

по ненаселенной территории, стабилизация напряжения не нужна из-за отсутствия потребителей электроэнергии в этой части линии. При этом не требуется и никаких других компенсирующих устройств на линии, таких, как СТК, СТАТКОМ и пр. Не нужно также обеспечивать искусственное изменение волновой длины, как принято в случае настроенных электропередач. Линии естественной волновой длины  $\lambda = 4,71$  рад с УШР обеспечивают передачу электроэнергии вплоть до их натуральной мощности.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Применение управляемых шунтирующих реакторов на электропередаче длиной 4500 км позволяет обеспечить приемлемый режим напряжений и токов при любой передаваемой по линии мощности – от режима холостого хода до режима передачи натуральной мощности без настройки линии на полуолновую либо волновую длину.

Применение управляемых шунтирующих реакторов позволяет сочетать свойства полуолновых линий и линий, настроенных на передаваемую мощность: на участке линии длиной 3000 км управляемые реакторы можно не устанавливать при условии их подключения на оставшемся участке линии длиной 1500 км.

Максимальная длина участка линии между двумя управляемыми реакторами может быть доведена до 3600 км при необходимости прокладки линии через ненаселенные территории.

Во всех рассмотренных вариантах размещения УШР вдоль линии длиной 4500 км перепад напряжения может быть ограничен пятью процентами, определяемыми падением напряжения от передаваемого тока на активном сопротивлении полуолнового участка линии.

Наименьший перепад напряжений вдоль линии обеспечивается при равномерном распределении УШР вдоль линии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков В.К., Лукащев Э.С., Ольшевский О.В., Путилова Н.Т. Настрогенные электропередачи. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
2. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. М.: Знак, 1998. 271 с.
3. Александров Г.Н. Обеспечение передачи электрической энергии по длинным линиям с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. 2001. № 5.
4. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи / РАО "ЕЭС" России. СПб., 2002. 138 с.
5. Александров Г.Н., Шакиров М.А. Исследование переходных режимов работы управляемого шунтирующего компенсатора трансформаторного типа с помощью магнитоэлектрических схем замещения // Электричество. 2005. № 6. С. 20–32.
6. Aleksandrov G.N. Selection of optimum conditions for transmitting electric power through superlong a.c. lines without intermediate connections // Applied Energy. 1998. Vol. 36, № 2. P. 75–84.
7. Ершевич В.В. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 349 с.

*Х.В. Шхати, С.В. Смоловик*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКРУЧИВАЮЩИХ МОМЕНТОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВАЛОПРОВОД ТУРБОАГРЕГАТА ПРИ НЕУСПЕШНОМ АПВ линии

Исследование скручивающих моментов при коротких замыканиях посвящены работы [1–3], в которых внимание уделяется возможности превышения расчетно-нормативных значений скручивающих моментов при определенных комбинациях возмущений в высоковольтной сети.

Крутильные колебания валопровода вызываются знакопеременными электромагнитными моментами, возникающими при коротком замыкании (к.з.), его отключении и автоматическом

повторном включении (АПВ) [1, 3]. При отключении трехфазных замыканий, длительность которых превышает нормативную (что может быть вызвано отказом основного выключателя и действия УРОВ), возможно появление электромагнитных и скручивающих моментов, которые превышают нормативные величины [2].

В статье приведены результаты исследования скручивающих моментов при коротких замыканиях в высоковольтной сети при неуспешных

АПВ. Доля неуспешных АПВ достигает 25–30 %; они происходят при неустранимых повреждениях линий электропередачи.

### Модель

Математическое моделирование электромеханических процессов, связанных с крутильными колебаниями валопровода турбоагрегата, схема которого приведена на рис. 1, выполнялось на основе дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безинерционными связями. Крутильные колебания валопровода описываются следующей системой дифференциальных уравнений [1–3]:

$$\begin{aligned} J_{\text{в}} \frac{d\omega_{\text{в}}}{dt} &= -M_{\text{в}} + C_{\text{гв}}(\delta_{\text{г}} - \delta_{\text{в}}) + H_{\text{гв}}(\omega_{\text{г}} - \omega_{\text{в}}); \\ J_{\text{г}} \frac{d\omega_{\text{г}}}{dt} &= -M_{\text{е}} + C_{\text{лг}}(\delta_{\text{л}} - \delta_{\text{г}}) + \\ &+ H_{\text{лг}}(\omega_{\text{л}} - \omega_{\text{г}}) - C_{\text{гв}}(\delta_{\text{г}} - \delta_{\text{в}}) - H_{\text{гв}}(\omega_{\text{г}} - \omega_{\text{в}}); \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_1 + C_{21}(\delta_2 - \delta_1) + H_{21}(\omega_2 - \omega_1) - \\ &- C_1(\delta_1 - \delta_{\text{г}}) - H_1(\omega_1 - \omega_{\text{г}}) - \alpha_1 \omega_1; \quad (1) \\ &\dots \\ J_n \frac{d\omega_n}{dt} &= M_n - C_{n-(n-1)}(\delta_n - \delta_{n-1}) - \\ &- H_{n-(n-1)}(\omega_n - \omega_{n-1}) - \alpha_n \omega_n; \\ \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i, \end{aligned}$$

где  $i = \text{в}, \text{г}, \dots, n$ ;  $\delta_i$  – угол закручивания соответствующей массы, рад;  $\omega_i$  – частота вращения, рад/с;

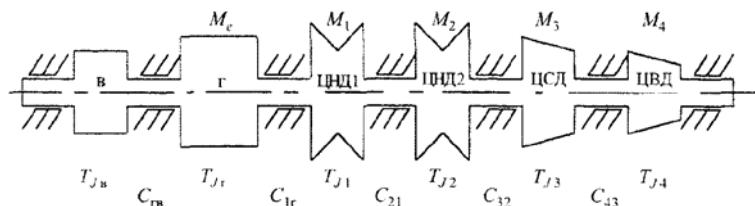


Рис. 1. Структура валопровода турбоагрегата

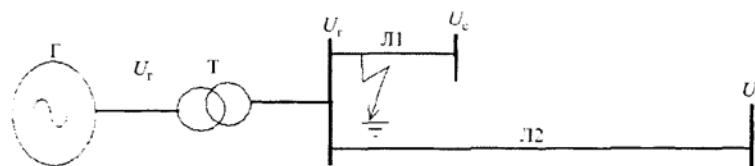


Рис. 2. Схема электропередачи для анализа процессов при АПВ

$M_i$  – вращающий или тормозящий момент, приложенный к соответствующей массе, Н·м или В·А·с;  $J_i$  – момент инерции соответствующей массы, Н·м·с<sup>2</sup>;  $C_{(i+1)-i}$  – жесткость участка валопровода, Н·м/рад.;  $H_{(i+1)-i}$  – коэффициент демпфирования крутильных колебаний, обусловленный внутренним трением в материале, Н·м·с;  $\alpha_i$  – коэффициент демпфирования, обусловленный отклонением частоты вращения лопаток  $i$ -й ступени турбины относительно парового объема, Н·м·с.

На рис. 2 представлена схема электропередачи с турбогенератором ТВВ-500 для анализа процессов при трехфазных к.з. с последующим трехфазным АПВ ( $X_{\text{л1}} = 0,025$ ;  $X_{\text{л2}} = 0,375$ ).

### Результаты исследований

Процесс при неуспешном АПВ линии электропередачи представляет собой наиболее сложную комбинацию последовательных возмущений, действующих на валопровод. Эти возмущения включают в себя: процесс короткого замыкания, его отключение, повторное включение на к. з. и вновь его отключение. Расчеты выполнены при изменении параметров линий электропередачи, длительности короткого замыкания и паузы АПВ.

В табл. 1 приведены результаты расчетов электромагнитного и скручивающих моментов при времени короткого замыкания  $\Delta t_{\text{к.з.}} = 0,12$  с и постоянной длительности паузы АПВ  $\Delta t_{\text{АПВ}} = 0,32$  с для разных значений активного и реактивного сопротивлений линий электропередачи. Максимальная величина электромагнитного момента после возникновения короткого замыкания всегда одинакова и равна  $M_{\text{е max}} = 3,24$  о. е.

Таблица 1

**Скручивающие моменты на валопроводе турбогенератора ТВВ-500  
при неуспешном АПВ линии  
( $t_{\text{к.з.}} = 0,12 \text{ с}; t_{\text{откл АПВ}} = 0,32 \text{ с}$ )**

$r_{\text{л2}}/x_{\text{л2}}$	$M_e \text{ max2}$	$M_e \text{ max3}$	$\delta_{\text{откл}}$	$M_e \text{ max4}$	$M_{\text{гв max}}$	$M_{1\Gamma \text{ max}}$	$M_{21 \text{ max}}$	$M_{32 \text{ max}}$	$M_{43 \text{ max}}$
0,0005	2,65	2,867	1,124	2,34	0,635	2,46	1,976	1,327	0,58
0,005	2,591	2,98	1,125	2,349	0,624	2,427	1,973	1,328	0,582
0,029	2,431	3,322	1,119	2,309	0,57	2,304	1,962	1,334	0,589
0,05	2,39	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59
0,5	1,793	3,987	0,9	1,592	0,421	2,138	1,993	1,330	0,582
0,7	1,791	4,121	0,858	1,505	0,425	2,159	2,038	1,322	0,584
1,0	1,789	4,329	0,841	1,449	0,434	2,171	2,069	1,293	0,626
1,5	1,787	4,76	0,904	1,547	0,462	2,179	2,098	1,287	0,662
2,0	1,789	5,350	1,049	1,861	0,508	2,174	2,108	1,477	0,735

Результаты этих расчетов подтверждают ранее установленную зависимость максимальной величины электромагнитного момента генератора от соотношения активного и реактивного сопротивлений линии электропередачи: при увеличении относительной величины активного сопротивления возрастает величина электромагнитного момента, соответствующая началу второго короткого замыкания после включения линии ( $M_e \text{ max3}$ ), однако снижается величина  $M_e \text{ max4}$  после отключения второго к. з. (что обусловлено большой величиной индуктивного сопротивления оставшейся в работе линии электропередачи). Однако последовательные возмущения приводят к появлению значительных по величине скручивающих моментов (особенно в сечении между генератором и возбудителем), которые превосходят расчетно-нормативные значения в 1,51–2,26 раза.

В табл. 2 приведены значения моментов при неуспешном АПВ в зависимости от длительности первого короткого замыкания. В этом случае наибольшие по величине моменты между генератором и турбиной и между цилиндрами низкого давления турбины соответствуют длительности короткого замыкания  $t_{\text{к.з.}} = 0,16 \text{ с}$ . Скручивающий момент между генератором и турбиной превышает расчетно-нормативный на 46 %, между цилиндрами – на 62 %.

Влияние момента возникновения какого-либо из последовательных возмущений хорошо иллюстрируется данными табл. 3, в которой приведены результаты расчета моментов при изменении длительности паузы АПВ. Следует обратить внимание на вторую, третью и четвертую строки таблицы. Можно заметить, что величины электромагнитных моментов, соответствую-

Таблица 2

**Скручивающие моменты на валопроводе при неуспешном АПВ линии  
( $t_{\text{откл АПВ}} = 0,32 \text{ с}$ )**

$t_{\text{к.з.}}, \text{с}$	$M_e \text{ max2}$	$M_e \text{ max3}$	$\delta_{\text{откл}}$	$M_e \text{ max4}$	$M_{\text{гв max}}$	$M_{1\Gamma \text{ max}}$	$M_{21 \text{ max}}$	$M_{32 \text{ max}}$	$M_{43 \text{ max}}$
0,12	2,39	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59
0,13	2,096	3,552	1,116	2,152	0,358	2,049	1,601	1,250	0,584
0,14	2,58	3,497	1,102	2,03	0,371	2,230	1,622	1,58	0,685
0,15	2,383	3,551	1,117	1,93	0,464	2,523	2,159	1,56	0,64
0,16	2,784	3,453	1,139	1,805	0,316	3,023	2,448	1,435	0,612
0,18	3,001	3,346	1,292	1,891	0,46	2,586	2,371	1,603	0,689
0,2	3,196	2,886	1,636	2,410	0,456	2,105	1,505	1,249	0,593

ших длительностям паузы АПВ 0,24, 0,26 и 0,28 с, приблизительно одинаковы. Однако небольшая разница во времени, соответствующем приложению к валу электромагнитного момента, определяет большие различия величин скручивающих моментов в различных сечениях валопровода.

Наибольший по величине скручивающий момент между генератором и турбиной (165,8 %) возникает при длительности паузы АПВ 0,24 с, а между двумя цилиндрами низкого давления

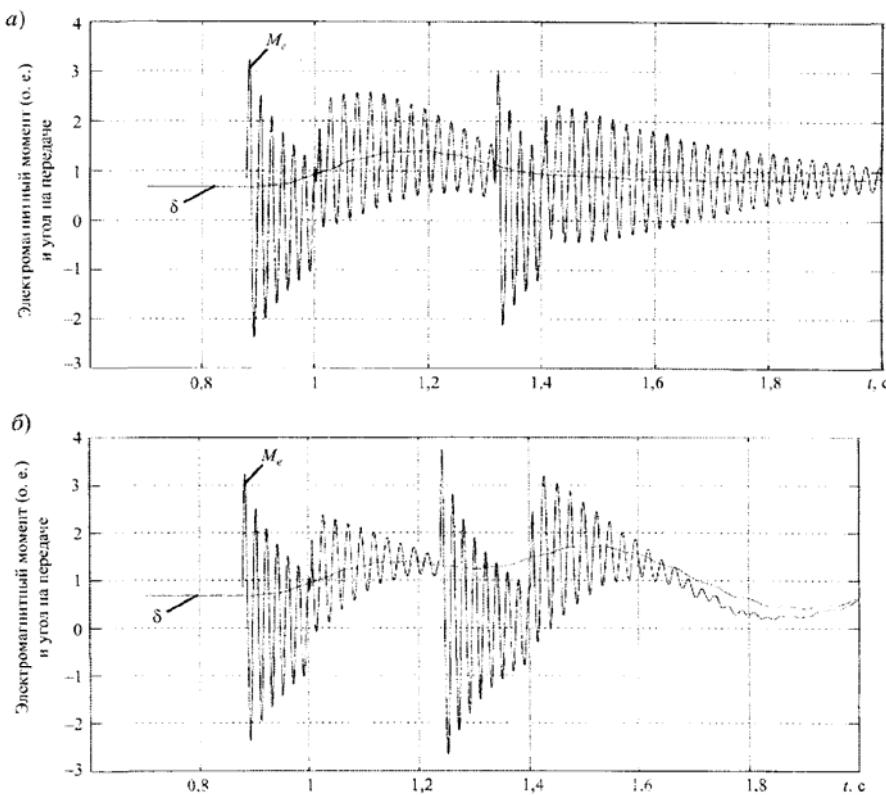
(199 %) – при длительности паузы АПВ 0,28 с. Отмеченная характеристика переходного процесса требует детального обследования условий появления опасных величин моментов путем расчетов с варьированием влияющих параметров, особенно моментов времени приложения возмущающих воздействий.

На рис. 3, а, б приведены электромагнитные моменты и угол электропередачи  $\delta$  при разных длительностях паузы АПВ. Скручивающие мо-

Таблица 3

**Скручивающие моменты на валопроводе при неуспешном АПВ линии**  
 $(t_{\text{к.з.}} = 0,12 \text{ с}, t_{\text{откл АПВ}} = 0,52 \text{ с})$

Пауза АПВ	$M_e \text{ max}_3$	$\delta_{\text{откл}}$	$M_e \text{ max}_4$	$M_{\text{гв}} \text{ max}$	$M_{1\text{г}} \text{ max}$	$M_{21} \text{ max}$	$M_{32} \text{ max}$	$M_{43} \text{ max}$
0,22	3,58	1,347	3,492	0,384	3,413	3,530	2,195	0,893
0,24	3,742	1,314	3,201	0,510	3,498	2,621	1,530	0,650
0,26	3,755	1,289	3,00	0,408	2,658	1,962	1,537	0,712
0,28	3,643	1,22	2,732	0,252	2,49	3,00	1,478	0,657
0,30	3,538	1,150	2,497	0,491	2,790	2,43	1,909	0,801
0,32	3,485	1,109	2,494	0,542	2,283	1,962	1,335	0,59

Рис. 3. Электромагнитный момент ( $M_e$ ) и угол на передаче (рад)

при неуспешном АПВ линии:

а –  $t_{\text{APB}} = 0,32 \text{ с}; \delta = t_{\text{APB}} = 0,24 \text{ с}$

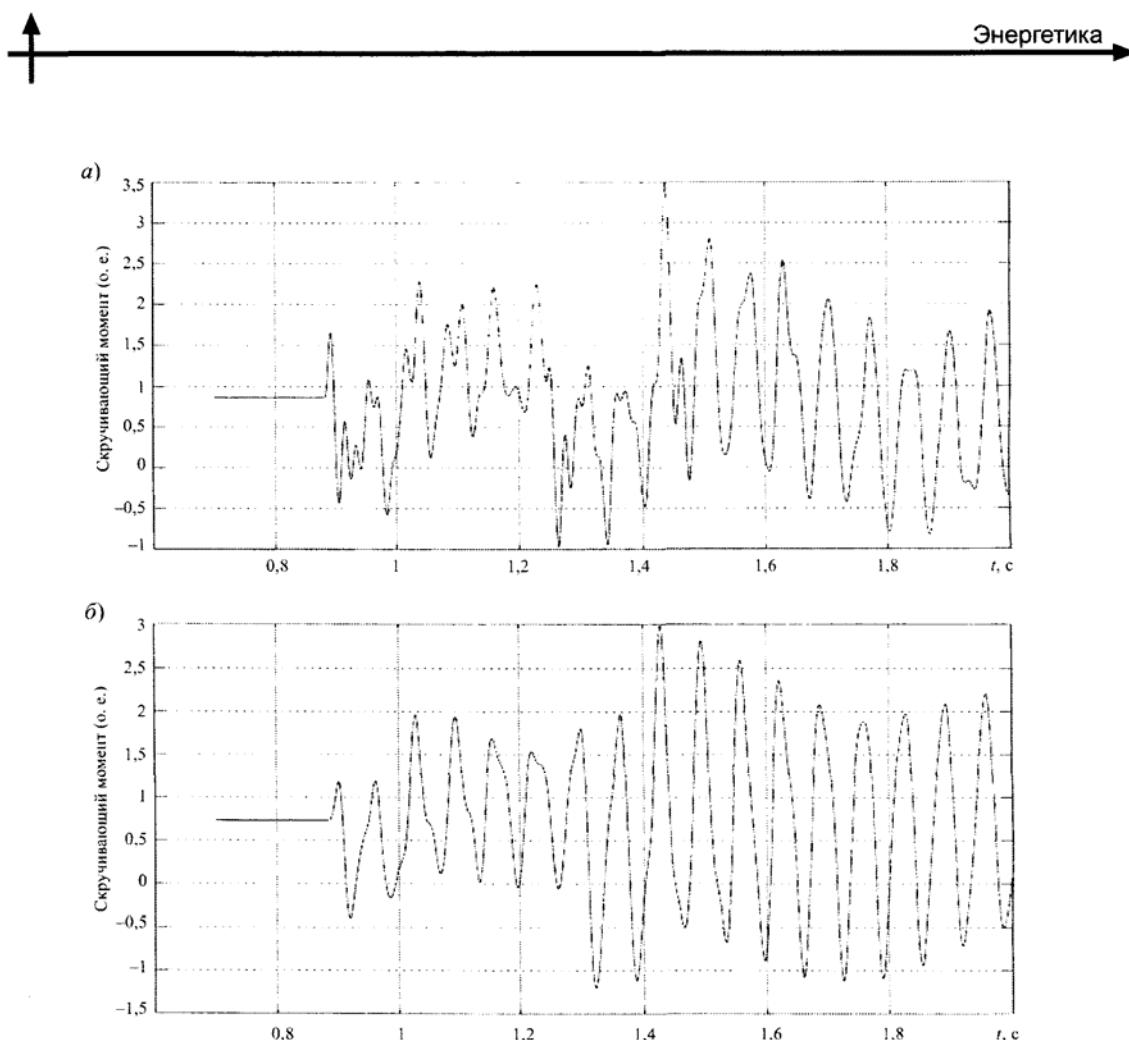


Рис. 4. Скручивающие моменты в сечении между генератором и турбиной  $M_{1r}$  ( $a - t_{\text{АПВ}} = 0,24$  с) и первым и вторым цилиндрами турбины  $M_{21}$  ( $b - t_{\text{АПВ}} = 0,28$  с) при неуспешном АПВ линии

менты в различных сечениях валопровода и при вариации  $t_{\text{АПВ}}$  иллюстрирует рис. 4, а, б.

Наибольшие по величине скручивающие моменты в различных сечениях валопровода могут не соответствовать максимальным значениям электромагнитного момента при возмущениях. При последовательно прикладываемых возмущениях (например, в цикле АПВ) появление опасных значений скручивающих моментов в значи-

тельной степени зависит от моментов времени приложения дополнительных возмущений. Отмеченное свойство валопровода мощного турбоагрегата требует детального обследования условий появления опасных величин моментов, которое может быть проведено на основе расчетов с варирированием влияющих параметров, особенно моментов времени приложения возмущающих воздействий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шхати Х.В., Смоловик С.В. Скручивающие моменты, действующие на валопровод турбоагрегата при коротких замыканиях и коммутациях в сети // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 2. С. 59–63.
2. Шхати Х.В., Смоловик С.В. Скручивающие моменты валопровода мощного турбоагрегата при отключении неудаленных коротких замыканий // Фунда-
- ментальные исследования и инновации в технических университетах: Матер. конференции 18–19 мая 2007 г. СПбГТУ.
3. Shuhati H.W., Kuhmai A.A., Smolovik S.V. Investigation of Torsional Dynamics Caused by the Short-Circuits and Commutations in the Network. // Proc. of IEEE Power Engineering Society PowerTech. 2005. St-Petersburg. Russia.

Х.В. Шхати, Б.Т. Кадхем, С.В. Смоловик

## ДЕМПФИРОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА ТУРБОАГРЕГАТА С ПОМОЩЬЮ АРВ

Проблема обеспечения надежности работы энергетического оборудования сегодня, в условиях выработки ресурса, стоит особенно остро. Вал турбоагрегата достаточно протяженный, на нем находятся турбогенератор, возбудитель, несколько цилиндров турбины. При различных возмущениях возникают крутильные колебания валопровода, приводящие к усталостным напряжениям металла, вызывающим его поломку.

Принятая структурная схема исследуемого агрегата с турбогенератором ТВВ и математическая модель приведены в статье, публикуемой в этом же номере журнала [1]. Наиболее подробное исследование демпферных свойств было выполнено для турбоагрегата с генератором ТВВ-200-2, который отличается меньшим числом цилиндров паровой турбины и весьма мощным возбудителем с достаточно инерционным ротором. Кроме того, именно на агрегатах этого типа имели место аварийные отключения возбудителей (Сургутская ГРЭС-1) [2–5].

Расчеты выполнялись для простейшей схемы электропередачи и структуры автоматического регулятора возбуждения генераторов (АРВ), без канала регулирования по взаимному скольжению (рис. 1). Индуктивное сопротивление линии электропередачи, связывающей эквивалентный блок с приемной системой, принималось  $X_L = 0,5$  о.е.

Оценивалась возможность улучшения показателей демпфирования крутильных колебаний за счет выбора оптимальных величин коэффициентов регулирования по каналам стабилизации ( $K_{0\omega}$  и  $K_{1\omega}$ ) АРВ генератора.

Кроме того рассматривалась возможность применения дополнительного сигнала регулирования возбуждения по взаимному углу либо по взаимному скольжению между элементами валопровода и изменения за счет этого показателей демпфирования тех составляющих движения, которые соответствуют частотам крутильных колебаний отдельных частей вала. При этом анализировались корни  $p_i = \alpha_i + \omega_i$  характеристического уравнения системы, описывающей процессы в исследуемом объекте. Блок-схема регулятора возбуждения с использованием дополнительного канала регулирования приведена на рис. 2.

### Демпферные свойства турбоагрегата при обычном регулировании возбуждения

Основное назначение АРВ-СД – обеспечивать высокие показатели демпфирования на частотах электромеханических колебаний, т. е. в диапазоне 2–15 рад/с. Ниже приведены результаты, характеризующие возможности АРВ по повышению показателей демпфирования в диапазоне более высоких частот (125–200 рад/с) при сохранении при-

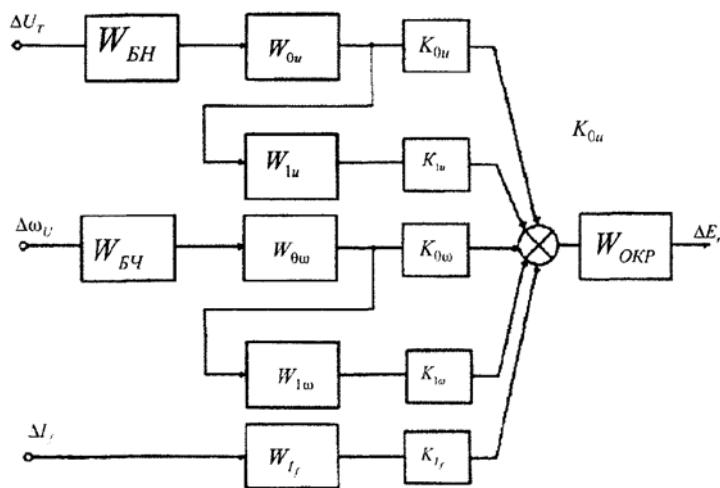


Рис. 1. Структурная схема АРВ-СД

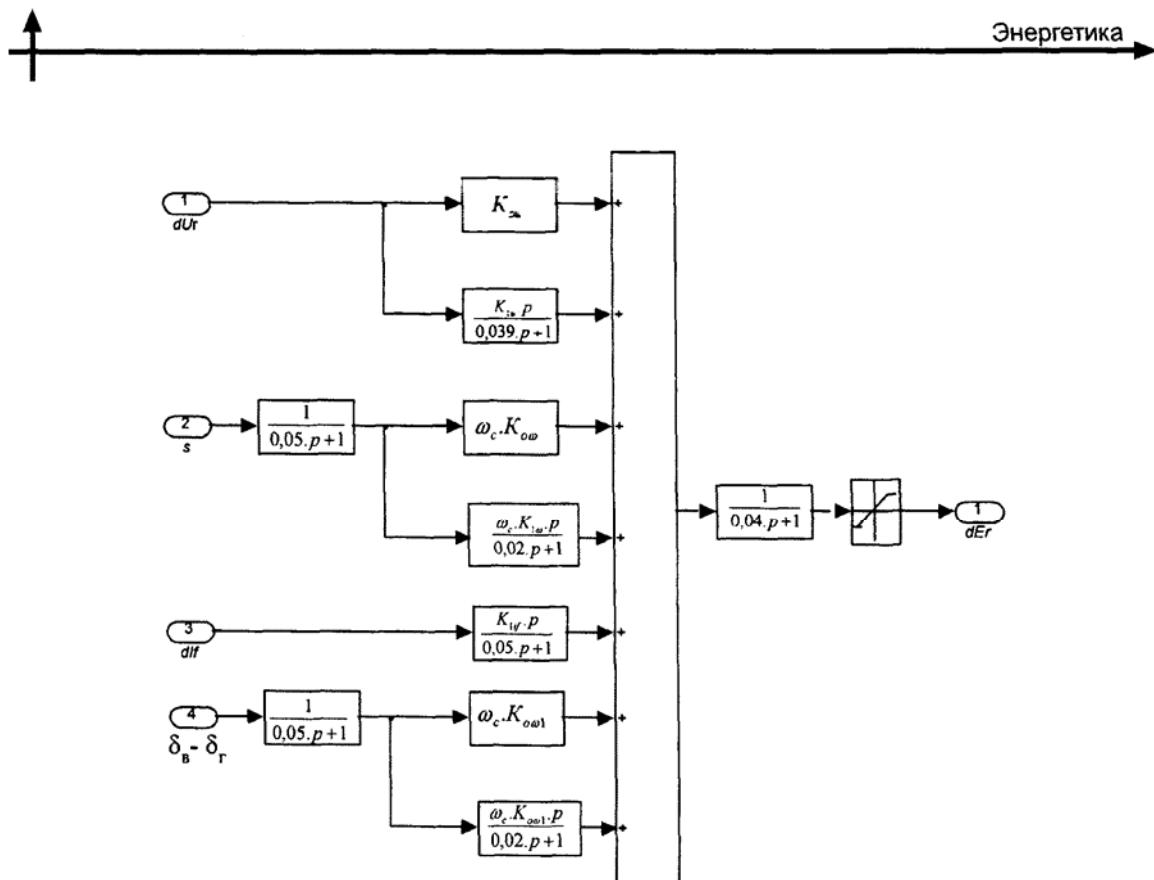
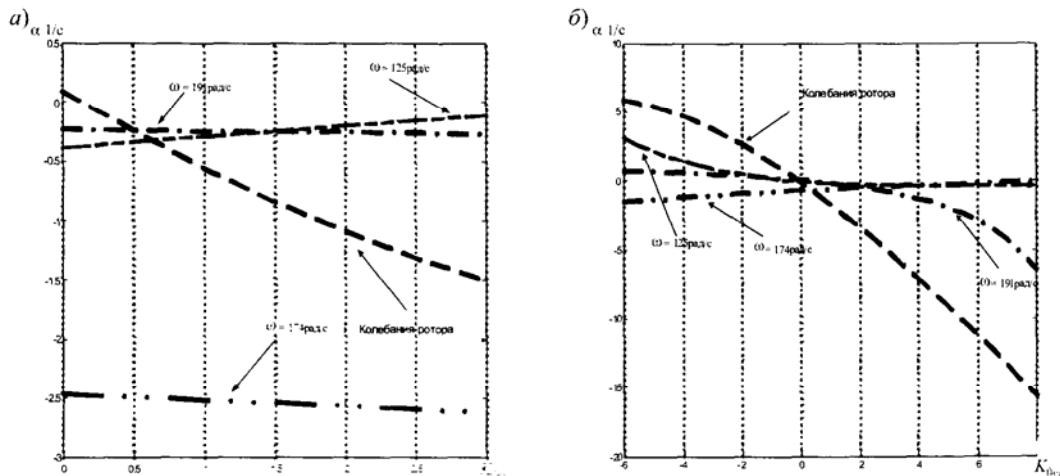


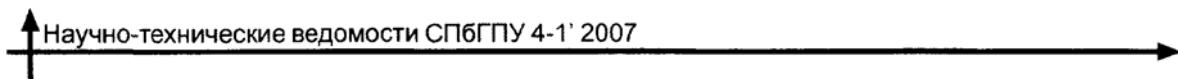
Рис. 2. Блок-схема регулятора возбуждения с использованием дополнительных каналов

емлемых характеристик на частотах электромеханических колебаний. Рассмотрим воздействие коэффициентов регулирования  $K_{0\omega}$  и  $K_{1\omega}$  с точки зрения влияния на показатели устойчивости валопровода агрегата с турбогенератором ТВВ-200-2.

При постоянстве  $K_{0\omega} = 1,5$  изменение коэффициента  $K_{1\omega}$  в диапазоне от 0 до 3 оказывает следующее воздействие на колебание валопровода.

При увеличении  $K_{1\omega}$  несколько возрастают показатели демпфирования  $\alpha$  на частотах  $\omega$ , равных 191,1 и 174,0 рад/с; для частоты 407,3 рад/с этот показатель остается постоянным ( $\alpha = -0,03$ ), но для частоты 125,2 рад/с он ухудшается при увеличении  $K_{1\omega}$ , как это показано на рис. 3. Изменение  $K_{0\omega}$  от -6 до 8 при постоянстве ( $K_{1\omega} = 1$ ) оказывает следующее воздействие на колебания валопровода.

Рис. 3. Зависимость вещественных частей корней системы на частотах  $\omega$ , равных 125 (—), 174 (-·-·-) и 191 (-·-·-) рад/с от коэффициента регулирования  $K_{1\omega}$  при неизменном  $K_{0\omega} = 1,5$  (а) и от  $K_{0\omega}$  при  $K_{1\omega} = 1,0$  (б)



При увеличении  $K_{0\omega}$  показатель демпфирования для частоты 407,3 рад/с не изменяется, он остается постоянным (-0,03); для частот 191,1 и 174,0 – увеличивается. Только для частоты 125,2 показатель  $\alpha$  снижается с увеличением  $K_{0\omega}$ , как это показано на рис. 3, б.

На данном этапе исследований ставилась задача определения оптимальных коэффициентов регулирования, обеспечивающих демпфирование в области частот крутильных колебаний. При этом использовался метод D-разбиения, позволивший

определить (рис. 4, а) оптимальные коэффициенты по каналам стабилизации АРВ-СД –  $K_{0\omega} = 0,2$  и  $K_{1\omega} = 0,001$ , обеспечивающие приемлемое демпфирование на всех частотах колебаний валопровода. Однако они существенно отличаются от коэффициентов, оптимальных с точки зрения демпфирования колебаний ротора –  $K_{0\omega} = 0,9$ ,  $K_{1\omega} = 0,45$ . В первом случае (см. левую часть табл. 1 и рис. 4, а) показатель демпфирования на частоте электромеханических колебаний – относительно низкий ( $\alpha = -0,3$  1/c).

Таблица 1

**Корни характеристического уравнения системы  
при различной настройке каналов АРВ-СД**

При $K_{0\omega} = 0,2$ и $K_{1\omega} = 0,001$		При $K_{0\omega} = 0,9$ и $K_{1\omega} = 0,45$	
$\alpha_i$	$\omega_i$	$\alpha_i$	$\omega_i$
-0,03296	407,27	-0,032959	407,27
-11,766	314,77	-11,778	314,14
-0,012341	191,12	0,28865	190,5
-0,015726	174,25	0,79535	174,22
-0,013037	125,25	-0,97158	127,66
-25,781	–	-25,785	–
-28,996	42,437	-26,748	42,936
-14,329	–	-4,1415	–
-11,199	–	-3,8446	–
-0,29946	6,7201	-3,6779	4,1369
-3,8579	–	-10,597	0,74355
-2,6336	–	-1,9777	–
-1,2887	–	-0,78647	–
-0,88941	–	-0,32192	–

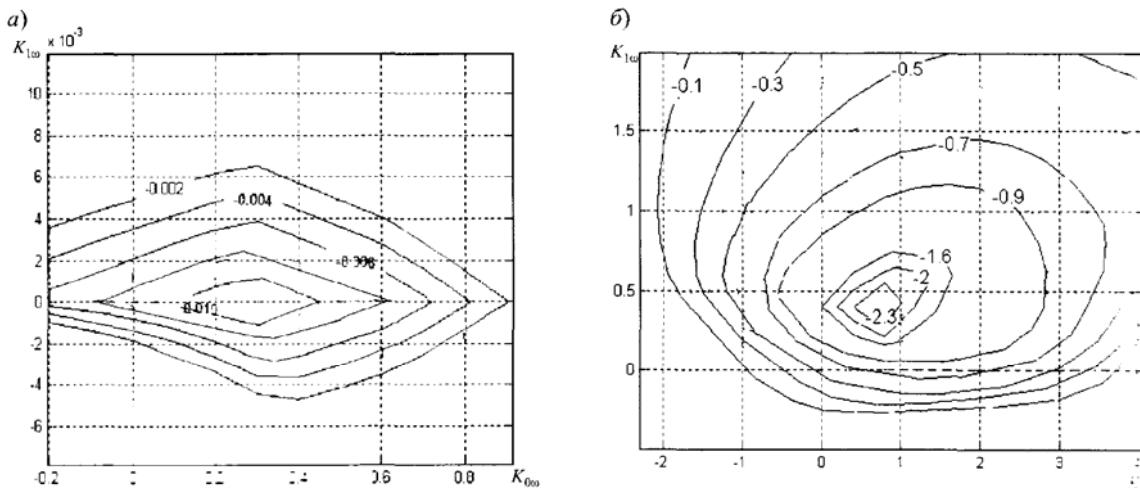
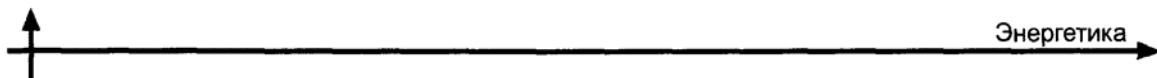


Рис. 4. Кривые D-разбиения в координатах  $K_{0\omega}$  и  $K_{1\omega}$ . Точка  $K_{0\omega} = 0,2$ ,  $K_{1\omega} = 0,001$  соответствует удовлетворительному демпфированию на частотах крутильных колебаний (а); точка  $K_{0\omega} = 0,9$ ,  $K_{1\omega} = 0,45$  соответствует показателю демпфирования  $-3,7$  1/c колебаний ротора (б)



Во втором случае (см. правую часть табл. 1 и рис. 4, б) обеспечивается хорошее демпфирование колебаний ротора ( $\alpha = -3,7$ ), но появляются две пары положительные корней на частотах 174,2 и 190,5 рад/с, что свидетельствует об опасности для валопровода. Согласование настроек, обеспечивающих удовлетворительное демпфирование на всех частотах, практически неосуществимо. Это обстоятельство привело к выводу о необходимости использования в АРВ-СД дополнительного канала регулирования.

### Использование дополнительного канала регулирования

Для повышения показателей демпфирования предложено использовать дополнительный канал регулирования по взаимному углу между возбудителем и генератором. Соответствующие результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4. Оптимальные коэффициенты, обеспечивающие высокие показатели демпфирования колебаний валопровода соответственно равны:  $K_{0\omega} = -1,0$ ,  $K_{1\omega} = 0,5$ . Однако при этом показатель демпфирования электромеханических колебаний ротора получается достаточно низким:  $\alpha = 0,67$  1/с. Эта величина может быть существенно улучшена за счет выбора пары коэффициентов  $K_{0\omega} = 1,0$ ,  $K_{1\omega} = 0,5$ , обеспечивающих для электромеханических колебаний показатель  $\alpha = 4,1$  1/с (табл. 2 и рис. 5, а). При этом обеспечиваются весьма высокие показатели демпфирования колебаний элементов валопровода.

Была проверена эффективность использования дополнительного канала регулирования по взаимному скольжению между возбудителем и генератором. Соответствующие результаты представлены в табл. 2 и на рис. 5, б. Величина показателя затухания электромеханических колебаний может быть улучшена выбором оптимальных коэффициентов –  $K_{0\omega} = 1,5$ ,  $K_{1\omega} = 0,2$ , что обеспечивает показатель  $\alpha = -2,33$  для колебаний на частоте 7,17 рад/с (табл. 2).

Таким образом, разработана методика математического моделирования электромеханических переходных процессов турбоагрегата, основанного системой регулирования возбуждения, которая учитывает влияние АРВ-СД на крутильные колебания валопровода.

С использованием упрощенной модели АРВ-СД показано, что могут быть найдены оптимальные коэффициенты по каналам стабилизации, которые обеспечивают приемлемые показатели демпфирования для низших (наиболее опасных) частот крутильных колебаний валопровода. При этом, однако, существенно ухудшаются показатели демпфирования основной частоты электромеханических колебаний ротора. Напротив, настройка пары оптимальных коэффициентов по каналам стабилизации, обеспечивающая хороший показатель затухания колебаний ротора (на уровне  $\alpha = (-2,5) - (-3)$  1/с), приводит к появлению положительных корней на частотах крутильных колебаний.

Показано, что для достижения высоких показателей демпфирования на всех частотах це-

Таблица 2

#### Корни характеристического уравнения системы при использовании в АРВ-СД дополнительного канала регулирования

При регулировании по взаимному углу $\delta_b - \delta_r$ $K_{0\omega} = 1,0$ и $K_{1\omega} = 0,5$		При регулировании по взаимному скольжению $s_b - s_r$ $K_{0\omega} = -1,5$ и $K_{1\omega} = 0,2$	
$\alpha_j$	$\omega_j$	$\alpha_j$	$\omega_j$
-0,032959	407,27	-0,03296	407,27
-11,779	314,78	-11,767	314,77
-0,016216	189,97	-0,70267	191,2
-9,396	159,39	-4,7272	178,36
-3,0622	128,43	-0,66335	126,89
-25,779	-	-25,777	-
-32,181	60,351	-26,997	44,351
-4,1282	2,764	-19,984	-
-	-	-13,535	-
-	-	-2,3327	7,1714
-	-	-1,4594	1,123

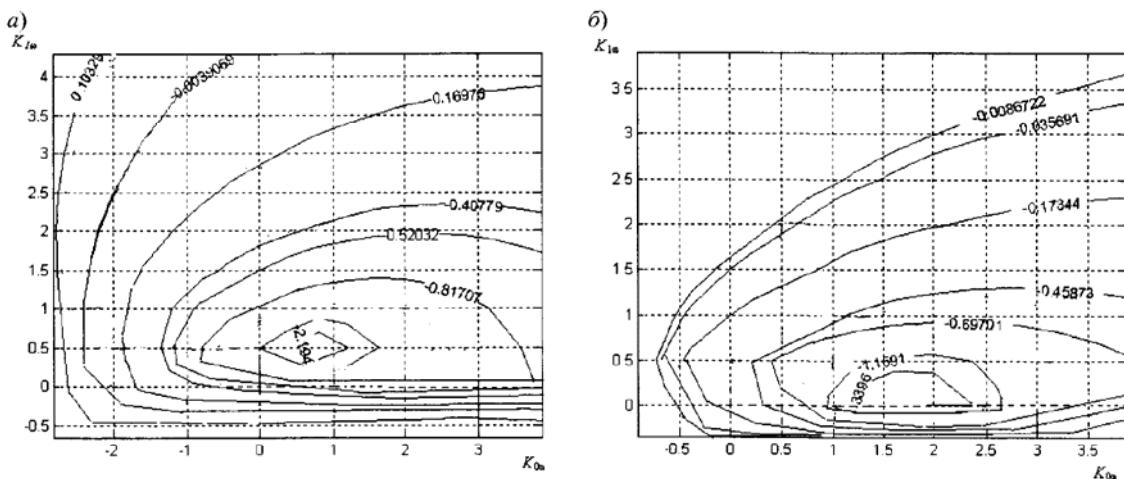


Рис. 5. Области D-разбиения при использовании дополнительного канала регулирования:  
по взаимному углу  $\delta_b - \delta_r$  (точки  $K_{0\omega} = 1,0, K_{1\omega} = 0,5$  соответствуют оптимальному демпфированию колебаний ротора); по взаимному скольжению  $s_b - s_r$  при  $K_{0\omega} = 1,5, K_{1\omega} = 0,2$

лесообразно использовать дополнительный канал регулирования – по взаимному углу между возбудителем и генератором или по соответствующему взаимному скольжению. Этот канал регулирования позволяет обеспечивать интенсивное

демпфирование на частотах колебаний валопровода и одновременно поддерживать высокие показатели демпфирования колебаний ротора, достигаемые за счет настройки каналов стабилизации АРВ-СД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шхати Х.В., Смоловик С.В. Исследование скручивающих моментов, действующих на валопровод турбоагрегата при неуспешном АПВ линии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 4. С. 197–202.
- Герценберг Г.Р., Любарский В.Г., Ольшванг М.Ф. и др. Схема унифицированного автоматического регулятора возбуждения сильного действия для гидрогенераторов, турбогенераторов и синхронных компенсаторов с ионной и тиристорной системами возбуждения // Труды ВЭИ. М.: Энергия, 1972. Вып. 81. С. 3–16.
- Грузлев И.А., Устинов С.М. Методика эквивалентирования при поиске оптимальных настроек регуляторов возбуждения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. № 1. С. 38–43.
- Грузлев И.А., Шахаева О.М. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов: Учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1978. С. 78.
- Дойников А.Н. Адаптация настроек АРВ-СД с использованием математических моделей, синтезированных по экспериментальным частотным характеристикам энергосистемы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. 20 с.

*Б.В. Ефимов, В.В. Колобов, Н.И. Гумерова*

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Один из факторов, снижающих надежность работы изоляции оборудования высоковольтных подстанций, – переходные процессы, которые сопровождаются перенапряжениями. Они наблю-

даются, например, при коммутациях ненагруженных шин подстанций под рабочим напряжением. Возникающие высокочастотные перенапряжения (ВЧП) приводят к пробоям изоляции вторичных