

шадки торможения, как показано на рис. 5) величина минимального предельного активного сопротивления одного устройства для обеспечения длительности трехфазного к. з. 0,18 с составит $R_T = 0,69$ о. е., т. е. может быть снижено более чем на 50 %.

При этом в случае корректной работы быст-
родействующих выключателей и отключения
к. з. за время 0,1 с чрезмерного переторможения
генераторов уже после отключения шунта к. з.
не происходит, а электромеханические переход-
ные процессы постепенно затухают в послеава-
рийном режиме, что выражается в движении ро-

торов синхронных машин к точке нормального
установившегося режима.

Таким образом, представленные расчеты по-
казывают, что применение устройств электри-
ческого торможения позволяет практически на
порядок повысить оцениваемый по предельно-
му времени отключения уровень динамической
устойчивости автономной энергосистемы неф-
тегазового месторождения при сколь угодно
сложных аварийных ситуациях без необходимо-
сти ухудшения маневренных характеристик аг-
регатов, что было бы неизбежно при увеличении
их механических инерционных постоянных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрус С.Т., Беляев А.Н. Управляемые источ-
ники реактивной мощности для обеспечения
устойчивости узлов нагрузки нефтедобывающих
комплексов // Научно-технические ведомости
СПбГПУ. 2008. № 1. С. 92–97.
2. Методические указания по устойчивости
энергосистем. СО-ЦДУ ЕЭС России. М., 2003.
3. Андрус С.Т., Беляев А.Н., Смоловик С.В.
Совершенствование методов анализа динамиче-
ской устойчивости при обосновании технических
требований к оборудованию газотурбинных элек-
тростанций нефтедобывающих комплексов // Научные исследования и инновационная дея-
тельность: Матер. науч.-практ. конф. 18–20 июня
2008 г. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. С. 100–105.
4. Галанов В.И., Кошечев Л.А. Автоматическое
противоаварийное управление в электрических
системах. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 140 с.
5. Манчук Р.Л., Хромов Е.Г., Власенко Л.С.
и др. Методика расчета и выбора мощных бетэ-
ловых резисторных установок // Тез. докл. к совещ.
“Применение в электроэнергетике мощных бетэ-
ловых резисторов и резисторных установок” (24–
26 июня 1980 г., Новосибирск). М.: Информэнер-
го, 1980. С. 37–39.
6. Груздев И.А., Иванов С.А., Рагозин А.А. и др.
Применение бетэловых резисторов для электри-
ческого торможения гидрогенераторов Зейской
ГЭС // Тез. докл. к совещ. “Применение в элект-
роэнергетике мощных бетэловых резисторов и ре-
зисторных установок” (24–26 июня 1980 г., Ново-
сибирск). М.: Информэнерго, 1980. С. 48–50.

*Х.В. Шхати, Б.Т. Кадхем,
А.Н. Беляев, С.В. Смоловик*

ФОРМЫ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА ТУРБОАГРЕГАТА

Обеспечение механической прочности кон-
струкции турбоагрегата в динамических режи-
мах — одна из серьезнейших проблем, стоящая
как перед электромашиностроением, так и пе-
ред эксплуатационными и проектно-исследова-
тельскими организациями соответствующего
профиля. Методика, использующая расчет
и анализ собственных значений и собственных
векторов, позволяет получить представление об
уровне демпфирования колебаний в исследуемых
сложных системах: набор собственных значений

определяет уровень устойчивости и скорость за-
тухания возмущений, а соответствующие соб-
ственные векторы — форму протекания пере-
ходных процессов. В некоторых системах
управления переходными процессами расчеты
собственных векторов настолько же (если не бо-
лее) важны, как и расчеты собственных значе-
ний. Системы уравнений, для которых ведутся
расчеты собственных векторов, должны быть ли-
нейными, замкнутыми. Последние два десяти-
летия в управлении электрическими системами

были широко распространены методы, основанные на решении проблемы собственных значений [1].

В статье рассматриваются режимы и формы движения крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов ТВВ-200, -500 и -1000.

Математическое моделирование крутильных колебаний валопровода

Валопровод мощного турбоагрегата (рис. 1) представляет собой сложную колебательную систему с частотной характеристикой, имеющей резко выраженные резонансные пики. Наиболее существенные частоты валопровода находятся в диапазоне 8–60 Гц (у ряда турбоагрегатов низшая собственная частота может доходить до 3–5 Гц [5–8]) и характеризуются низким демпфированием.

Крутильные колебания валопровода вызываются скачкообразными изменениями среднего значения электромагнитного момента, которые связаны с коммутациями, а также колебаниями знакопеременных моментов разных частот. Крутильные колебания характеризуются значительными по величине скручивающими моментами при возникновении коротких замыканий и их отключениях, а также другими аномальными явлениями. Известны случаи нарушения механической прочности участков валопровода при возмущающих воздействиях небольшой амплитуды, но с частотой, приближающейся к одной из резонансных частот валопровода.

Анализ показателей устойчивости и характеристик колебательных электромеханических процессов, связанных с крутильными колебаниями валопровода турбоагрегата, выполнялся

на основе дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безынерционными связями:

$$\frac{T_j}{\omega_c} \ddot{\delta} + D \dot{\delta} + C \delta = M, \quad (1)$$

где δ — вектор углов закручивания соответствующих масс, рад; M — вектор вращающего или тормозящего момента, приложенного к соответствующей массе, о. е.; T_j — диагональная матрица механических инерционных постоянных элементов $T_j \{ T_{j1}, T_{j2}, \dots, T_{jn} \}$; ω_c — синхронная частота вращения, рад/с.

Структуры матриц жесткостей (C) и коэффициентов демпфирования (D) участков валопровода иллюстрируются выражениями

$$C = \begin{bmatrix} c_{12} & -c_{12} & & & \\ -c_{21} & c_{12} + c_{23} & -c_{23} & & \\ & -c_{32} & c_{23} + c_{34} - c_{34} & & \\ & \dots & \dots & \dots & \\ & & & c_{(n-1)(n-1)} & c_{(n-1)n} \\ & & & c_{n(n-1)} & c_{nn} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$C_{(1,1)} = c_{12};$$

$$C_{(i,i)} = c_{(i-1)i} + c_{i(i+1)};$$

$$C_{(i,i+1)} = C_{(i+1,i)} = c_{(i+1)i} = -c_{i(i+1)}; \quad (3)$$

$$C_{(n-n)} = C_{(n-1)n},$$

где C_{ij} — жесткость участка валопровода, о. е./рад; $i = 2, 3, \dots, n-1$;

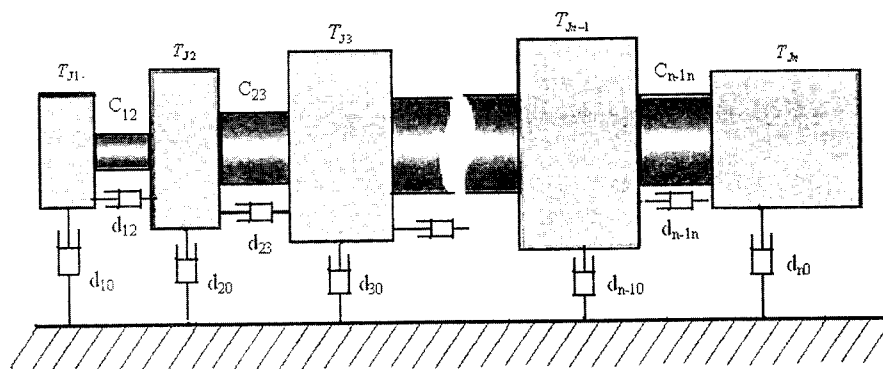


Рис. 1. Структура валопровода турбоагрегата



$$D = \begin{bmatrix} d_{12} & -d_{12} & & & \\ -d_{21} & d_{12} + d_{23} & -d_{23} & & \\ & -d_{32} & d_{23} + d_{34} & -d_{34} & \\ & & \dots & \dots & \\ & & & d_{(n-1)(n-1)} & d_{(n-1)n} \\ & & & d_{n(n-1)} & d_{nn} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D_{(1,1)} &= d_{12}; \\ &\dots \\ D_{(i,i)} &= d_{(i-1)i} + d_{i(i+1)}; \\ D_{(i,i+1)} &= D_{(i+1,i)} = d_{(i+1)i} = -d_{i(i+1)}; \\ &\dots \\ D_{(n-n)} &= d_{(n-1)n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где D — матрица коэффициентов демпфирования взаимных крутильных колебаний элементов.

Анализ собственных значений и собственных векторов

При анализе собственных значений используются стандартные линейные системы уравнения состояния. Такой анализ является удобным средством оценки показателей устойчивости системы (при изучении резонансов на подсинхронных частотах, синтеза структур регулирования и т. д.), особенно для сложной системы, включающей синхронный генератор и учитывающей эффекты взаимодействия возмущающих и демпфирующих моментов на фоне многочастотных крутильных колебаний.

Решение проблемы собственных значений требует вычисления собственных векторов, которые несут важную информацию о свойствах системы. Есть два типа собственных векторов — правые и левые. Они используются следующим образом:

правый собственный вектор иллюстрирует форму колебаний, т. е. распределение амплитуд и фаз колебаний элементов системы на соответствующей собственной частоте;

левый собственный вектор показывает относительное влияние изменения начальных условий параметров состояния на формы колебаний.

Правые собственные векторы полезны для анализа характеристик колебаний системы, например процессов при подсинхронном резонансе. Используя эти векторы, можно оценить относительные амплитуды параметров состояния

при заданной форме колебаний (собственной частоте). Таким образом, можно определять, какие переменные состояния имеют маленький либо нулевой эффект в рассматриваемой форме колебаний или, наоборот, вносят большой вклад в процесс. Этот анализ дает точное представление о составе переменных, которыми необходимо управлять, чтобы подавить определенный вид колебаний в данной системе, и о том, какие параметры системы целесообразно изменять, чтобы уменьшить их амплитуды.

Анализ форм колебаний (модальный анализ)

В уравнении (1), моделирующем крутильные колебания валопровода, можно пренебречь фактором демпфирования, что приведет к уравнению

$$\frac{T_j}{\omega_c} \ddot{\delta} + C\delta = M, \quad (6)$$

которое удобно представить в следующей форме:

$$\ddot{\delta} + \frac{\omega_c}{T_j} C\delta = \frac{\omega_c}{T_j} M. \quad (7)$$

Матрица $\frac{\omega_c}{T_j} C$ — несимметричная трехдиагональная.

Ставится задача исследования свободных гармонических колебаний в системе из n дифференциальных уравнений второго порядка $\ddot{\delta} = -\lambda\delta$. Характер колебаний без учета правой части (7) описывается однородной системой уравнений

$$\left[\frac{\omega_c}{T_j} C - \lambda I \right] \delta = 0. \quad (8)$$

Характеристическое уравнение крутильных колебаний — это определитель матрицы

$$\left[\frac{\omega_c}{T_j} C - \lambda I \right], \text{ приравненный к нулю. Корни } \lambda \text{ ха-}$$

рактеристического уравнения называются собственными значениями и равны квадратам собственных частот ω_m крутильных колебаний

$$\lambda_i = \omega_m^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

Валопровод, вращающийся как единое целое, является полупределенной системой, которая характеризуется одной или большим количеством собственных частот, равных нулю. Форма колебаний с нулевой собственной частотой называется

нулевой формой колебаний. Если валопровод состоит из n дисков, соединенных между собой $(n - 1)$ упругими безынерционными связями, то получаем число форм колебаний $(n - 1)$ плюс нулевая форма.

Подставляя λ_i в систему уравнений (8), получаем i -й правый собственный вектор, или вектор формы, δ_{mi} , удовлетворяющий соотношению

$$\left[\frac{\omega_c}{T_j} C - \lambda_i I \right] \delta_{mi} = 0, \quad (10)$$

или

$$\frac{\lambda_i}{\omega_c} T_j \delta_{mi} = C \delta_{mi}. \quad (11)$$

При умножении (11) на транспонированный вектор формы δ_{mj} получаем

$$\frac{\lambda_i}{\omega_c} \delta_{mj}^T T_j \delta_{mi} = \delta_{mj}^T C \delta_{mi}. \quad (12)$$

Используя подобную процедуру с переменной i -й и j -й форм, получаем

$$\frac{\lambda_i}{\omega_c} \delta_{mi}^T T_j \delta_{mj} = \delta_{mi}^T C \delta_{mj}. \quad (13)$$

Поскольку матрицы T_j и C симметричны, могут быть записаны соотношения

$$\begin{aligned} \delta_{mi}^T T_j \delta_{mj} &= \delta_{mj}^T T_j \delta_{mi}; \\ \delta_{mi}^T C \delta_{mj} &= \delta_{mj}^T C \delta_{mi}. \end{aligned} \quad (14)$$

Вычитая выражение (12) из (13) и используя отношения (14), получаем

$$\frac{1}{\omega_c} (\lambda_i - \lambda_j) \delta_{mj}^T T_j \delta_{mi} = 0. \quad (15)$$

Для ортонормированного собственного вектора ($\lambda_i \neq \lambda_j$)

$$\delta_{mj}^T T_j \delta_{mi} = 0, \quad (16)$$

соответственно можно получить из (12) уравнение

$$\delta_{mj}^T C \delta_{mi} = 0. \quad (17)$$

Однако для $i = j$

$$\begin{aligned} \delta_{mj}^T T_j \delta_{mi} &= T_{jmi}; \\ \delta_{mj}^T C \delta_{mi} &= C_{mi}, \end{aligned} \quad (18)$$

где T_{jmi} и C_{mi} — обобщенные, или модальные, механическая инерционная постоянная и жесткость.

Ортонормированный собственный вектор формирует набор так называемых модальных ко-

ординат, с использованием которых система уравнений (1) может быть представлена в виде независимых уравнений, где каждая компонента может быть разрешена независимо друг от друга.

Допустим, Q — матрица, в которой столбцы являются правыми собственными векторами для матрицы $T_j^{-1}C$. Матрица Q не единственная, она может быть умножена на произвольную постоянную:

$$\bar{Q} = QR. \quad (19)$$

Масштабирующая матрица R является диагональной матрицей того же самого порядка, что Q или $\bar{Q}$, и часто называется модальной матрицей, потому что ее столбцы представляют собой формы колебаний.

Результаты расчетов для турбоагрегата ТБВ-200

Данный агрегат состоит из пяти сосредоточенных масс (роторов): возбудителя, генератора и трех цилиндров турбины; основная частота системы — 314,159 рад/с. В модели валопровода турбоагрегата с генератором ТБВ-200 выделены: массы отдельных элементов, характеризующиеся значениями постоянных инерции T_j в секундах (ЦВД — 0,158; ЦСД — 0,672; ЦНД — 2,885; генератор — 2,3; возбудитель — 0,126);

участки валопровода с соответствующими им жесткостями C , выраженными в рад⁻¹ (ЦВД — ЦСД — 64,478; ЦСД — ЦНД — 67,52; ЦНД — генератор — 85,8; генератор — возбудитель — 11,44).

Вращающие механические моменты секций турбины высокого, среднего и низкого давления соотносятся следующим образом: 45, 35 и 20 %. Тормозящий момент возбудителя принят равным нулю.

Собственные частоты турбоагрегата ТБВ-200 следующие:

Форма	0	1	2	3	4
Собственная частота, рад/с	0	125,12	174,21	191,16	407,2

Когда механическая система колеблется на одной из собственных частот, относительные амплитуды и фазы отдельных элементов ротора генератора турбины называются формами крутильных колебаний. Расчет форм колебаний, представленных на рис. 2, выполнялся для свободно движущейся механической системы при отсутствии демпфирования. Показанная на этом



рисунке графически форма колебаний определяется собственным вектором, характеризующим угловые перемещения элементов ротора.

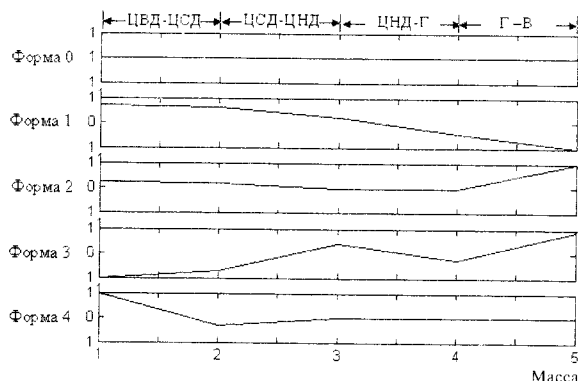


Рис. 2. Формы крутильных колебаний турбогенератора ТБВ-200

Нулевая форма принята равной единице, что видно из выражения (20) по столбцам матрицы $\bar{Q}$.

Формы крутильных колебаний валопровода пронумерованы последовательно согласно возрастанию частоты и числу изменений фазы. В частности, у формы 1 самая низкая частота и только одно изменение фазы. В общем случае форме с номером n присущи n -я частота и n изменений фазы на 180° .

Модальная матрица пятимассовой модели турбоагрегата ТБВ-200 имеет вид

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0,6893 & 0,2042 & -1 & 1 \\ 1 & 0,6051 & 0,1559 & -0,715 & -0,2938 \\ 1 & 0,2247 & -0,0402 & 0,3849 & 0,0146 \\ 1 & -0,4512 & -0,0640 & -0,2548 & -0,0011 \\ 1 & -1 & 1 & 0,9067 & 0,0002 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Турбоагрегаты ТБВ-500 и ТБВ-1000

Валопроводы этих машин представляют собой шестимассовые инерционные системы, состоящие из возбудителя, генератора и четырех цилиндров турбины; основная частота систем — 314,159 рад/с. Параметры модели валопроводов турбоагрегатов ТБВ-500 и ТБВ-1000 включают следующие массы (элементы системы), представленные в табл. 1 и 2.

Вращающий механический момент валопровода турбогенератора ТБВ-500 распределен между секциями ЦВД, ЦСД, ЦНД1 и ЦНД2 турбины следующим образом: 40, 30, 15 и 15 %. Механический момент возбудителя принят равным нулю.

Собственные частоты турбоагрегатов ТБВ-500 и ТБВ-1000 приведены в табл. 3.

Таблица 1

Постоянные инерции элементов турбоагрегатов

Тип турбоагрегата	Постоянные инерции элементов $T_j, \text{с}$					
	ЦВД	ЦСД	ЦНД	ЦНД	Генератор	Возбудитель
ТБВ-500	0,14	0,48	1,47	1,47	1,552	0,047
ТБВ-1000	1,075	3,55	3,55	3,61	1,357	0,125

Таблица 2

Жесткость участков валопровода

Тип турбоагрегата	Жесткости участков $C, \text{рад}^{-1}$				
	ЦВД-ЦСД	ЦСД-ЦНД1	ЦНД1-ЦНД2	ЦНД2-генератор	Генератор-возбудитель
ТБВ-500	27,45	44,0	55,0	61,5	7,40
ТБВ-1000	32,8	113,4	113,4	62,6	19,8

Таблица 3

Собственные частоты турбоагрегатов ТБВ-500 и ТБВ-1000

Тип турбоагрегата	Форма					
	0	1	2	3	4	5
	Собственная частота, рад/с					
ТБВ-500	0	94,55	163,88	200,57	227,79	299,86
ТБВ-1000	0	75,58	110,50	141,61	180,31	237,16

Формы крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов ТВВ-500 и ТВВ-1000 показаны на рис. 3 и 4.

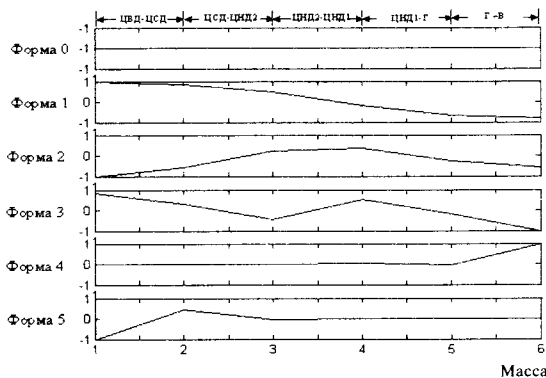


Рис. 3. Формы крутильных колебаний турбоагрегата ТВВ-500

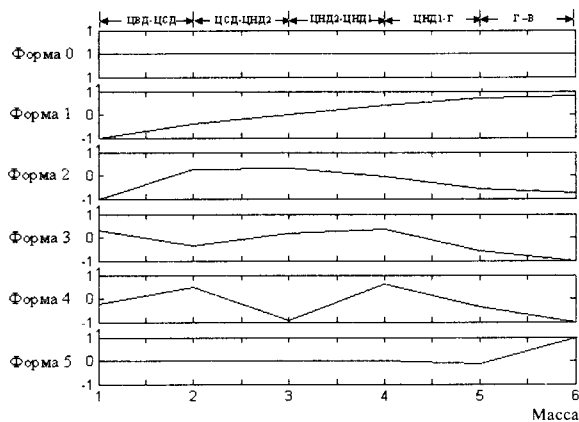


Рис. 4. Формы крутильных колебаний турбоагрегата ТВВ-1000

В соотношении (21) представлена модальная матрица Q турбоагрегата ТВВ-500, столбцы которой представляют собой формы крутильных колебаний:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 0,8479 & 0,0184 & -1 \\ -1 & 0,8549 & -0,564 & 0,2942 & 0,0029 & 0,4597 \\ -1 & 0,4990 & 0,234 & -0,4522 & -0,012 & -0,0649 \\ -1 & -0,1652 & 0,3377 & 0,5145 & 0,0291 & 0,0122 \\ -1 & -1,6468 & -0,2597 & -0,1867 & -0,049 & -0,002 \\ -1 & -0,78958 & -0,5682 & -1 & 1 & 0,0025 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Соотношение (22) — это модальная матрица Q турбоагрегата ТВВ-1000, а ее столбцы — формы крутильных колебаний:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0,3263 & -0,2102 & -0,0003 \\ 1 & -0,4041 & 0,2738 & -0,3563 & 0,5027 & 0,0013 \\ 1 & -0,0017 & 0,3091 & 0,1583 & -0,9377 & -0,0055 \\ 1 & 0,4016 & -0,0316 & 0,3566 & 0,6377 & 0,0187 \\ 1 & 0,7111 & -0,578 & -0,5670 & -0,3466 & -0,1306 \\ 1 & 0,8033 & -0,7659 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Анализ результатов расчета собственных векторов (форм колебаний) дает представление о характере развития колебательных процессов и потенциально опасных участках валопровода. Так, для турбоагрегата с генератором ТВВ-200 наиболее опасен участок вала между генератором и возбудителем (см. рис. 2) — на нем колебания с частотой 191,16 рад/с имеют наибольшую амплитуду. Неблагоприятным фактором служит совпадение фаз, а также большие амплитуды колебаний второй и третьей форм колебаний (174,21 и 125,12 рад/с). Наиболее подробно с помощью анализатора спектра проанализирован валопровод турбоагрегата с генератором ТВВ-200. Частотные характеристики (рис. 5–8) иллюстрируют крутильные колебания между элементами валопровода. Они показывают следующее:

скручивающие моменты между генератором и возбудителем имеют колебания на частотах 125, 174, 191 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 191 рад/с. Рис. 5, а иллюстрирует скручивающие моменты между генератором и возбудителем, рис. 5, б — частотные характеристики; 5, в — сигнал, поступающий в анализатор спектра; 5, г, д — результаты анализа спектра колебаний;

скручивающие моменты между ЦНД и генератором характеризуются частотами колебаний 125, 191 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 125 рад/с (рис. 6);

скручивающие моменты между ЦСД и ЦНД имеют колебания на частотах 125, 174 и 191 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 191 рад/с (рис. 7);

у скручивающих моментов между ЦВД и ЦСД колебания появляются на частотах 125, 174, 191 и 407 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 407 рад/с (рис. 8).

Частотные характеристики рис. 9–13 иллюстрируют крутильные колебания между элементами валопровода турбоагрегата с генератором ТВВ-500.

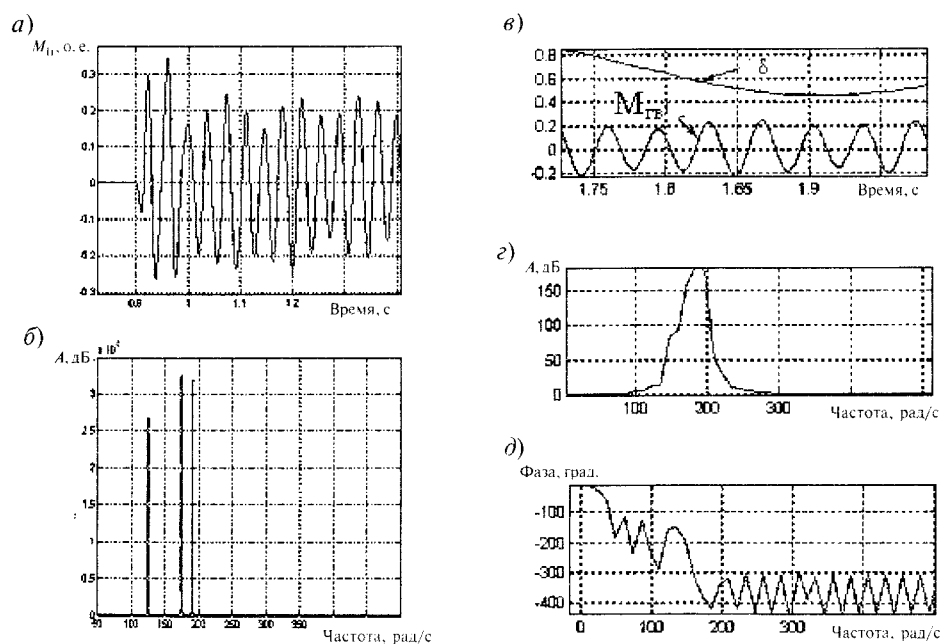


Рис. 5. Характеристики скручивающих моментов между генератором и возбудителем ($M_{ГВ}$): изменение момента во времени (а) и его амплитудная частотная характеристика (б); сигналы (в), поступающие в анализатор спектра, и результаты работы анализатора — амплитудный (г) и фазовый (д) спектры колебаний момента $M_{ГВ}$

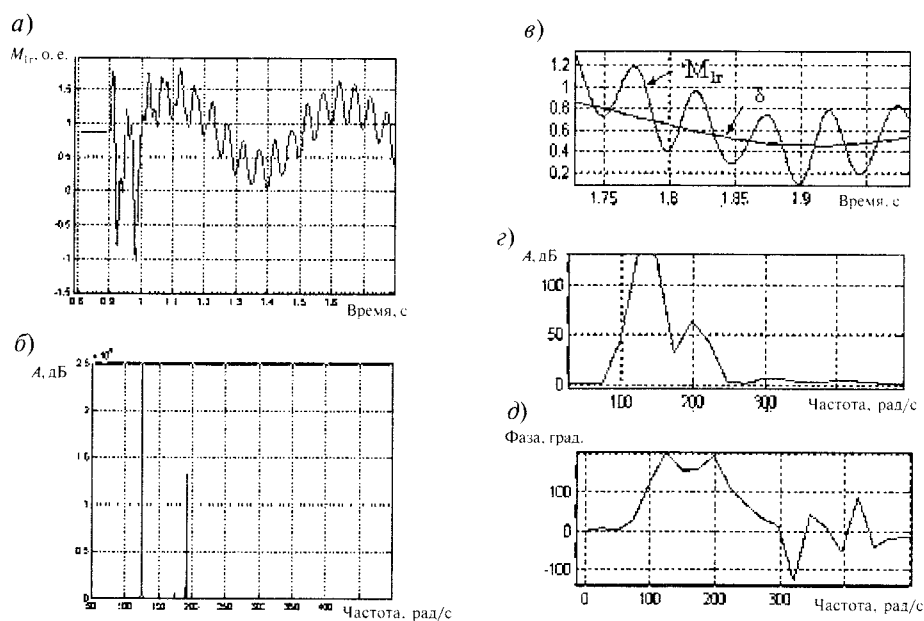


Рис. 6. Характеристики скручивающих моментов между ЦНД и генератором ($M_{ГГ}$); поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

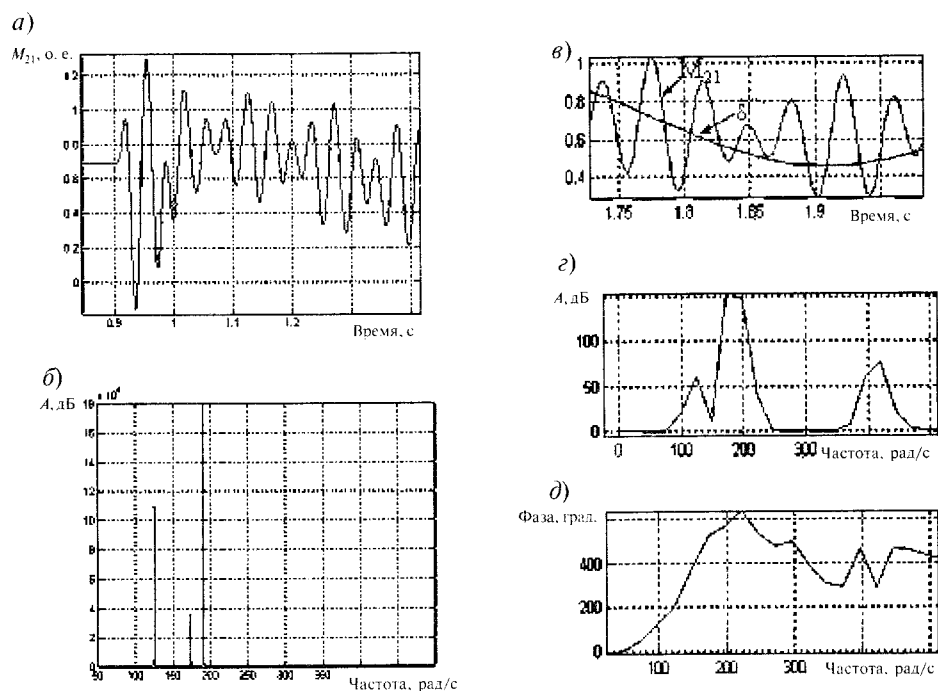


Рис. 7. Характеристики скручивающих моментов между ЦСД и ЦНД (M_{21}); поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

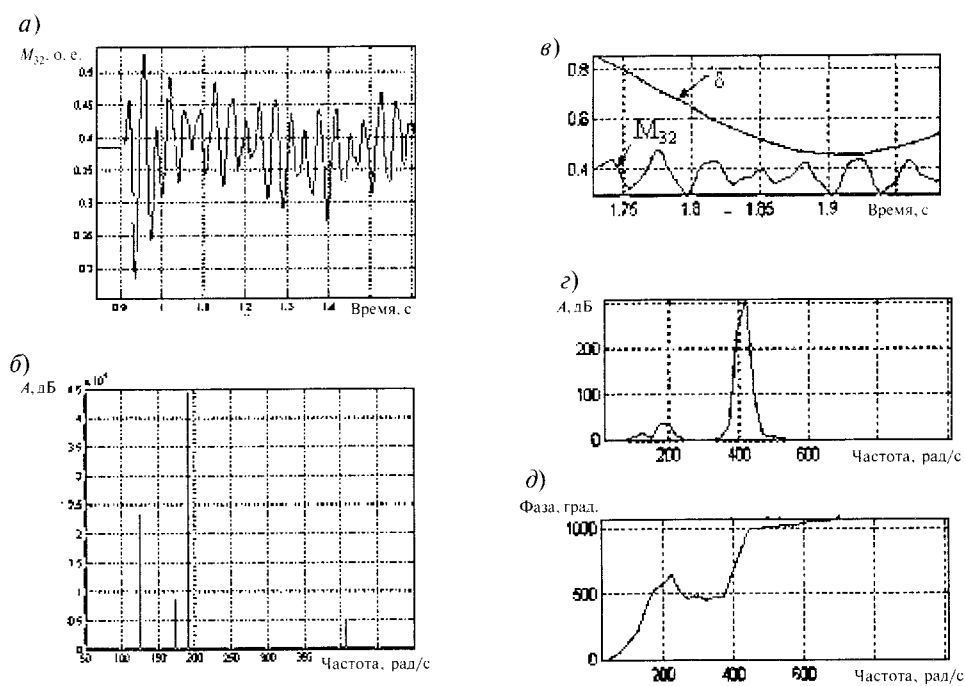


Рис. 8. Характеристики скручивающих моментов между ЦВД и ЦСД (M_{32}); поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

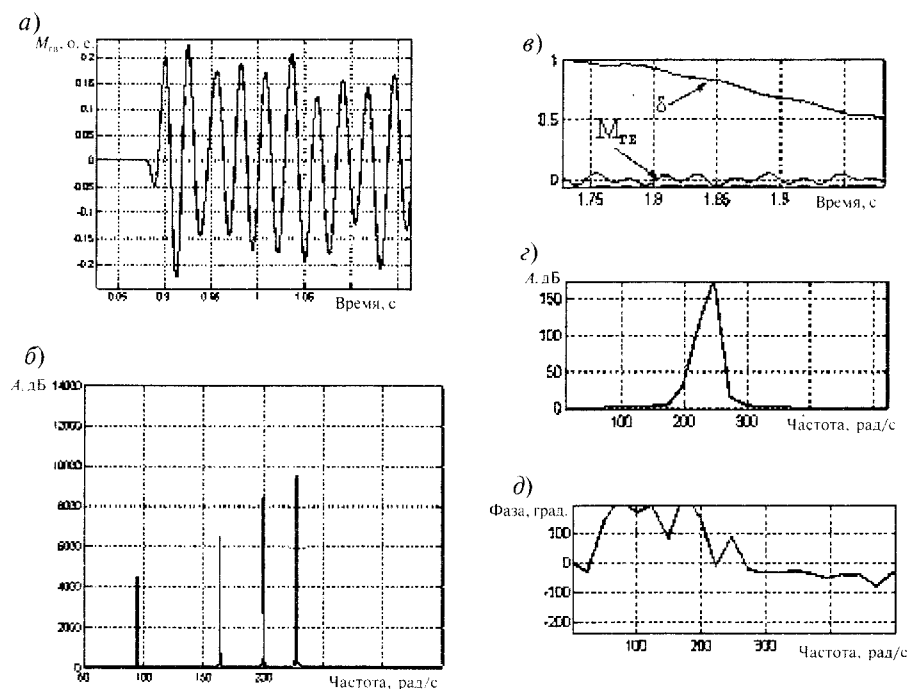


Рис. 9. Характеристики скручивающих моментов между генератором и возбудителем ($M_{ГВ}$): а — скручивающие моменты между генератором и возбудителем ($M_{ГВ}$); б — частотные характеристики для сигнала $M_{ГВ}$; в — сигналы, поступающие в анализатор спектра; г — амплитудный, д — фазовый

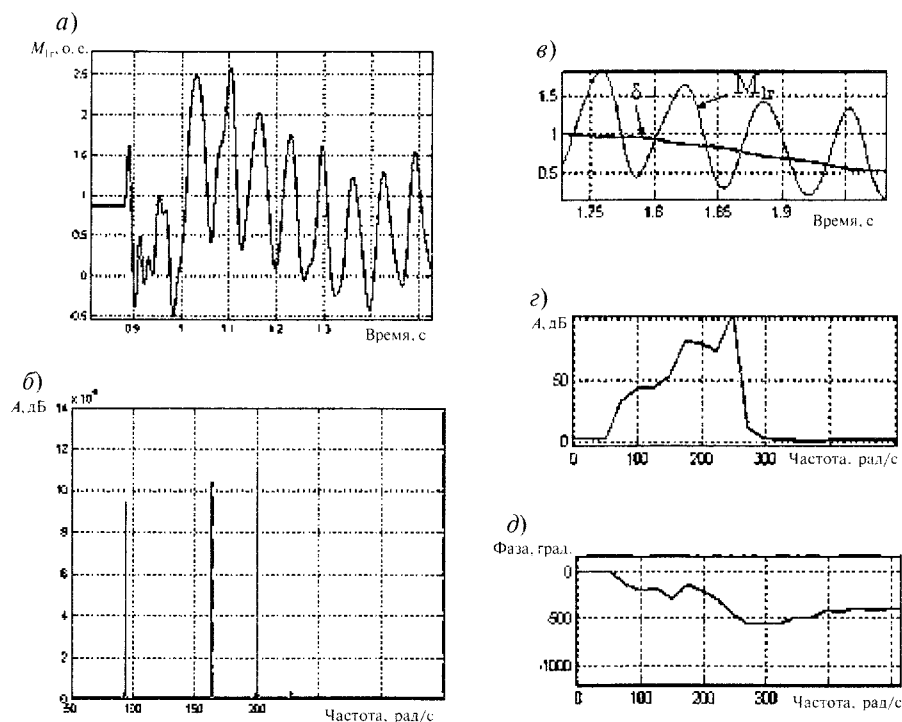


Рис. 10. Характеристики скручивающих моментов между ЦНД1 и генератором $M_{ГГ}$; поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

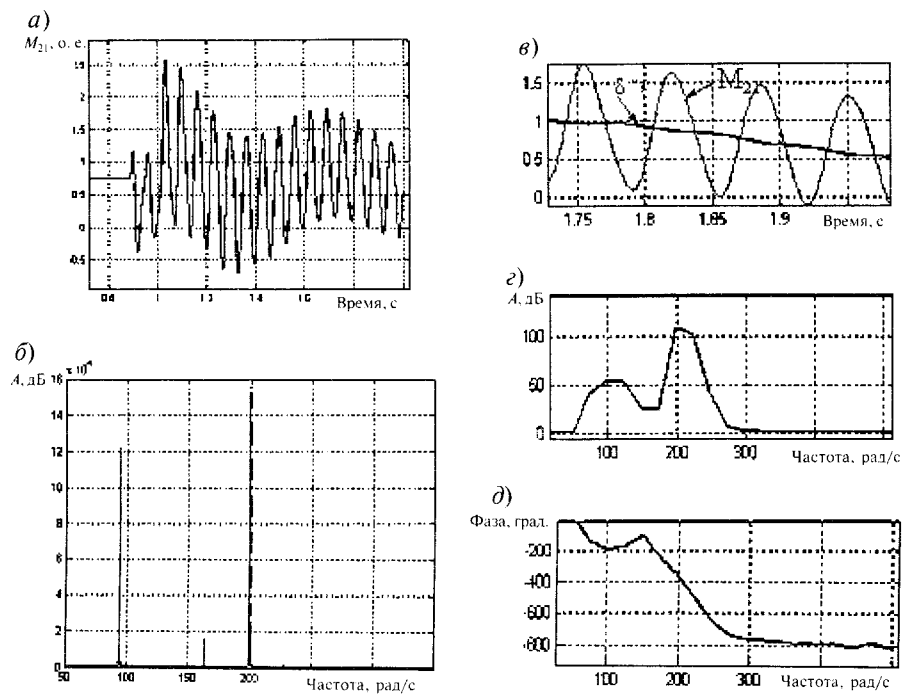


Рис. 11. Характеристики скручивающих моментов между ЦНД2 и ЦНД1 M_{21} ; поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

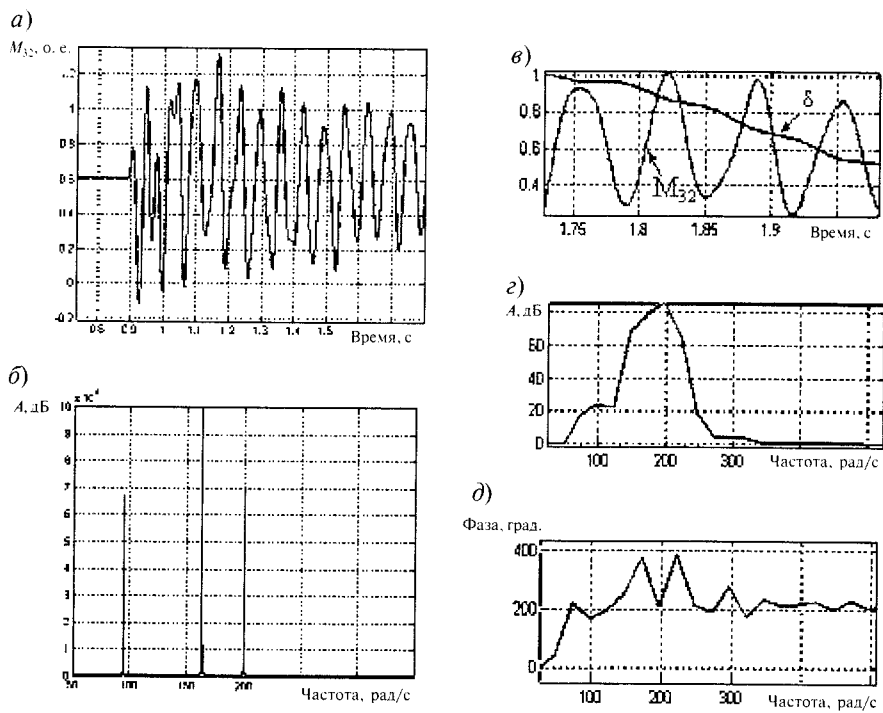


Рис. 12. Характеристики скручивающих моментов между ЦВД и ЦСД M_{32} ; поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

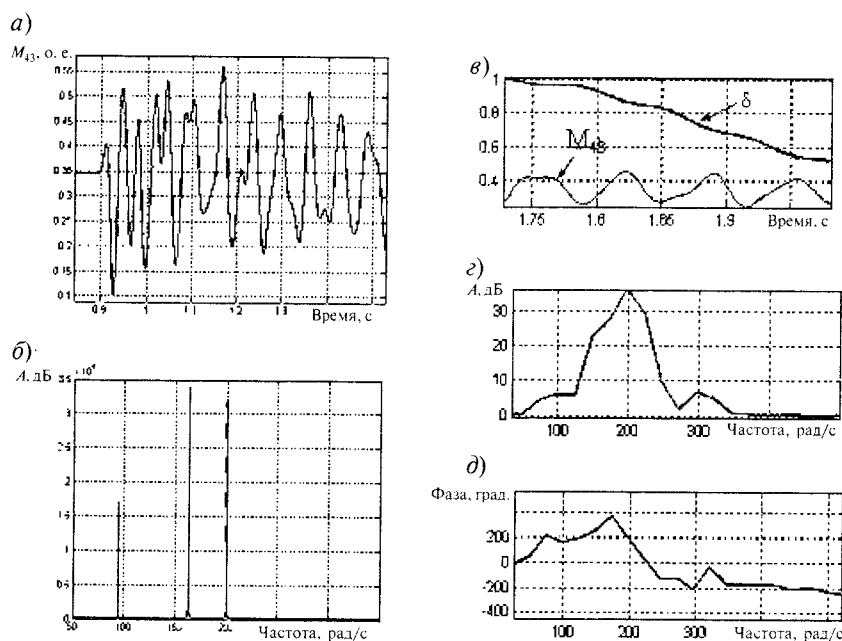


Рис. 13. Характеристики скручивающих моментов между ЦСД и ЦВД M_{32} ; поз. а—д аналогичны позициям рис. 5

Эти характеристики показывают следующее: скручивающие моменты между генератором и возбудителем отличаются колебаниями на частотах 94, 163, 200, 227 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 227 рад/с (рис. 9, а иллюстрирует скручивающие моменты между генератором и возбудителем, рис. 9, б — частотные характеристики; 9, в — сигнал, поступающий в анализатор спектра; 9, г, д — результаты анализа спектра колебаний);

скручивающие моменты между ЦНД1 и генератором характеризуются частотами колебаний 94, 163, 200, 227 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 227 рад/с (рис. 10);

скручивающие моменты между ЦНД2 и ЦНД1 имеют колебания на частотах 94, 163, 200 рад/с. Наибольшая амплитуда наблюдается на частоте крутильных колебаний 200 рад/с (рис. 11);

скручивающие моменты между ЦСД и ЦНД2 содержат колебательные составляющие движения на частотах 94, 163, 200 рад/с. Наибольшая амплитуда достигается на частоте крутильных колебаний 200 рад/с (рис. 12);

скручивающие моменты между ЦВД и ЦСД имеют те же составляющие движения. Наибольшая амплитуда — на частоте крутильных колебаний 200 рад/с (рис. 13).

Анализ собственных значений — это удобное средство для оценки показателей устойчивости системы, особенно сложной системы, включающей синхронный генератор и многомассовый валопровод в условиях взаимодействия возмущающих и демпфирующих моментов на фоне многочастотных крутильных колебаний.

Результаты расчета собственных векторов, дополненные анализом спектров колебаний, дают наглядное представление о физическом характере колебаний в многомассовой системе валопровода турбоагрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moore B.C. On the flexibility offered by state feedback in multivariable systems beyond closed loop eigenvalue assignment // IEEE Trans. on Automatic Control. October 1976. P. 689–692.
2. Luenberger D.G. Observers for Multivariable Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. April 1966. Vol. AC-11, № 2. P. 190–197.
3. Fortmann T.E., Williamson D. Design of Low-Order Observers for Linear Feedback Control Laws // IEEE Trans. on Automatic Control. June 1972. Vol. AC-17, № 8. P. 301–308.
4. Chung C.Y., Wang K.W., Tse C. T. et.al. Damping controller design for FACTS device Part I : Damping signal and location selection // Proc. of the 5th Intern.

conf. on Advances in power system control. Hong Kong, October 2000. P. 420–424.

5. **IEEE Subsynchronous Resonance Working Group Terms** Definitions and symbols for subsynchronous oscillations // IEEE Trans. on power Apparatus and system. June 1985. Vol. PAS-104, № 6.

6. **Anderson P.M., Agrawal B.L., Van Ness J.E.**

Subsynchronous Resonance in Power System. New York: IEEE Press, 1990. 269 p.

7. **Ahamadrezza Tabesh, Reza Iravani.** Frequency-Response Analysis of Torsional Dynamics. // IEEE Tran. on Power Syst. August 2004. Vol. 19, № 3. P. 1430–1437.

8. **Chee Mun Ong.** Dynamic simulation of Electric Machinery. Prentice-Hall, inc, 1998.

Т.Г. Джабер

СНИЖЕНИЕ СКРУЧИВАЮЩИХ МОМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ АГРЕГАТОВ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Развитие изысканий по расширению топливно-энергетической базы страны и освоение новых месторождений обуславливают широкое применение газотурбинных электростанций автономных электроэнергетических систем. Единичная мощность синхронных генераторов, используемых в таких системах достигает 25–50 МВт, а общая мощность автономной электростанции доходит до 150–200 МВт.

Задачей исследования автора была разработка мероприятий по снижению скручивающих моментов, воздействующих на участок вала между генератором и редуктором приводного двигателя при коротких замыканиях в электрической сети. В практике эксплуатации имели место случаи разрушения муфты, соединяющей выходной вал редуктора и вал генератора. Предположительно это происходило из-за нескольких последовательных аварийных возмущений, воздействовавших на агрегат: короткое замыкание и после отключения к. з. повторное включение агрегата на мощный узел синхронной нагрузки при большой разности фазовых углов.

Следует отметить, что протекание переходных процессов дополнительно осложняется из-за неблагоприятного соотношения между инерционными постоянными турбины (с редуктором) и генератора. Так, для агрегата мощностью 8 МВт с газотурбинным приводом характерно соотношение инерционных постоянных генератора и привода 1: 4,0 — 1: 4,2 (чем “легче” ротор генератора по отношению к массам приводной системы, тем большие по величине скручивающие

моменты возникают в сечении между ними при возмущениях электромагнитного момента генератора).

Математическое моделирование высокочастотных электромеханических процессов, связанных с крутильными колебаниями валопровода, выполнялось на основе записи дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, соединенных упругими безынерционными связями. Крутильные колебания валопровода описываются следующей системой дифференциальных уравнений*:

$$\frac{1}{T_{J_d}} \frac{ds_d}{dt} = C_{gd}(\delta_g - \delta_d) + H(s_g - s_d) + M_t + \alpha s_d;$$

$$\frac{1}{T_{J_g}} \frac{ds_g}{dt} = -C_{gd}(\delta_g - \delta_d) - H(s_g - s_d) - M_e; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\omega_c} \frac{d\delta_d}{dt} = s_d;$$

$$\frac{1}{\omega_c} \frac{d\delta_g}{dt} = s_g,$$

где δ_i — угол закручивания соответствующей массы (в индексе d — приводной агрегат с редуктором, g — генератор), рад; ω — синхронная частота

* Шхати Х.В., Смоловик С.В. Исследование скручивающих моментов, воздействующих на валопровод турбоагрегата при неуспешном АПВ линии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 4.