

- исследовать переходные процессы в каждом элементе автономной электростанции и системе в

целом, что отвечает требованию структурного моделирования сложных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веретенников Л.П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. – Л.: Судостроение, 1975. – 367 с.
2. Тужик С.К. К выявлению напряжения при исследовании группы электрических машин на математической модели // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1964. – № 12. – С. 1–6.
3. Климанов О.Н. Моделирование апериодических составляющих синхронного генератора автономной энергетической системы // Труды ЦНИИСЭТ. – 1974. – Вып. 9. – С. 21–29.

4. Хижняков Ю.Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 114 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1973. – 752 с.
6. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с немец. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Поступила 06.03.2009 г.

УДК 621.311.004.13

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НУРЕКСКОЙ ГЭС ПУТЕМ ОТКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

А.Г. Фишов, Л.С. Касобов\*

Новосибирский государственный технический университет  
E-mail: loiknstu@mail.ru

*Предложен алгоритм управления для предотвращения нарушений устойчивости путем отключения генераторов ГЭС с определением числа отключаемых генераторов в ходе процесса и оценки запасов статической устойчивости в режиме реального времени. Используются данные синхронизированной регистрации процессов на шинах электростанций энергосистемы Таджикистана.*

#### Ключевые слова:

*Система мониторинга переходных режимов, статическая устойчивость, динамическая устойчивость, управляющие воздействия.*

#### Key words:

*Power system stability, power system steady-state stability, power system transient stability, emergency automation.*

#### Основы управления переходными режимами ЭС

При возмущении в системе после анализа (классификации) аварийной ситуации возникает задача управления переходным процессом энергосистемы (ЭС) для перевода ее к устойчивому послеаварийному режиму. При этом необходимо учитывать технические ограничения, имеющиеся у каждого объекта и его элементов, а также ресурсы, управляющие воздействий (УВ).

Формулирование задачи управления режимом ЭС, исходя из общей теории управления, включает следующие этапы:

##### 1. Постановка задачи:

- а) определяется цель (цели) управления режимом при возмущении;
- б) намечаются возможные виды управлений, ведущие к достижению поставленных целей.

##### 2. Формализация задачи:

- а) математически формулируется цель управления, например: перевод системы из одного со-

стояния с координатами  $x_0$  в другое с координатами  $x_1$  или движение системы по заданной траектории  $x(t)$ ;

- б) описываются существенные взаимосвязи между переменными.

Цель противоаварийного управления функционирующей энергосистемой в общем случае – повышение надежности энергоснабжения потребителей. Однако в каждом из возможных режимов работы системы цель эта может сужаться и принимать частные формы. Так, например, целью управления нормальными режимами может быть снижение потерь электроэнергии, расхода топлива, обеспечение заданного коэффициента запаса статической устойчивости. Цель управления переходными режимами – сохранение динамической устойчивости перехода от аварийного режима к выbranному послеаварийному. В каждом из этих режимов могут использоваться свои УВ: в первом случае – перераспределение нагрузок между станциями, изменение коэффициентов трансформации и др., во втором – отключение генераторов

(ОГ) и нагрузок, разгрузка турбин, форсировка возбуждения, электрическое торможение и т. п.

Таким образом, управление представляет собой организацию того или иного процесса, обеспечивающую достижение определенных целей. Задачи управления можно разделить на одношаговые и многошаговые. На практике такое разделение является идеализацией, так как строгое его осуществление затруднено. Обычно мы сталкиваемся с непрерывными динамическими процессами управления.

На процессы управления оказывают влияние различные внешние факторы, совокупность которых часто называют *состоянием природы*. Типичен для задач управления случай, когда имеющаяся информация или недостаточна, или искажена посторонними факторами, тогда решения принимаются в условиях неопределенности.

Задача управления в отличие от многих других в общем случае допускает не одно, а множество различных решений, из которых необходимо выбрать наилучшее. Поэтому вводится критерий качества управления, являющийся математическим выражением, дающим количественную оценку степени выполнения наложенных на способ управления требований. В этом случае оптимальный способ управления такой, при котором критерий качества управления достигает минимального (максимального) значения и соблюдаются все ограничения. Имеются два вида ограничений:

- законы природы, в соответствии с которыми происходит движение управляемой системы (уравнения связи переменных процессов – алгебраические, дифференциальные);
- ограниченность ресурсов, используемых при управлении, или иных величин, которые в силу физических особенностей той или иной системы не могут и не должны превосходить некоторых пределов (в виде систем алгебраических уравнений или неравенств, связывающих переменные).

Задачу управления можно считать сформулированной математически, если:

- сформулирована цель управления, выраженная через критерий качества управления;
- определены ограничения первого и второго видов.

## 2. Функциональные возможности технологии WAMS для осуществления управления, предотвращающего нарушения устойчивости ЭС

Необходимое условие эффективного функционирования системы противоаварийного управления в энергосистемах – получение оперативной и достоверной информации о схемно-режимных параметрах, в том числе, о параметрах переходных процессов. В настоящее время, как в России, так и за рубежом развернуты работы по исследованию и внедрению технологии *Wide Area Measurement System*

(WAMS) – широкомасштабной системы измерений – для управления нормальными и аварийными режимами [1–11]. Российский аналог системы WAMS – система мониторинга переходных режимов (СМПР) [10]. Технология WAMS позволяет реализовать синхронизированные измерения векторов тока и напряжения на удаленных друг от друга энергообъектах.

Технология управления нормальными и аварийными режимами энергосистем, использующая синхронизированные измерения векторов тока и напряжения, которая изначально была предназначена для предотвращения развития крупных системных аварий, получила название *Wide Area Control System (WACS)* – широкомасштабная система управления [7, 9].

В [6] рассмотрен вариант создания системы управления устройствами *UPFC (Unified Power Flow Controller)* в переходном режиме по данным измерений устройств *PMU*. Задача управления *UPFC* решается в оптимизационной постановке на основе метода неопределенных множителей Лагранжа. В качестве целевой функции авторы используют кинетическую энергию центра инерции электрической системы. Таким образом, WAMS/WACS-технологии, позволяющие получить синхронизированные измерения параметров режима энергосистемы, предоставляют широкие возможности для разработки алгоритмов оценки запасов устойчивости и управления переходными режимами энергосистем.

## 3. Контролируемые параметры для противоаварийного управления по данным СМПР

Эффективность алгоритма управления во многом зависит от выбора контролируемых параметров режима объекта управления. Применительно к задаче управления переходными режимами наибольшей информативностью обладают такие параметры, как взаимный угол роторов генераторов, скольжение, ускорение, небаланс моментов (моментностей) на валу, синхронизирующая мощность, интеграл от небаланса мощности (энергия), поскольку все они связаны уравнением движения ротора генератора.

До настоящего времени построение управления по параметрам переходного процесса – взаимным углам и скольжениям – представляло собой непростую техническую задачу. Это было связано, главным образом, с неточностью измерений указанных параметров, ненадежностью используемых каналов телепередачи вследствие повышенной загрузки другой необходимой информацией, а также из-за наведенных электромагнитных помех. Определенными преимуществами обладали, так называемые, фантомные схемы, предназначенные для псевдоизмерения углов и скольжений в системах деликатной автоматики. Однако их использование

осложнено необходимостью учета скачкообразного изменения измеряемых параметров режима и их воспроизведения фантомными моделями. Благодаря СМПР параметры переходного процесса, получаемые прямым или косвенным образом, становятся доступными для управления в режиме реального времени.

#### 4. Постановка задачи управления переходными режимами для обеспечения устойчивости Нурекской ГЭС (НГЭС) путем ОГ

4.1. Упрощенное представление объекта управления

а)  $E' = \text{const}$  в переходном режиме, рис. 1;

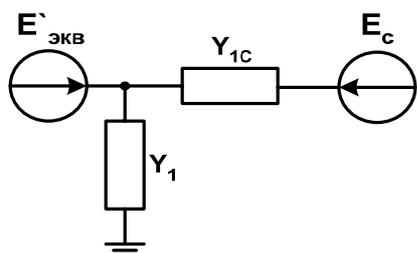


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема

б) синфазность движения группы генераторов НГЭС;

в)  $\Delta t_{кз} = 0,1$  с;  $\Delta t_{АПВ} = 0,3$  с;

г) представление внешней сети матрицей собственных и взаимных проводимостей (СВП).

4.2. Постановка и формулировка задачи управления

При постановке задачи следует учитывать:

- необходимость предотвращения возможности нарушения устойчивости во втором цикле качаний;
- невозможность достоверного прогнозирования параметров возмущающего воздействия (длительности короткого замыкания, успешности АПВ).

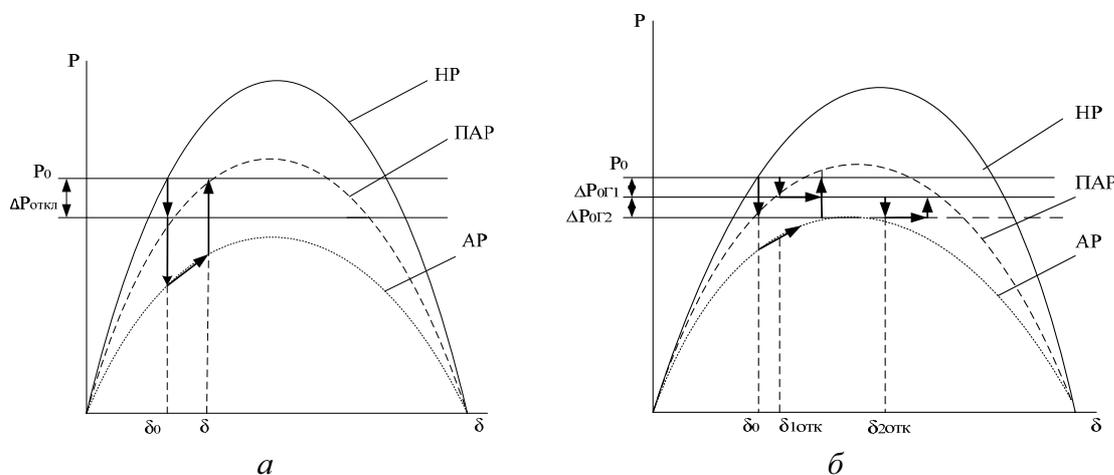


Рис. 2. Площадки ускорения и торможения роторов генераторов в первом цикле качаний при отключении части генераторов ( $\Delta P_{откл}$ )

С учетом указанных выше обстоятельств ОГ должно происходить в период воздействия возмущения (первый этап управления), а стабилизация колебаний за счет автоматического регулятора возбуждения производится после снятия возмущающего воздействия (второй этап управления).

Для формулировки целей управления на первом и втором этапах можно обратиться к рис. 2. Случай «а» соответствует моменту сброса электрической мощности; случай «б» – наличию некоторой задержки после нарушения режима ( $\lambda_{откл}$ ) и дополнительного отключения части генераторов в послеаварийном режиме при недостатке энергии торможения, установленной в процессе мониторинга запасов устойчивости.

Отключение части генераторов соответствует снижению эквивалентной мощности турбин станции в момент времени  $T_{ог}$ . За счет этого увеличивается площадка торможения, а при быстром отключении уменьшается и площадка ускорения, что позволяет сохранить синхронность параллельной работы оставшихся генераторов с системой.

На первом этапе необходимо обеспечить предотвращение нарушения устойчивости в первом цикле: определить величину УВ (количество отключаемых генераторов) и произвести их отключение исходя из наиболее вероятного сценария развития аварии.

На втором этапе (после снятия возмущения) необходимо идентифицировать послеаварийную ситуацию, осуществить дополнительных ОГ для обеспечения предотвращения нарушения устойчивости, как в первом, так и во втором цикле качаний ротора.

При осуществлении ОГ критерий оптимизации управления для второго этапа – минимум запасомой энергии взаимного движения во втором цикле качаний роторов при условии предотвращения нарушения устойчивости в первом цикле  $W_{торм} \geq W_{уск}$ . Тогда для модели ЭС «генератор – ШБМ» требования к ОГ можно сформулировать следующим образом: обеспе-

чить динамическую устойчивость и требуемую статическую устойчивость послеаварийного режима при всех расчетных возмущениях для режимов с:

- $\delta_0 = \delta_{уст}$  ( $K_3 \geq 20\%$ );
- $\delta_0 \neq \delta_{уст}$  ( $K_3 \geq 8\%$ ),

с минимизацией энергии взаимного движения второго цикла качаний ( $W_k^2 \rightarrow \min$ ) выбором числа отключаемых генераторов и времени отключения.

**5. Решение задачи управления при упрощенном представлении объекта. Классификация и идентификация возмущений**

При ОГ требуется решить задачу осуществления управления ( $U \neq 0$ ) на ранней стадии процесса. Предполагается ее решение посредством задания временных зависимостей максимальных небалансов моментов (мощностей) на валу синхронной машины или максимальных взаимных скольжений ( $P_{н0}^{max}(t), s^{max}(t)$ ). Предлагается использовать следующую классификацию аварийных возмущений:

- а) неопасные проходящие  $\delta_0 = \delta_{уст}$  ( $U=0$ );
- б) опасные проходящие  $\delta_0 \neq \delta_{уст}$  ( $U \neq 0$ );
- в) неопасные непреходящие

$$\begin{cases} \delta_0 \neq \delta_{уст} \\ P_0 = P_{уст} \end{cases} (U = 0);$$

- г) опасные непреходящие:

- без необходимости дополнительных ОГ

$$\begin{cases} \delta_0 \neq \delta_{уст} \\ P_0 = P_{уст} \end{cases} (U \neq 0);$$

- с необходимостью дополнительных ОГ

$$\begin{cases} \delta_0 \neq \delta_{уст} \\ P_0 \neq P_{уст} \end{cases} (U \neq 0).$$

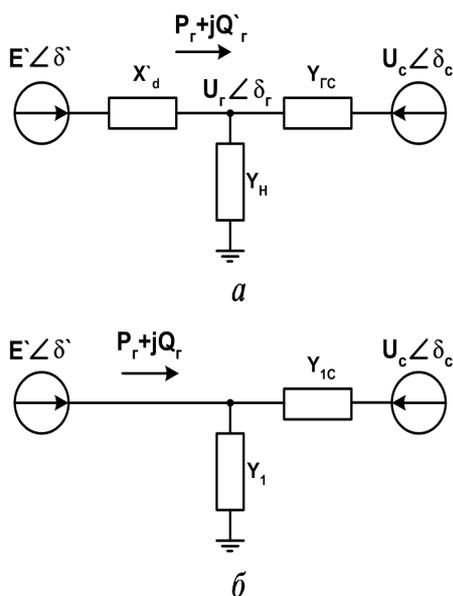


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения электропередачи

**6. Идентификация расчетной модели в режиме реального времени**

После устранения аварийного возмущения (второй этап управления) возникают задачи идентификации послеаварийной ситуации и дооптимизации интенсивности УВ (дополнительном ОГ), которая включает:

- оценку эффективности первого этапа управления (определение запаса динамической устойчивости);
- принятие решения о необходимости отключения дополнительных генераторов, если запас по динамической устойчивости меньше нуля;
- выбор числа отключаемых генераторов по условию 8 %-го запаса статической устойчивости в послеаварийном режиме.

Идентификация расчетной модели в послеаварийном режиме может быть выполнена по измерениям СМПР. Задача идентификации расчетной модели предполагает определение СВП управляемого генератора. На основе этих параметров может быть построена угловая характеристика мощности генератора, необходимая для оценки запасов статической и динамической устойчивости.

Рассмотрим задачу идентификации расчетной модели на простейшей схеме НГЭС с собственной нагрузкой – ЭС (рис. 4). Исходная информация, которая необходима для идентификации СВП: модуль и угол напряжения на шинах системы ( $U_c, \delta_c$ ), модуль и угол напряжения на шинах НГЭС 2 ( $U_r, \delta_r$ ), активная и реактивная мощность, отпускаемые с шин НГЭС ( $P_r, Q_r$ ). Поскольку идентификацию СВП необходимо выполнять для анализа динамической устойчивости, генератор в схеме замещения представлен переходными параметрами. Основное допущение, принимаемое при идентификации СВП – постоянство переходной ЭДС во время динамического перехода.

Проиллюстрируем метод идентификации расчетной модели на примере простейшей электрической связи: генератор с местной нагрузкой, работающий на мощную систему.

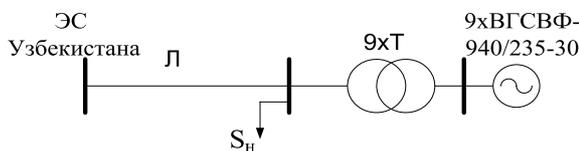


Рис. 4. Схема электропередачи НГЭС – ЭС Узбекистана

Идентификация СВП выполнена с использованием программного комплекса MUSTANG, предназначенного для моделирования установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем, и математического пакета Mathcad. В программе MUSTANG получены расчетные осциллограммы переходных процессов при увеличении сопротивления связи НГЭС 2 с системой в 2 раза и последующим возвращением к доаварийному ре-

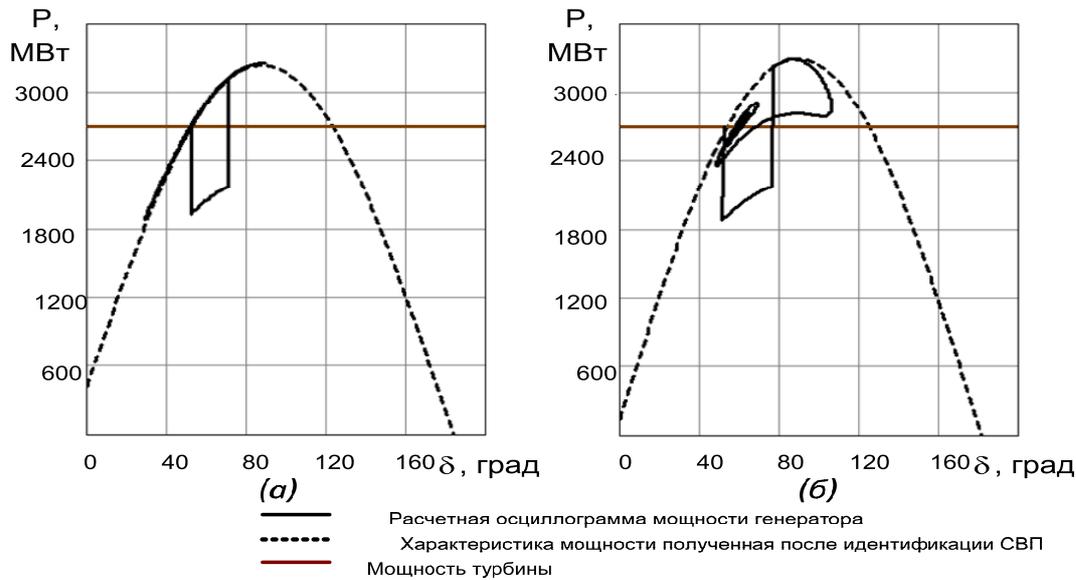


Рис. 5. Результаты идентификации СВП при  $E=const$  (а) и  $E=var$  (б)

жиму через 0,18 с. Значения  $U_c, \delta_c, U_r, \delta_r, P_r, Q_r$ , полученные непосредственно после перехода на послеаварийную характеристику в 0,18 и 0,19 с, использованы для расчета модуля и угла переходной ЭДС и определения

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta \delta'_{rc}}; \frac{\Delta Q_r}{\Delta \delta'_{rc}}$$

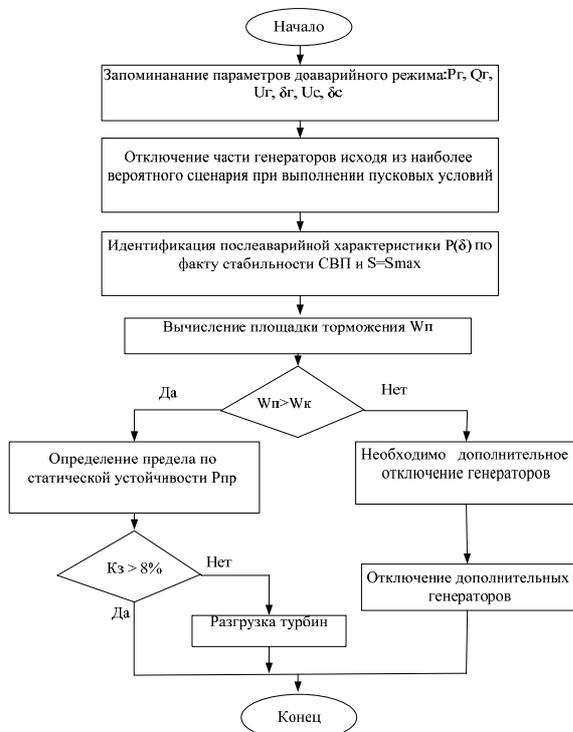


Рис. 6. Блок-схема алгоритма дооптимизации УВ (дополнительном ОГ)

Расчет переходного процесса выполнен для случаев, когда синхронная машина: 1) представле-

на постоянной переходной ЭДС за постоянным переходным сопротивлением и 2) моделируется по упрощенным уравнениям Парка-Горева. Результаты идентификации угловой характеристики мощности в сравнении с расчетными осциллограммами в плоскости параметров  $P_r$  и  $\delta'_{rc}$  представлены на рис. 5.

Таким образом, на основе параметров переходного процесса, регистрируемых СМПР, может быть выполнена идентификация СВП электропередачи. Процедура идентификации представляет собой решение системы из четырех линейных уравнений, составленных для активной и реактивной мощностей и их производных по взаимному углу электропередачи. Вычисленные СВП могут быть использованы для получения аналитического выражения угловой характеристики мощности и последующей оценки запасов статической и динамической устойчивости.

### Заключение

Для предотвращения нарушений устойчивости путем отключения генераторов ГЭС целесообразно процесс запускать с предварительными параметрами в период воздействия возмущения (первый этап управления), а дооптимизацию параметров отключения производить после снятия возмущающего воздействия (второй этап управления). В этом случае идентификация расчетной модели в послеаварийном режиме может быть выполнена по измерениям системы мониторинга переходных режимов. Задача идентификации расчетной модели предполагает определение собственных и взаимных проводимостей управляемого генератора. На основе собственных и взаимных проводимостей определяется угловая характеристика мощности генератора, необходимая для оценки запасов статической и динамической устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benmouyal G., Schweitzer E.O., Guzman A. Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control, and Analysis of Electric Power Systems // Proc. 29<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Oct. 2002. – Spokane, USA, 2002.
2. Phadke G. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control // Proc. IEEE Trans. on Power Delivery, January. – 1994. – V. 9. – № 1. – P. 442–452.
3. Phadke A.G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems // Proc. IEEE Trans. on Computer Applications in Power, April. – 1993. – V. 6. – № 2. – P. 10–15.
4. Morison K., Wang L., Kundur P. Power System Security Assessment // IEEE Power&Energy Magazine, September/October. – 2004. – V. 2. – № 5. – P. 30–39.
5. Xiao J., Xie X., Li H. et al. Power System Dynamic Security Assessment via Synchrophasor Monitoring // Proc. International Conf. on Power System Technology POWERCON. – Nov. 2004. – Singapore, 2004.
6. Taylor C.W., Erickson D.C., Martin K.E. WACS – Wide-Area Stability and Voltage Control System: R&D and Online Demonstration // IEEE. – 2005. – V. 93. – № 5.
7. Taylor C.W., Erickson D.C., Wilson R.E. Reducing Blackout Risk by a Wide-Area Control System (WACS): Adding a new Layer of Defense // Proc. 2005 Power System Computation Conf.
8. Ernst D., Pavella M. Closed-Loop Transient Stability Emergency Control // IEEE Power Engineering Society. – 2000. – Winter Meeting.
9. Zima M., Andersson G. Stability Assessment and Emergency Control Method Using Trajectory Sensitivities // Proc. IEEE Bologna Power Tech 2003 Conf. – June. – Bologna, 2003.
10. Аюев Б.И., Ерохин П.М., Куликов Ю.А. Система мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС // Технологии управления режимами энергосистем XXI века: Сб. докл. Всеросс. научно-практ. конф. / Под ред. А.Г. Фишова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 83–92.
11. SEL-421. High-Speed Line Protection, Automation, and Control System [Электронный ресурс]: Официальный сайт Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. – режим доступа: <http://www.selinc.com/sel-421.htm>. – 07.09.2009.

Поступила 07.09.2009 г.

УДК 53.01

## УСЛОВИЯ ПОГАСАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ВОЗДУХЕ

М.В. Лавринович

Томский политехнический университет  
E-mail: lavr@elti.tpu.ru

*Исследовано влияние условий погасания электрической дуги в воздухе с целью применения найденных характеристик в расчетных моделях перемежающихся дуг в сетях с изолированной нейтралью. Найдено, что амплитуда последней полуволны тока, при котором дуга еще горит, не зависит от неоднородности поля между электродами. Экспериментально определена зависимость амплитуды полуволны отключаемого тока от частоты колебаний тока. В воздухе, также как и в вакууме (давление менее  $10^{-3}$  Па), наблюдается явление среза тока, которое возникает при подходе тока к нулевому значению. В случае неуспешного погасания электрической дуги бестоковая пауза может изменяться в достаточно широких пределах и достигать значений вплоть до 1 мс.*

**Ключевые слова:**

*Электрическая дуга, изолированная нейтраль, перенапряжения, срез тока.*

**Key words:**

*Electric arc, insulated neutral, overvoltage, current break.*

**1. Введение**

Вопрос заземления нейтрали трехфазной электрической сети в литературе поднимается с 1934 г. [1]. В настоящее время эта тема проработана достаточно основательно, поэтому можно с уверенностью сказать, что известны все варианты работы сети с заземленной нейтралью и последствия однофазных замыканий на землю [2]. Для сетей с изолированной нейтралью одной из проблем остается появление перемежающихся электрических дуг, которые приводят к значительным перенапряжениям и выводу из строя оборудования. Этот процесс носит стохастический характер, что затрудняет его изучение и моделирование. Для создания правильной расчетной модели процесса зажигания и пога-

сания электрической дуги необходимы экспериментальные данные. Известно значительное количество материалов по зажиганию электрической дуги в воздухе или вдоль поверхности диэлектрических элементов, например [3, 4]. Вопросам погасания электрической дуги в воздухе уделено меньшее внимание. В частности, отсутствуют данные по параметрам погасания электрической дуги в воздухе в зависимости от степени неоднородности электрического поля, частоты колебаний тока электрической дуги и других факторов, присутствующих в реальных условиях. Для правильного определения возникающих перенапряжений в случае возникновения перемежающихся электрических дуг необходимо знать и учитывать эти зависимости.