

# Об оценке моментов генераторов, работающих в сложной энергосистеме

ЧЕРНОМЗВ И.З.

*Обоснована целесообразность совершенствования управления мощностью электростанций для повышения устойчивости энергосистем в аварийных режимах. Предлагается существующую централизованную систему противоаварийной автоматики дополнить локальными системами, использующими информацию о взаимных и собственных моментах и взаимных углах генераторов. Разработан алгоритм расчета взаимных и собственных моментов и взаимных углов генераторов, работающих в сложной энергосистеме. Приводится оценка точности их определения применительно к двухмашинной энергосистеме. Определены измеряемые переменные на электростанциях, которые должны быть переданы на центральный вычислитель для расчета моментов и углов генераторов. Результаты расчетов необходимо транслировать в локальные устройства электростанций, формирующие управляющие воздействия для разгрузки турбин с минимальной избыточностью и максимальным быстродействием. Результаты расчетов моментов и углов генераторов могут быть использованы для организации управления мощностью энергоблоков для поддержания запаса по устойчивости в доаварийных и послеаварийных режимах.*

Ключевые слова: электрическая система, частота, мощность, линия электропередач, каналы связи, противоаварийная автоматика

Надежность функционирования сложных электрических систем обеспечивается средствами автоматического регулирования частоты и мощности, предназначенными для поддержания нормальных режимов. Одновременно с указанными системами функционируют устройства противоаварийной автоматики (ПА), задачей которых является сохранение динамической и статической устойчивости энергосистем при возникновении аварийных режимов. Как известно, нарушения устойчивости могут возникать при широком спектре возмущений, основными из которых являются различные варианты отключений линий электропередачи, короткие замыкания и др. Поддержание устойчивости сложной энергосистемы возлагается на централизованную систему противоаварийной автоматики (ЦСПА), которая обрабатывает большой объем информации о режимах работы энергосистемы, ее структуре, возможных возмущениях и др., на основе которых формируются дискретные команды управления на электростанции и потребительские подстанции. Эти команды инициируют программное противоаварийное управление мощностью энергоблоков и электростанций без учета информации об исходном, текущем в процессе управления и конечном состоянии основного оборудования.

Эффективность ЦСПА достигается за счет формирования сигналов, действующих на отключение генераторов или нагрузок. Такое управление направлено на достижение устойчивости энергосистемы, но является избыточным и неоптимальным в смысле минимизации интенсивности воздействий.

Эта избыточность обусловлена рядом причин, в том числе относительно большим временем передачи управляющих воздействий. Вследствие этого экстренная разгрузка не всегда позволяет обеспечить устойчивый переход, поэтому для сохранения устойчивости необходимо формирование команд на отключение избыточной мощности.

Одним из возможных способов совершенствования организации управления мощностью электростанций при возникновении аварийных режимов в энергосистеме является дополнение ЦСПА локальными системами противоаварийной автоматики (ЛСПА), задачей которых является обеспечение динамической и статической устойчивости за счет разгрузки энергоблоков. Минимизация времени формирования команды на разгрузку энергоблоков для обеспечения устойчивости на начальном этапе переходного процесса может быть достигнута при использовании местной информации о возмущениях. Кроме этого, в состав местной информации должны быть включены такие показатели, как технологическая возможность привлечения энергоблоков к разгрузкам, их регулировочный диапазон, исходная мощность, а также блочные ограничения (в том числе информация о работоспособности БРОУ и т.д.). Использование в ЛСПА информации об энергосистемных параметрах, в частности значений взаимных и собственных моментов генераторов и их взаимных углов, а также локальной информации, позволяет рассматривать объект управления наблюдаемым. Следовательно, имеются необходимые условия для синтеза управления, реализующего устойчивый переходный про-

цесс без избыточного воздействия на изменение мощности турбин и исключая возможное переторможение генераторов и нарушение устойчивости с отрицательным скольжением.

Информация о взаимных моментах и углах генераторов может быть использована для организации процесса слежения за текущим запасом устойчивости и его автоматического поддержания на требуемом уровне в нормальных и послеаварийных режимах энергосистемы средствами управления мощностью энергоблоков. В то же время функционирование ЦСПА необходимо для обеспечения устойчивости энергосистемы в целом.

Подходы к формированию закона управления с использованием информации о взаимных движениях генераторов обсуждались в [1–4]. Эффективность противоаварийного управления мощностью электростанций с использованием местной информации и информации о предаварийных значениях моментов генераторов приведена в результатах исследований устойчивости трехмашинной энергосистемы для расчетных аварий, из которых следует значительное расширение областей устойчивости, построенных в координатах взаимных и собственных моментов [5]. В этих исследованиях моменты генераторов задавались в доаварийных режимах для каждой точки исследуемого пространства параметров многомерной системы.

В статье приведены результаты разработки алгоритма расчета взаимных и собственных моментов, а также взаимных углов эквивалентных генераторов (далее генераторов), работающих в сложной энергосистеме на примере двух- и трехмашинной энергосистем. Для решения данной задачи использована система уравнений движения генераторов, которая, с одной стороны, корректно описывает переходные процессы, а с другой стороны, является достаточно простой. В [6, 7] указывается на возможность упрощения полных уравнений движения синхронной машины, предложенных Горевым и Парком, и использования упрощенных уравнений моментов Лебедева–Жданова. Такое замещение допустимо для анализа электромеханических переходных процессов при ограниченных или малых значениях отношений активных сопротивлений к реактивным сопротивлениям сети. Кроме того, в системе уравнений должны быть учтены демпфирующие свойства синхронной машины и регулирование частоты вращения турбин [7]. Как показано в [6], учет регуляторов частоты вращения турбин позволяет пренебречь саморегулированием энергосистемы по частоте при исследованиях колебаний сложной энергосистемы.

В этом случае уравнения генераторов для двухмашинной энергосистемы (рисунок, а) представим в виде:

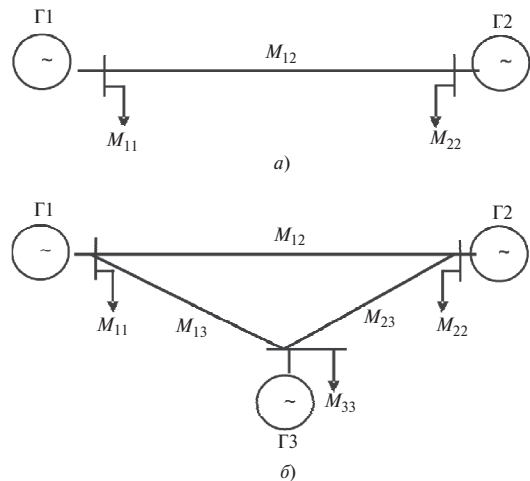


Схема энергосистемы: а – двухмашинной; б – трехмашинной

$$M_{Г1} = M_{11} + M_{12} \sin(d_{12} - a_{12}); \quad (1)$$

$$M_{Г2} = M_{22} + M_{12} \sin(d_{12} - a_{12}),$$

где  $M_{Г1}$ ,  $M_{Г2}$  – мощность генераторов Г1 и Г2;  $M_{11}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{12}$  – собственные и взаимный моменты генераторов;  $d_{12}$ ,  $a_{12}$  – взаимный угол между векторами напряжений генераторов Г1 и Г2 и дополнительный угол, определяемый активными потерями генераторов.

Так как значение  $a_{12}$  мало, этим углом можно пренебречь.

Учитывая, что в энергосистеме происходят постоянные колебания частоты и мощности, для генератора могут быть в каждый момент времени  $t$  зафиксированы равенства:

$$M_{Г1}^0 = M_{11} + M_{12} \sin d_{12}^0 + k_1 s_{12}^0;$$

$$M_{Г1}^1 = M_{11} + M_{12} \sin(d_{12}^0 + D_1) + k_1 s_{12}^1; \quad (2)$$

$$M_{Г1}^{11} = M_{11} + M_{12} \sin(d_{12}^0 + D_2) + k_1 s_{12}^{11},$$

где  $M_{Г1}^0$ ,  $M_{Г1}^1$ ,  $M_{Г1}^{11}$  – текущие значения мощности генератора Г1 при  $t = t_0$ ,  $t = t_1$ ,  $t = t_2$  соответственно;  $D_1$ ,  $D_2$  – приращения угла:

$$D_1 = \int_0^{t_1} \omega_0 s_{12} dt; \quad D_2 = \int_0^{t_2} \omega_0 s_{12} dt; \quad (2a)$$

$\omega_0$  – номинальная частота вращения генератора;  $s_{12}$ ,  $d_{12}$  – скольжение и взаимный угол;  $k_1$  – коэффициент, определяющий демпферный момент.

Вычитая первое равенство поочередно из второго и третьего, получим:

$$(M_{Г1}^1 - k_1 s_{12}^1) - (M_{Г1}^0 - k_1 s_{12}^0) =$$

$$= M_{12} [\sin(d_{12}^0 + D_1) - \sin d_{12}^0]; \quad (3)$$

$$(M_{Г1}^{11} - k_1 s_{12}^{11}) - (M_{Г1}^0 - k_1 s_{12}^0) =$$

$$= M_{12}[\sin(d_{12}^0 + D_2) - \sin d_{12}^0]. \quad (4)$$

Разделив (3) на (4), получим

$$\frac{(M_{Г1}^1 - k_1 s_{12}^1) - (M_{Г1}^0 - k_1 s_{12}^0)}{(M_{Г1}^{11} - k_1 s_{12}^{11}) - (M_{Г1}^0 - k_1 s_{12}^0)} = \frac{\sin(d_{12}^0 + D_1) - \sin d_{12}^0}{\sin(d_{12}^0 + D_2) - \sin d_{12}^0}. \quad (5)$$

Принимая левую часть равенства (5) известной, так как мощность генератора и скольжение непрерывно измеряемы, и обозначив ее  $l_1$ , перепишем (5) в виде

$$l_1 (\sin d_{12}^0 \cos D_2 + \cos d_{12}^0 \sin D_2 - \sin d_{12}^0) = \sin d_{12}^0 \cos D_1 + \cos d_{12}^0 \sin D_1 - \sin d_{12}^0,$$

из которого

$$\operatorname{tg} d_{12}^0 = \frac{l_1 \sin D_2 - \sin D_1}{(\cos D_1 - 1) + l_1 (1 - \cos D_2)}. \quad (6)$$

Равенство (6) определяет  $d_{12}^0$ , если знаменатель не равен нулю.

Взаимный момент  $M_{12}$  определится из (4), а собственный момент  $M_{11}$  — из (2) при  $t = t_0$ .

Заметим, что из уравнений для генератора Г2, аналогичных уравнениям (2)–(4), также следует равенство (6). Собственный момент генератора Г2 определяется из системы уравнений для этого генератора.

Точность вычисления моментов генераторов оценивается при решении уравнений движения двухмашинной энергосистемы:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{ds_1}{dt} &= M_{Г1} - M_{Г1} = M_{Г1} - M_{11} - M_{12} \sin d_{12} - k_1 s_{12}; \\ T_2 \frac{ds_2}{dt} &= M_{Г2} - M_{Г2} = M_{Г2} - M_{22} - M_{12} \sin d_{12} - k_1 s_{12}; \\ s_{12} &= s_1 - s_2; \quad d_{12} = \tau w_0 s_{12} dt; \\ T_3 \frac{dM_{Г1}}{dt} + M_{Г1} &= X_1 - \frac{1}{s_1} s_1; \\ T_4 \frac{dM_{Г2}}{dt} + M_{Г2} &= X_2 - \frac{1}{s_2} s_2, \end{aligned}$$

где  $M_{Г1}, M_{Г2}$  — моменты турбин;  $T_1, T_2$  — постоянные инерции роторов турбогенераторов;  $s_1, s_2, s_{12}$  — абсолютные скольжения генераторов и их относительное скольжение;  $k_1, k_2$  — коэффициенты демпфирования, учитывающие асинхронные моменты;  $T_3, T_4$  — постоянные времени изменения

моментов турбин;  $X_1, X_2$  — заданные значения моментов турбин;  $s_1, s_2$  — статизм системы регулирования турбин обоих генераторов.

Для расчета примем следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 = 10 \text{ с}; \quad T_3 = T_4 = 0,5 \text{ с}; \quad M_{12} = 1,6; \quad M_{11} = 0,2; \\ M_{22} = 1,8; \quad s_1 = s_2 = 5\%; \quad X_1 = X_2 = 1,0; \quad w_0 = 314; \\ \text{начальные условия: } M_{Г1}(0) = M_{Г2}(0) = 1,0; \\ s_1(0) = s_2(0) = 0; \quad d_{12}(0) = \arcsin 0,5 \text{ или } d_{12}(0) = 30^\circ. \end{aligned}$$

В качестве возмущения принято снижение  $M_{12}$  от исходного значения 1,6 до 0,25 на интервале времени от момента  $t = 0,1$  с до  $t = 0,3$  с, после чего значение  $M_{12}$  восстанавливалось. В таблице зафиксированы параметры энергосистемы на ограниченном интервале переходного процесса.

Подставляя в уравнения (2)–(6) текущие значения переменных  $M_{Г1}, s_1, s_2$  при  $t_0, t_1$  и  $t_2$ , а также полученные значения приращений углов  $D_1$  и  $D_2$ , найдем значения взаимного и собственных моментов генераторов:  $M_{12} = 1,670, M_{11} = 0,164, M_{22} = 1,860$ . Эти параметры близки к заданным в исходных уравнениях движения энергосистемы и подтверждают возможность определения моментов в двухмашинной энергосистеме. Для конкретного расчета выбраны следующие интервалы времени для фиксации измеряемых переменных:  $t_0 = 0,05$  с,  $t_1 = 0,3$  с,  $t_2 = 0,45$  с.

Рассмотрим трехмашинную энергосистему, представленную на рисунке, б.

В общем виде уравнение движения  $i$ -го генератора в сложной энергосистеме имеет вид

$$T_i \frac{ds_i}{dt} = M_{Гi} - M_{Гi} = M_{Гi} - \sum_{j=1}^n M_{ij} \sin d_{ij} + k_i s_{ij}.$$

Запишем для каждого генератора следующие уравнения:

$$\begin{aligned} M_{Г1} &= M_{11} + M_{12} \sin d_{12} + M_{13} \sin d_{13} + k_1 s_{12} + k_1 s_{13}; \\ M_{Г2} &= M_{22} + M_{12} \sin d_{12} + M_{23} \sin d_{23} + k_2 s_{12} + k_2 s_{23}; \\ M_{Г3} &= M_{33} + M_{13} \sin d_{13} + M_{23} \sin d_{23} + k_3 s_{13} + k_3 s_{23}. \end{aligned} \quad (7)$$

Представим уравнения генератора Г1 для  $t_i$  ( $i = 0, \dots, 4$ ) с учетом приращений, вызванных реальными колебаниями частоты и мощности в энергосистеме:

при  $t = t_0$

$$M_{Г1} = M_{11} + M_{12} \sin d_{12} + M_{13} \sin d_{13} + k_1 s_{12} + k_1 s_{13};$$

при  $t = t_1$

$$\begin{aligned} M_{Г1}^1 &= M_{11} + M_{12} \sin(d_{12} + D_{12}^1) + M_{13} \sin(d_{13} + D_{13}^1) + \\ &+ k_1 s_{12}^1 + k_1 s_{13}^1; \end{aligned} \quad (8)$$

.....

Время $t$ , с	Параметр					
	$s_1$	$s_2$	$s_{12}$	$d_{12}$	$M_{Г1}$	$M_{12}$
0,000	0,000	0,000	0,000	30,00	1,000	1,600
0,050	0,000	0,000	0,000	29,985	0,999	1,600
0,100	0,000	0,000	0,000	29,998	0,200	0,250
0,150	0,004	-0,004	0,008	33,797	0,216	0,250
0,200	0,008	-0,008	0,016	44,610	0,232	0,250
0,250	0,012	-0,012	0,024	62,197	0,246	0,250
0,300	0,015	-0,015	0,030	86,268	1,856	1,600
0,350	0,010	-0,01	0,021	108,986	1,755	1,600
0,400	0,007	-0,007	0,014	124,323	1,550	1,600
0,450	0,004	-0,004	0,008	133,950	1,370	1,600

при  $t = t_4$

$$M_{Г1}^4 = M_{11} + M_{12} \sin(d_{12} + D_{12}^4) + M_{13} \sin(d_{13} + D_{13}^4) + k_1 s_{12}^4 + k_1 s_{13}^4,$$

где  $M_{Г1}, M_{Г1}^1, \dots, M_{Г1}^4$  – мощности генератора при  $t_0 - t_4$  соответственно;  $D_{12}^1, \dots, D_{12}^4, D_{13}^1, \dots, D_{13}^4$  – значения приращений углов  $d_{12}$  и  $d_{13}$  при  $t_1 - t_4$ .

Уравнения, определяющие  $M_{Г2}$  и  $M_{Г3}$ , аналогичны (8). Вычитая из уравнений, соответствующих моментам времени  $t_1 - t_4$ , уравнение при  $t = t_0$ , получим:

$$z_1 = (M_{Г1}^1 - M_{Г1}) - k_1 (s_{12}^1 + s_{13}^1) - k_1 (s_{12} + s_{13}) = M_{12} [\sin(d_{12} + D_{12}^1) - \sin d_{12}] + M_{13} [\sin(d_{13} + D_{13}^1) - \sin d_{13}]; \quad (9)$$

$$z_4 = (M_{Г1}^4 - M_{Г1}) - k_1 (s_{12}^4 + s_{13}^4) - k_1 (s_{12} + s_{13}) = M_{12} [\sin(d_{12} + D_{12}^4) - \sin d_{12}] + M_{13} [\sin(d_{13} + D_{13}^4) - \sin d_{13}].$$

(Значения  $z_2, z_3$  определяются аналогично  $z_1$ .)

Так как левые части уравнений (9) могут быть определены для заданных моментов времени, найдем значения  $l_1 = z_1 - z_2$  и  $l_2 = z_3 - z_4$ :

$$l_1 = M_{12} [(\sin(d_{12} + D_{12}^1) - (\sin d_{12} + D_{12}^2))] + M_{13} [(\sin(d_{13} + D_{13}^1) - (\sin d_{13} + D_{13}^2))];$$

$$l_2 = M_{12} [(\sin(d_{12} + D_{12}^3) - (\sin d_{12} + D_{12}^4))] + M_{13} [(\sin(d_{13} + D_{13}^3) - (\sin d_{13} + D_{13}^4))].$$

Аналогично определим  $l_3$  и  $l_4$  для генератора Г2, а также  $l_5$  и  $l_6$  для генератора Г3:

$$l_3 = M_{12} [(\sin(d_{12} + D_{21}^1) - (\sin d_{12} + D_{21}^2))] + M_{23} [(\sin(d_{23} + D_{23}^1) - (\sin d_{23} + D_{23}^2))];$$

$$l_4 = M_{12} [(\sin(d_{12} + D_{12}^3) - (\sin d_{12} + D_{12}^4))] + M_{23} [(\sin(d_{23} + D_{23}^3) - (\sin d_{23} + D_{23}^4))];$$

$$l_5 = M_{13} [(\sin(d_{13} + D_{13}^1) - (\sin d_{13} + D_{13}^2))] + M_{23} [(\sin(d_{23} + D_{23}^1) - (\sin d_{23} + D_{23}^2))];$$

$$l_6 = M_{13} [(\sin(d_{13} + D_{13}^3) - (\sin d_{13} + D_{13}^4))] + M_{23} [(\sin(d_{23} + D_{23}^3) - (\sin d_{23} + D_{23}^4))].$$

После преобразований получим следующие равенства для  $l_1$  и  $l_2$  для генератора Г1:

$$l_1 = M_{12} [(\cos D_{12}^1 - \cos D_{12}^2) \sin d_{12} + (\sin D_{12}^1 - \sin D_{12}^2) \cos d_{12}] + M_{13} [(\cos D_{13}^1 - \cos D_{13}^2) \sin d_{13} + (\sin D_{13}^1 - \sin D_{13}^2) \cos d_{13}];$$

$$l_2 = M_{12} [(\cos D_{12}^3 - \cos D_{12}^4) \sin d_{12} + (\sin D_{12}^3 - \sin D_{12}^4) \cos d_{12}] + M_{13} [(\cos D_{13}^3 - \cos D_{13}^4) \sin d_{13} + (\sin D_{13}^3 - \sin D_{13}^4) \cos d_{13}].$$

Подобные равенства получим для генераторов Г2 и Г3. Так как все значения  $D$  вычисляются аналогично (2а) на интервале переходного процесса в заданные моменты времени, получим для трехмашинной энергосистемы систему уравнений:



$$\begin{aligned}
l_1 &= M_{12}(a_1 \sin d_{12} + a_2 \cos d_{12}) + \\
&+ M_{13}(a_3 \sin d_{13} + a_4 \cos d_{13}); \\
l_2 &= M_{12}(a_5 \sin d_{12} + a_6 \cos d_{12}) + \\
&+ M_{13}(a_7 \sin d_{13} + a_8 \cos d_{13}); \\
l_3 &= M_{12}(a_9 \sin d_{12} + a_{10} \cos d_{12}) + \\
&+ M_{23}(a_{11} \sin d_{23} + a_{12} \cos d_{23}); \\
l_4 &= M_{12}(a_{13} \sin d_{12} + a_{14} \cos d_{12}) + \\
&+ M_{23}(a_{15} \sin d_{23} + a_{16} \cos d_{23}); \\
l_5 &= M_{13}(a_{17} \sin d_{13} + a_{18} \cos d_{13}) + \\
&+ M_{23}(a_{19} \sin d_{23} + a_{20} \cos d_{23}); \\
l_6 &= M_{13}(a_{21} \sin d_{13} + a_{22} \cos d_{13}) + \\
&+ M_{23}(a_{23} \sin d_{23} + a_{24} \cos d_{23}),
\end{aligned} \tag{10}$$

где  $a_i$  — результат вычисления функций от  $D_i$ .

Решение системы уравнений (10) определяет значения взаимных моментов  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ , а также углы  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{23}$ .

Собственные моменты определяются при подстановке найденных значений взаимных моментов и углов в исходные уравнения (8). Этот подход для оценки взаимных и собственных моментов применим для энергосистемы с  $n$  генераторами.

Точность определения моментов и углов генераторов зависит от длительности интервалов времени между измерениями мгновенных значений параметров, используемых в расчетах. Эта длительность интервалов должна выбираться с учетом двух противоречивых условий: при чрезмерно малых интервалах времени растет влияние неконтролируемых шумов; большая же длительность интервалов ведет к увеличению отрезка времени, на котором расчетные значения моментов и углов постоянны, что приводит к запаздыванию изменений расчетных параметров при их использовании в алгоритмах управления. Если для формирования управлений используются только предаварийные значения моментов генераторов, интервалы между измерениями могут быть увеличены по предварительной оценке в 1,5–2 раза по сравнению с интервалами, принятыми в приведенных расчетах моментов для двухмашинной энергосистемы. При измерении параметров и расчете моментов генераторов и их углов необходимо использовать систему единого времени с синхронизацией начала  $t_{i-1}$  и окончания  $t_i$  интервалов с точным астрономическим временем (с этой целью используются системы GPS или ГЛОНАСС).

Для выполнения расчетов взаимных углов, взаимных и собственных моментов генераторов все измерения необходимо транслировать по каналам связи в центральный вычислитель (например в ЦСПА), а полученные результаты расчетов должны передаваться на электростанции для использования в локальных системах нормального и противоаварийного управления мощностью энергоблоков.

Прием, обработка и передача этой информации могут выполняться с использованием существующей системы мониторинга электромеханических переходных режимов (СМНР), построенной на базе WAMS-технологий. Эта система обеспечивает измерения параметров с большим быстродействием, при этом все они синхронизированы с точностью до 1мс. По предварительной оценке время обновления циклической информации о взаимных углах и моментах генераторов, поступающих в ЛСПА, может составить 200–300 мс. Исходя из требований максимального быстродействия, при формировании команд импульсных разгрузок турбин целесообразно использовать информацию о предаварийных значениях моментов и углов. Требования к быстродействию формирования команд длительной разгрузки турбин менее жесткие по сравнению с импульсной разгрузкой, поэтому в алгоритмах управления длительной разгрузкой турбин целесообразно использовать текущую информацию о взаимных углах и моментах генераторов.

**Выводы.** 1. Разработанный алгоритм расчета взаимных и собственных моментов генераторов и их взаимных углов применительно к сложной энергосистеме возможно использовать для совершенствования алгоритмов управления, реализованных в централизованных и локальных системах противоаварийного управления мощностью электростанций.

Использование энергосистемной информации о текущих значениях взаимных и собственных моментов генераторов, а также местной информации о режимах работы основного оборудования энергоблоков, возможных технологических ограничениях, энергосистемных возмущениях позволит формировать в локальных системах ПА управления для реализации противоаварийных разгрузок турбин с минимальной избыточностью и максимальным быстродействием с целью обеспечения устойчивости энергосистем при возникновении аварийных режимов.

Информация о взаимных моментах и углах эквивалентных генераторов может быть использована для создания устройств, осуществляющих управление мощностью для поддержания требуемого запаса устойчивости энергосистемы средствами управления мощностью энергоблоков в нормальных и послеаварийных режимах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреюк В.А., Асанбаев Ю.А., Сказываева Н.С.** Системы автоматического управления установившимися и переходными режимами энергосистемы по абсолютному углу. — Электрические станции, 1995, №12, с. 93–99.

2. **Андреюк В.А., Асанбаев Ю.А., Сказываева Н.С.** Статическая устойчивость энергосистемы, регулируемой по абсолютному углу. — Известия НИИ постоянного тока, 1997, № 56, с. 146–156.

3. **Андреюк В.А., Асанбаев Ю.А., Сказываева Н.С.** Динамическая устойчивость энергосистемы при регулировании мощности турбин генераторов по абсолютному углу. — Электрические станции, 2005, № 12, с. 11–16.

4. **Андреюк В.А., Гущина Т.А., Кияткина С.Р., Семенов Н.К.** Оценка эффективности алгоритма управления переходными режимами протяженных транзитов с использованием информации об относительных углах по данным системы мониторинга переходных режимов. — Известия НИИ постоянного тока, 2010, № 64, с. 29–42.

5. **Черномзав И.З.** Повышение устойчивости сложной энергосистемы средствами противоаварийного управления мощностью электростанций. — Надежность и безопасность энергетики, 2012, №1(16), с. 53–57.

6. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985, 380 с.

7. **Жданов П.С.** Устойчивость электрических систем. — М.: Энергия, 1979, с.

[8.05.14]

*Автор: Черномзав Игорь Зейликович окончил радиотехнический факультет Уральского политехнического института в 1960 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование эффективности системы регулирования мощности турбогенераторов при аварийных режимах в энергосистеме». Главный специалист ЗАО «Интеравтоматика».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 1, pp. 20–25.*

## On Evaluating the Mutual and Self Torques of Generators Operating in a Complex Power System

I.Z. CHERNOMZAV

*The advisability of improving the control of power plants out put for achieving more stable operation of power systems in emergency modes of their operation is substantiated. It is proposed to supplement the existing centralized automatic emergency control system with local systems that use information about mutual and self torques and mutual generator angles. An algorithm for calculating mutual and self torques and mutual angles of generators operating in a complex power system is developed. The accuracy of determining these parameters in a two-machine power system is evaluated. The measured variables at power plants that must be transmitted to the central computer for calculating the torques and angles of the generators are determined. The calculation results should be transmitted to the power plants local devices producing the turbine unloading control outputs with the minimal extent of excessive action and maximal response speed. The results obtained from calculations of generator torques and angles can be used for setting up control of power units output to maintain the necessary steady-state stability margin of power systems in pre- and post-emergency modes of their operation.*

*Key words: power system, frequency, power, power line, communication channels, emergency control schemes*

## REFERENCES

1. **Andreyuk V.A., Asanbayev Yu.A., Skazyvayeva N.S.** *Elektricheskiye stantsii (Electric Power Stations)*, 1995, No. 12, pp. 93–99.

2. **Andreyuk V.A., Asanbayev Yu.A., Skazyvayeva N.S.** *Izvestiya NII Postoyannogo toka (Proceedings of the Direct Current Institute)*, 1997, No. 56, 146–156.

3. **Andreyuk V.A., Asanbayev Yu.A., Skazyvayeva N.S.** *Elektricheskiye stantsii (Electric Power Stations)*, 2005, No. 12, pp. 11–16.

4. **Andreyuk V.A., Gushchina T.A., Kiyatkina S.P., Semenov N.R.** *Izvestiya NII postoyannogo toka (Proceedings of the Direct Current Institute)*, 2010, No. 64, pp. 29–42.

5. **Chernomzav I.Z.** *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki (Reliability and safety of energetics)*, 2012, No. 1(16), pp. 53–57.

6. **Venikov V.A.** *Perekhodnye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh (Transient electromechanical processes in electrical systems)*. Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1985, 380 p.

7. **Zhdanov P.S.** *Ustoichivost' elektricheskikh sistem (Stability of electrical systems)*, Moscow, Publ. «Energiya», 1979, p.

*Author: Chernomzav Igor' Zeilikovich (Moscow, Russia) — Cand. Techn. Sci., Senior Specialist at JSC «Interavtomatika».*

