной, а фазы В, С – отключились) и произошёл запуск УРОВ, которое через 0,5 с подействовало на отключение выключателя В2 блока со стороны первой системы шин 330 кВ. В период времени от 0,75 до 1,25 с имел место неполнофазный режим работы генератора по фазе А на однофазное КЗ на стороне 330 кВ. АГП генератора оставалось включённым.

Как видно из рис. 3 на осциллограмме углов вылета роторов генераторов теряет устойчивость только турбогенератор Г1, остальные Г2 и Г3 находятся в режиме качаний. Максимальное амплитудное значение тока фазы А генератора Г1 составляет порядка 60 кА при неполнофазной работе.

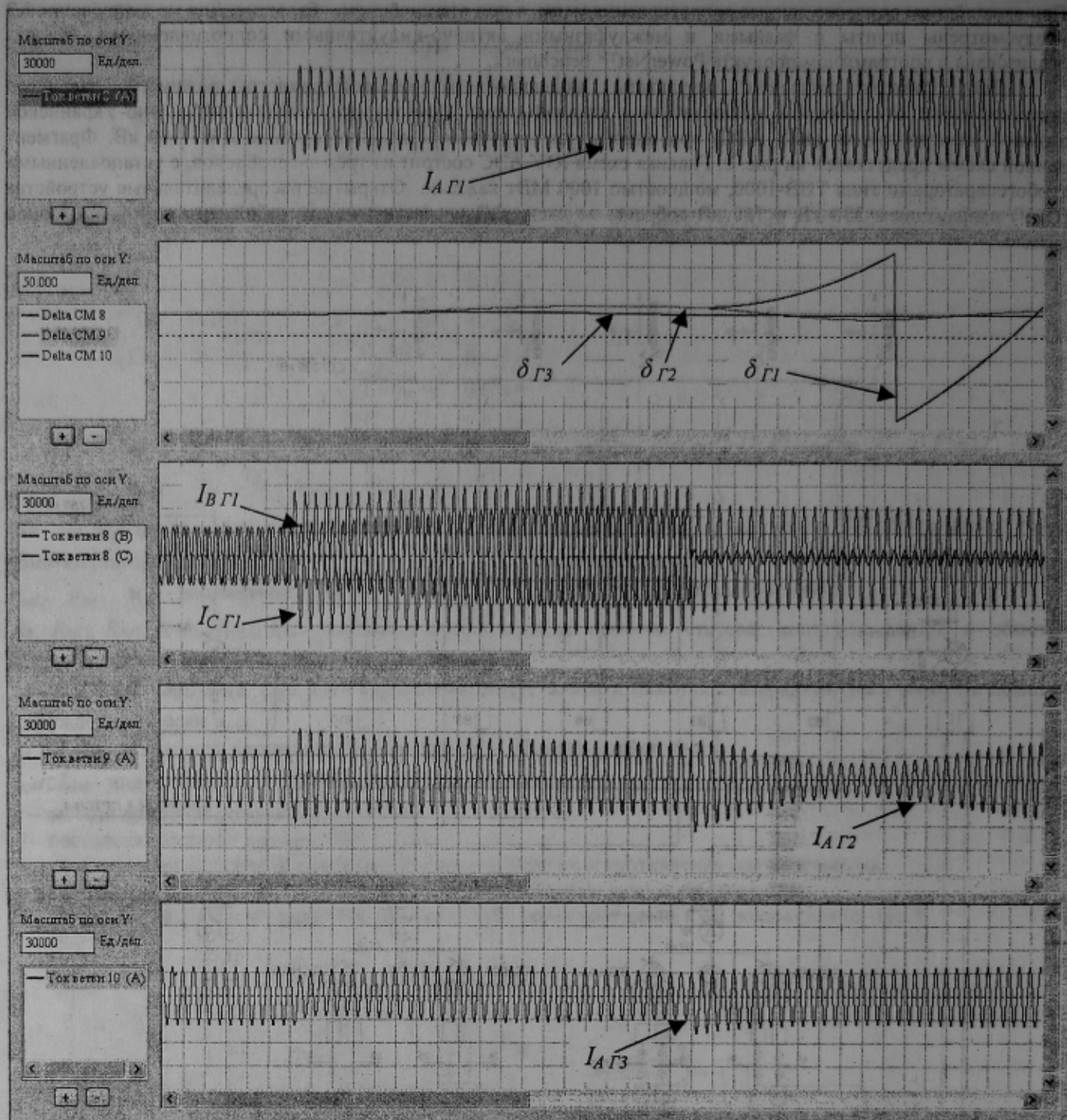


Рис. 3 – Осциллограммы тока фазы А генератора Г1, углов вылета ротора генераторов Г1, Г2, Г3, токов фаз В и С генератора Г1, тока фаз А генераторов Г2 и Г3.

**Вывод.** Рассмотренная математическая модель позволяет выполнить анализ поведения турбогенераторов электрической станции при КЗ в главной схеме электрических соединений при КЗ, сопровождающихся неполнофазными отключениями выключателей, а также уточнить уставки срабатывания устройств защит и автоматики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Меженкова М.А. Математическая модель электростанции для анализа переходных процессов и оценки поведения устройств релейной защиты. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, ДонНТУ, 2002. – 258 с.
2. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Уч. пособие, Донецк, ДонНТУ, 2002. – 136 с.
3. Ел Джуфот Салех. Математическое моделирование переходных процессов в узлах энергосистем с двигательной нагрузкой. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, ДонНТУ, 1996. – 215 с.