004.942:621.165.621.313.126

Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом

А. С. КОМШИН

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия, e-mail: kozyr.ru@mail.ru

Построены многофакторные математические модели турбоагрегатов и проведено моделирование отклика изменения их параметров на воздействие импульсов внешней электрической сети. На основе вычислительного эксперимента осуществлен контроль изменения электромеханических характеристик турбоагрегатов по мере увеличения напряжения на обмотках статора генератора под воздействием импульса внешней электрической сети.

Ключевые слова: *измерительный контроль, математическое моделирование, паровая турбина, генератор, диагностика, фазохронометрия.*

The multifactorial mathematical models of turbounits are constructed and the modelling of response of change of their parameters on the influence of pulses of external electric network is carried out. On the base of computing experiment the control of change of electromechanical characteristics of turbounits in process of voltage increase on the coils of generator stator under the influence of external electric network pulse is realized.

Key words: *measurement control, mathematical modelling, steam turbine, generator, diagnostics, phase chronometry.*

Создание и последующая эксплуатация промышленной продукции представляют сложный комплекс мероприятий, который в соответствии с федеральным законом № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [1], включает процессы проектирования (учитывая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации. Для эффективного решения проблем создания и эксплуатации турбоагрегатов теплоэлектроцентралей необходимы методы и средства диагностики, имеющие единый принцип представления метрологической информации, и информационное сопровождение исследуемого объекта на всех этапах жизненного цикла, начиная с этапа разработки. Такую возможность обеспечивает фазохронометрический метод, разрабатываемый в МГТУ им. Н. Э. Баумана [2, 3]. При изучении устройств циклического действия работа фазохронометрической системы основана на регистрации момента прохождения определенного значения фазы цикла. Информация о техническом состоянии объекта содержится в вариациях продолжительности временных интервалов, соответствующих прохождениям интервалов (квантов) фазы [4].

Наряду с экспериментальными исследованиями необходимо проводить вычислительное математическое моделирование в целях идентификации исследуемого объекта с режимами его работы, в том числе имитирование критических дефектов и аварийных режимов, которые невозможно реализовать экспериментально. Математическую модель турбоагрегата представляют системой дифференциальных уравнений для сосредоточенных масс: дисков и секций валопровода (роторов), соединенных упругими элементами, обладающими жесткостью и вязкостью. Переходные электромеханические процессы, протекающие в генераторе, описываются уравнениям Парка — Горева для идеализированной модели синхронной машины с постоянными параметрами в продольных d и поперечных q осях, жестко связанных с ротором [5]:

$$
\left.
\begin{aligned}
&J_1\ddot{\theta}_1 + k_H i_b I_q - \left(L_d - L_q\right) I_d I_q = M_т;\\
&rI_d + L_d\dot{I}_d - \omega L_q I_q - k_H\dot{i}_b = -U\sin\theta_1;\\
&\omega L_d I_d + rI_q + L_q\dot{I}_q - k_H\omega i_b = -U\cos\theta_1;\\
&r_b i_b + L_b\dot{i}_b = U_b\, k_H\dot{I}_d;\\
&\omega = \omega_u + \Delta\dot{\theta}_1;\\
&-k_{12}\left(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2\right) - q_{12}\left(\theta_1 - \theta_2\right) - k_{15}\left(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_5\right) - q_{15}\left(\theta_1 - \theta_5\right) -\\
&- M_T = M_1(t);\\
&J_2\ddot{\theta}_2 + k_{12}\left(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1\right) + q_{12}\left(\theta_2 - \theta_1\right) + k_{23}\left(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3\right) +\\
&+ q_{23}\left(\theta_2 - \theta_3\right) = M_2(t);\\
&J_3\ddot{\theta}_3 + k_{23}\left(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2\right) + q_{23}\left(\theta_3 - \theta_2\right) + k_{34}\left(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4\right) +\\
&+ q_{34}\left(\theta_3 - \theta_4\right) = M_3(t);\\
&J_4\ddot{\theta}_4 + k_{34}\left(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3\right) + q_{34}\left(\theta_4 - \theta_3\right) = M_4(t);\\
&J_5\ddot{\theta}_5 + k_{15}\left(\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_1\right) + q_{15}\left(\theta_5 - \theta_1\right) = M_5(t);\\
&x_d = \omega_0 L_d;\\
&x_q = \omega_0 L_q.
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

В системе (1) приняты обозначения: $J_1 ... J_5$, $\theta_1 ... \theta_5$ — моменты инерции и углы поворота роторов генератора, высокого, среднего и низкого давлений и возбудителя, соответственно; θ_1 — внутренний угол генератора; k_H — коэффици-

ент пропорциональности; I_d, I_q — проекции векторов полного тока I статора машины на продольную и поперечную оси машины; r_b, L_b, U_b, i_b — активное сопротивление, индуктивность, напряжение и сила тока обмотки возбуждения; L_q, L_d, x_q, x_d — индуктивности цепи статора и синхронные индуктивные сопротивления соответственно по продольной и поперечной осям; $k_H i_b I_q - (L_d - L_q) I_d I_q$ — электромагнитный момент; $M_т$ — механический момент турбины; r — активное сопротивление обмотки статора; ω — частота вращения ротора, приведенная к угловой частоте ω_u напряжения U на выводах генератора; $\Delta\dot{\theta}_1$ — приращение частоты вращения ротора; k_{15}, k_{12}, k_{23}, k_{34} и q_{15}, q_{12}, q_{23}, q_{34} — коэффициенты, характеризующие вязкости и жесткости секций валопровода в районе муфт; $M_1(t)$ ... $M_5(t)$ — внешние воздействующие механические моменты; t — время; ω_0 — номинальная частота вращения ротора генератора; индексы: 1 — генератор, 2—4 — ступени турбины, 5 — возбудитель.

В переходных режимах работы, сопровождающих отключения, короткие замыкания, автоматические повторные включения и т. д., механические напряжения в материале валопровода могут превысить допустимые. Одновременно наблюдается тенденция заметного ухудшения электромеханических параметров генераторов. Коммутационные, грозовые и другие перенапряжения в электрических сетях неизбежно приводят к возникновению некомпенсированного зарядного тока, который вызывает дополнительное падение напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении генератора, складывающееся с напряжением на линии, что и вызывает повышение напряжения промышленной частоты [5, 6]. Перенапряжение является одним из наиболее опасных аварийных режимов работы электрооборудования. Анализ экспериментальных данных работы турбоагрегатов ТВВ 320-2УЗ-Т-250/300-240-2 и ТВВ-200-2-К-200-130 показал, что в сети происходят регулярные перенапряжения различной природы, что отражается на характере колебаний валопровода турбоагрегата. Измерительно-вычислительный мониторинг изменений во времени параметров турбоагрегата в результате воздействия на статор генератора импульсов электрической сети позволяет определить некоторые критические режимы работы турбоагрегата и провести имитационное моделирование измерения электромеханических характеристик турбоагрегатов.

Пусть импульс, приходящий из внешней сети на обмотки статора, выражается в кратковременном изменении напряжения.

$$\Delta U = U_0 \, e^{-\beta t} \sin \alpha t,$$

где U_0 — номинальное значение напряжения, поступающего из сети на трансформатор; α, β — безразмерные коэффициенты; t — текущее время, $t = t_0 + \Delta t n$; t_0 — начальное время; n — номер отсчета; Δt — время квантования.

В результате воздействия на систему импульса из внешней электрической сети возбуждаются крутильные и изгибные колебания валопровода турбоагрегата, а также колебания токов. Работа турбоагрегата в единой энергетической системе предусматривает постоянное воздействие на него сигналов из внешней сети различных интенсивности, видов и количества. Поэтому для моделирования изменения параметров турбоагрегата рассмотрим влияние на него различных сигналов.

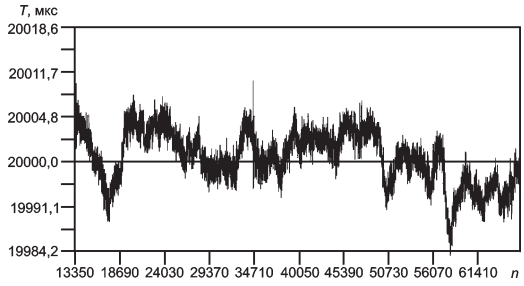

Рис. 1. Хронограмма вращения турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130; n = 64880 периодов

Достигнутая метрологическая точность фазохронометрических систем измерений позволяет обеспечить наблюдение и регистрацию отклика валопровода на вариации нагрузки внешней сети и воздействия системы управления. Вариации нагрузки носят случайный характер. При подключении мощной нагрузки наблюдается резкое изменение периода вращения в сторону увеличения, при отключении — ускорение вращения. Пример хронограммы вращения турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 приведен на рис. 1.

Будем рассматривать влияние импульсов, приходящих из внешней сети на обмотки статора генератора, на рабочий цикл турбоагрегата, параметры которого измеряются фазохронометрическим методом. Примем следующие допущения:

генератор включен во внешнюю сеть;

на обмотки статора поступает одиночный импульс или серия импульсов из внешней сети;

амплитуда импульсов внешней сети изменяется в диапазоне от нескольких вольт до 1000 В;

в системе регулирования включены только контуры регулирования напряжения главного и вспомогательного генератора (возбудителя); частота вращения изменяется в пределах согласно [7], а также должна находиться в пределах (50 ± 0,2) Гц не менее 95 % времени суток, не выходя за предельно допустимые (50 ± 0,4) Гц.

Проведем многофакторное математическое моделирование функционирования турбоагрегата для нескольких вариантов воздействия со стороны внешней электрической сети на обмотки статора.

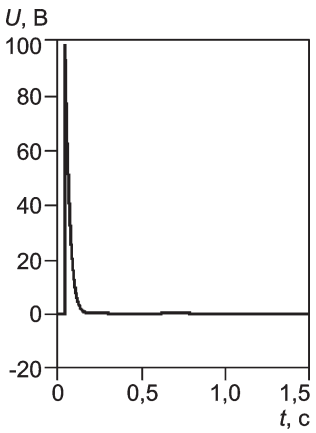

Рис. 2. Импульс, приходящий на обмотки статора генератора турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 из внешней сети

Таблица 1

Максимальные значения измеряемых параметров турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 при воздействии на статор генератора одиночного импульса внешней сети

Параметр	Значение параметра при сигнале импульса, В		
	17,2	172,80	86,00
Изменение амплитуды угла качания, ′			
ротора генератора	3,06	27,20	14,20
ротора низкого давления	7,58	67,2	38,20
ротора возбудителя	7,2	71,4	34,00
Изменение тока, А			
по оси *d*	0,048	0,530	0,115
по оси *q*	0,096	1,252	0,440
возбудителя	0,016	0,254	0,154
Изменение периода вращения, мкс	29	142	68

При воздействии на статор генератора *одиночного импульса внешней сети* ходовая часть турбоагрегата и в том числе ротор возбудителя совершают крутильные колебания. Такой импульс вызывает возмущение токов в продольных *d* и поперечных *q* осях, а также тока возбудителя (рис. 2, табл. 1).

Из табл. 1 следует, что амплитуда изменения угла качания ротора турбины больше, чем ротора генератора, поскольку первая стремится скомпенсировать крутильные колебания валопровода; генератор не возбуждается сильнее турбины. По результатам вычислительного эксперимента можно сделать выводы, что по мере увеличения напряжения на обмотках статора под воздействием импульса внешней сети происходят изменения:

амплитуд угловых качаний роторов турбоагрегата (увеличиваются от единиц до десятков угловых минут);

токов по осям *d* и *q*, тока возбудителя (увеличиваются);

амплитуды угла качания ротора генератора независимо от амплитуды сигнала внешней сети (меньше, чем для роторов турбины).

Таблица 2

Максимальные значения возмущаемых параметров рабочего режима турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 при воздействии на обмотки статора генератора серии импульсов внешней сети

Параметр	Значение параметра при сигнале импульса, В					
	0,36	3,64	**36,40**	**36,40**	**34,80**	34,80
Период колебаний сигнала, с	0,0060	0,0060	**0,0060**	**0,0040**	**0,0126**	0,0110
Изменение амплитуды угла качания, ′						
ротора генератора	0,27	0,33	**3,11**	**2,11**	**4,35**	4,15
ротора низкого давления	0,55	0,65	**2,92**	**1,72**	**6,82**	4,52
ротора возбудителя	0,24	0,41	**3,64**	**1,60**	**20,80**	14,50
Изменение тока, А						
по оси *d*	0,06	0,11	**0,98**	**0,82**	**1,08**	1,04
по оси *q*	0,11	0,47	**5,22**	**7,23**	**1,81**	2,42
возбудителя	0,012	0,017	**0,083**	**0,073**	**0,101**	0,090

Приход на статор генератора одиночного импульса влияет на амплитуду значений параметров турбоагрегата. Система генератор — турбина остается устойчивой.

В случае, если на обмотки статора генератора из внешней сети поступает *серия гармонических колебаний,* не скомпенсированных демпфирующими обмотками, то при анализе результатов подобного воздействия необходимо учитывать не только амплитуду интенсивности электрического сигнала, но и период его колебаний. В табл. 2 приведены результаты измерений параметров работы турбоагрегата при математическом моделировании (полужирным шрифтом выделены значения параметров, относящихся к наиболее критичным режимам работы турбоагрегата).

Из результатов вычислительного эксперимента (см. табл. 2) следует:

изменение амплитуды угла качания ротора генератора, превышающее изменение амплитуды качания вала турбины, происходит при воздействии на статор серии импульсов с периодом, меньше периода вращения турбоагрегата в три и более раз;

в случае воздействия на обмотку статора импульса с периодом колебаний, кратным собственным частотам турбоагрегата (период колебаний 0,0126 с соответствует частоте 79,26 Гц, кратной 39,68 Гц — собственной частоте турбины, полученной из экспериментально зарегистрированного спектра колебаний; период 0,011 с частоте 90,9 Гц, кратной 45,45 Гц — собственной частоте генератора, полученной из результатов экспериментально зарегистрированного спектра колебаний) возникает электромеханический резонанс, который вызывает увеличение амплитуды угла качания вала возбудителя, резкое повышение тока возбудителя и, как следствие, ударное воздействие крутящего момента на его муфту;

изменение амплитуды угла качания ротора генератора больше изменения амплитуды крутильных колебаний секций валопровода турбины.

Проведем вычислительный эксперимент отклика турбоагрегата на внешнее воздействие сети на статор генератора. Полученные результаты свидетельствуют о том, что «возбуждение» генератора, выражающееся в большем по сравнению с турбиной изменении амплитуды угла качания, происходит в случае воздействия гармонического импульса внешней электрической сети. Рассмотрим влияние такого импульса на турбоагрегат ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2. В табл. 3 представлены параметры работы турбоагрегата при математическом моделировании воздействия на статор генератора нескольких импульсов из внешней сети (полужирным шрифтом выделены значения, относящиеся к критическим режимам работы). На рис. 3 приведены примеры реализации математического моделирования при изменениях углов качания роторов возбудителя и генератора. Из результатов вычислительного эксперимента следует:

в случае воздействия на обмотку статора импульса с периодом колебаний, кратным собственным частотам турбоагрегата (период колебаний 0,0042 с соответствует частоте 238 Гц, кратной 23,8 Гц — собственная частота генератора, полученная из экспериментального спектра крутильных колебаний), возникает резонанс, который вы-

Таблица 3

Максимальные значения измеряемых характеристик турбоагрегата ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2 при воздействии на статор генератора нескольких импульсов внешней сети

Параметр	Значение параметра при сигналах, В		
	0,51	6,80	**68,20**
Период колебаний сигнала, с	0,0126	0,0126	**0,0042**
Изменение амплитуды угла качания, ′			
ротора генератора	0,24	0,35	**2,88**
ротора низкого давления	1,24	1,2	**2,1**
Изменение тока, А			
по оси *d*	0,041	0,182	**1,902**
по оси *q*	0,085	1,120	**10,700**

зывает существенное увеличение амплитуды угла качания ротора генератора по сравнению с углом качания роторов турбины;

изменения амплитуды угла качания генератора при воздействии на статор одиночного импульса или серии импульсов с периодом, не кратным собственным частотам турбоагрегата, не превышает амплитуд крутильных колебаний роторов турбины.

Выводы. Проведено многофакторное математическое моделирование отклика изменения параметров турбоагрегатов на воздействие импульсов внешней электрической сети на примере ТВВ-200-2-К-200-130 и ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2. Установлено, что по мере повышения напряжения на обмотках статора под воздействием импульса внешней сети происходят следующие процессы:

увеличение амплитуды угловых качаний роторов турбоагрегата от десятых долей единицы до десятков угловых минут; повышение сил токов по осям *d*, *q* и тока возбудителя. При этом амплитуда угла качания ротора генератора независимо от амплитуды сигнала внешней сети остается меньше амплитуды угла качания роторов турбины. Приход на обмотки статора генератора одиночного импульса влияет на амплитуды значений динамики ходовых частей турбоагрегата. Система генератор—турбина остается устойчивой. Это выражается в том, что амплитуда угла качания генератора всегда меньше, чем роторов турбины;

возбуждение генератора, вызванное изменением амплитуды угла качания, превышающее изменение амплитуды качания валопровода турбины, происходит при воздействии на статор не одиночного импульса, а серии импульсов с периодом колебаний, меньше периода вращения турбоагрегата в три и более раз;

в случае воздействия на обмотку статора импульсов с периодом колебаний, кратным собственным частотам турбоагрегата, возникает электромеханический резонанс, который вызывает существенное увеличение амплитуды угла качания возбудителя, резкое повышение его силы тока и, как следствие, ударное воздействие большого крутящего момента на муфту возбудителя.

Литература

1. **Федеральный** закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 г. «О техническом регулировании».

2. **Пронякин В. И.** Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 9—13; **Pronyakin V. I.** Problems in diagnosing cyclic machines and mechanisms // Measurement Techniques. 2008. V. 44. N 10. P. 1058—1064.

3. **Киселев М. И. и др.** Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 10—13.

4. **Киселев М. И., Пронякин В. И.** Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 15—18; **Kiselev M. I., Pronyakin V. I.** A Phase Method of Investigating Cyclic Machines and Mechanisms Based on a Chronometric Approach // Measurement Techniques. 2001. V. 44. N 9. P. 898—902.

5. **Костюк О. М., Соломаха М. И.** Колебания и устойчивость синхронных машин. Киев: Наукова Думка, 1991.

6. **Шхати Х. В.** Развитие методов математического моделирования переходных процессов современных генераторов для повышения эксплуатационных показателей их работы: Автореф. дис. на соиск. степ. докт. техн. наук. СПб., 2008.

7. **ГОСТ Р 54149—2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

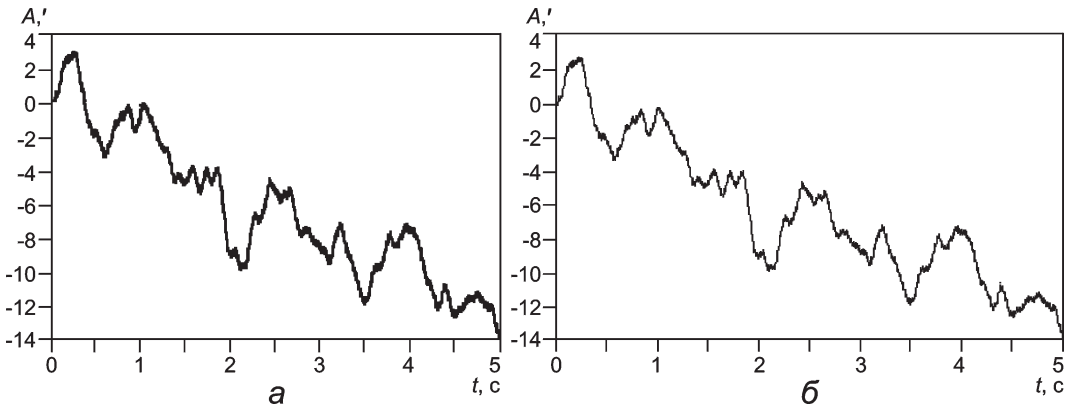

Рис. 3. Изменения амплитуды угла качания роторов возбудителя (*а*) и генератора (*б*) турбоагрегата ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2

Дата принятия 20.05.2013 г.