

О КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ В МОДЕЛИ ПАРОТУРБОГЕНЕРАТОРА С УЧЁТОМ УПРУГОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Предлагается новая теория, модель и алгоритмы расчета квазидинамических переходных процессов (ПП) с учетом упругости магнитного поля турбогенератора. Отдельные результаты расчетов подтверждаются экспериментальными исследованиями. Рассмотрена двухмассовая электромеханическая модель и ПП работы ПТГ на сеть бесконечной мощности непосредственно, без трансформаторов и линий электропередачи.

Ключевые слова: электростанция, паротурбогенератор, математическое моделирование, колебательность, переходные процессы.

Вопросы обеспечения безаварийной работы электростанции и, следовательно, ее безопасности являются важнейшими и имеющими приоритетное значение. Настоящая статья посвящена рассмотрению электромеханических колебаний в паротурбогенераторе (ПТГ), как объекте, от параметров режимов которого зависят упругие моменты в агрегате. В свою очередь, упругие моменты, т. е. амплитуда в сочетании с частотой их воздействия, приводят к усталостным разрушениям, например, к поломке валов агрегата.

Из (Веников, 1985) известно, что расчет переходных процессов (ПП) в электромеханической системе (ПТГ–сеть) может быть выполнен на основе линеаризованной динамической модели по уравнениям Парка–Горева, где параметры режимов находятся в зависимости как друг от друга, так и во времени.

$$\Pi_d = \varphi \left(y_1, y_2, \dots, y_n; t; \frac{dy_1}{dt}; \frac{dy_2}{dt}; \dots; \frac{dy_n}{dt} \right).$$

Статические характеристики (модели) получены при бесконечно медленном изменении параметров и содержат переменные, не зависящие от времени.

$$\Pi_c = f(y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Характеристики (модели), занимающие промежуточное положение между динамическими и статическими, являются квазидинамическими. Применительно к исследуемому объекту различие между первым и третьим типами моделей будет состоять в том, что для первой параметры режимов ищутся при $E = \text{const}$ и $E' = \text{const}$, а для последней — при $E = f(t)$ и $E' = f(t)$, где E и E' — ЭДС, соответственно, генератора и за переходным сопротивлением, E_q и E'_q — то же самое в проекции на ось «q».

В квазидинамической модели быстропротекающие электрические процессы $I(t)$, $U(t)$ не учитываются, и для их расчета в ПП следует пользоваться динамическими моделями, а для решения медленных механических процессов — $M(t)$, $\omega(t)$ следует адаптировать (развить) квазидинамическую модель (Веников, 1985).

Решение задачи для объекта «паротурбогенератор–сеть» начнем с построения модифицированной квазидинамической электромеханической модели, отражающей действующие в нем массы, моменты и силы. В модели паротурбогенератора необходимо учесть влияние механических колебаний следующих основных частей (рис. 1):

- первого вала (цилиндр высокого давления — цилиндр среднего давления), имеющего жесткость C_1 и момент инерции J_1 ;
- второго вала (цилиндр среднего давления — цилиндр низкого давления), имеющего жесткость C_2 и момент инерции J_2 ;
- третьего вала (цилиндр низкого давления ЦНД1 — цилиндр низкого давления ЦНД2) имеющего жесткость C_3 и момент инерции J_3 ;
- четвертого вала (цилиндр низкого давления ЦНД2 — ротор генератора), имеющего жесткость C_4 и момент инерции J_4 ;
- пятого условного эквивалентного электромеханического вала ротора турбогенератора (ТГ), имеющего жесткость C_M и момент инерции J_p .

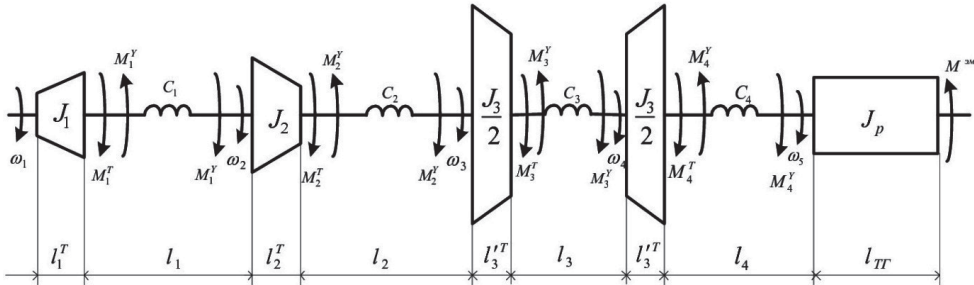


Рис. 1. Пятимассовая механическая модель агрегата

Классическая задача «Исследование механических колебаний в много-массовой системе» для четырех турбин и ротора ТГ была рассмотрена очень подробно (Рубисов, 1986). Необходимо заметить, что при рассмотрении переходных процессов в системе «ПТГ–электрическая сеть» необходимо ввести в рассмотрение и параметры электромеханической модели ТГ, учитывающей упругость магнитного поля C_M .

Таким образом, при введении жесткости в модель ТГ, в итоге получим расчетную электромеханическую модель (ЭММ) паротурбогенератора, содержащую шесть основных масс и дополнительный эквивалентный электромеханический вал с нелинейной упругостью магнитного поля C_M .

Механические переходные процессы в ЭММ могут быть описаны следующими уравнениями:

$$M_1^T - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \left(J_1 \frac{\omega_1}{p} \right) \quad (1)$$

$$M_2^T + M_{12} - M_{23} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \left(J_2 \frac{\omega_2}{p} \right) \quad (2)$$

$$M_3^T + M_{23} - M_{34} = J_3 \frac{d\omega_3}{dt} \left(J_3 \frac{\omega_3}{p} \right) \quad (3)$$

$$M_4^T + M_{34} - M_{45} = J_4 \frac{d\omega_4}{dt} \left(J_4 \frac{\omega_4}{p} \right) \quad (4)$$

$$M_{45} - M^Y - M^{до} = J_p \frac{d\omega'}{dt} \left(J_p \frac{\omega'}{p} \right) \quad (5)$$

$$\omega_0 = \text{const}, \quad M^Y + M^{до} - M^\Gamma = 0, \quad J_6 = J_\infty \quad (6)$$

От известных ранее (Веников, 1985, Рубисов, 1986) они отличаются уравнениями 5, 6 полученными при формировании двухмассовой модели ТГ и записанными для приращений скорости ω' .

Кроме этого необходимы еще уравнения связи:

$$-M^Y = M^\Gamma = M_m^\Gamma \sin \theta \quad (7)$$

$$M^\Gamma \varphi_p = \int_0^t \omega_p dt, \quad \varphi_p = (\omega' + \omega_0)/p \quad (8)$$

$$\varphi_0 = \int_0^t \omega_0 dt, \quad \varphi_0 = \omega_0/p \quad (9)$$

$$\theta = \theta_0 + (\varphi_p - \varphi_0) \quad (10)$$

$$M^{до} = K^{до} \omega' \quad (11)$$

$$M_{12} = C_1(\varphi_1 - \varphi_2) \dots M_{45} = C_4(\varphi_4 - \varphi_5) \quad (12 \dots 15)$$

где $M_1^T, M_2^T, M_3^T, M_4^T$ — моменты соответственно всех цилиндров турбины; $M_{12}, M_{23}, M_{34}, M_{45}$ — упругие моменты соответственно всех валов ПТГ; M^Y — момент упругости магнитного поля; $M^{до}$ — момент демпферной обмотки; ω_0, ω_p — частота вращения соответственно поля статора (сети) и ротора ТГ; ω' — частота колебаний ротора относительно поля статора (приращения скорости); φ_0, φ_p — угол поворота соответственно магнитного поля и ротора ТГ; θ, θ_0 — угол нагрузки соответственно текущий и начальный; $J_1, J_2, J_3, J_4, J_p, J_6$ — моменты инерции соответственно четырех турбин, ротора ТГ и сети; значение J_6 полагаем стремящимся к бесконечности; демпфированием колебаний валов на первом этапе пренебрегаем.

В работе (Веников, 1985) показано большое разнообразие режимов работы ТГ и сети, в том числе, и при коротких замыканиях. Причем все отдельные режимы описываются различными системами уравнений, поэтому рассмотрение по единой методике всех ПП на практике представляет существенные

трудности. Вследствие этого исследование переходных процессов в системе «ПТГ–сеть» разобьем на ряд стадий и этапов.

На первой стадии перейдем от многомассовой к двухмассовой ЭММ (рис. 2), и для анализа процессов воспользуемся традиционными понятиями ведущего и ведомого звеньев (Левитский, 1988). В системе «ПТГ–сеть» ведущим звеном является турбина (или более точно распределенными ведущими звеньями являются ее цилиндры), а ведомыми — турбогенератор (звено 1) и сеть (звено 2). Ведущее звено создает момент M_{Σ}^T (рис. 3):

$$M_{\Sigma}^T = M_1^T + M_2^T + M_3^T + M_4^T = \text{const}.$$

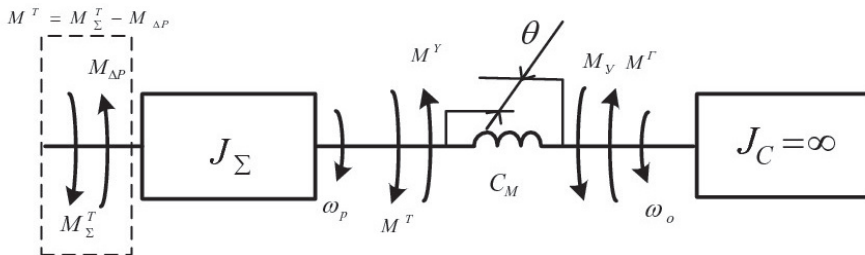


Рис. 2. Двухмассовая электромеханическая модель турбогенератора

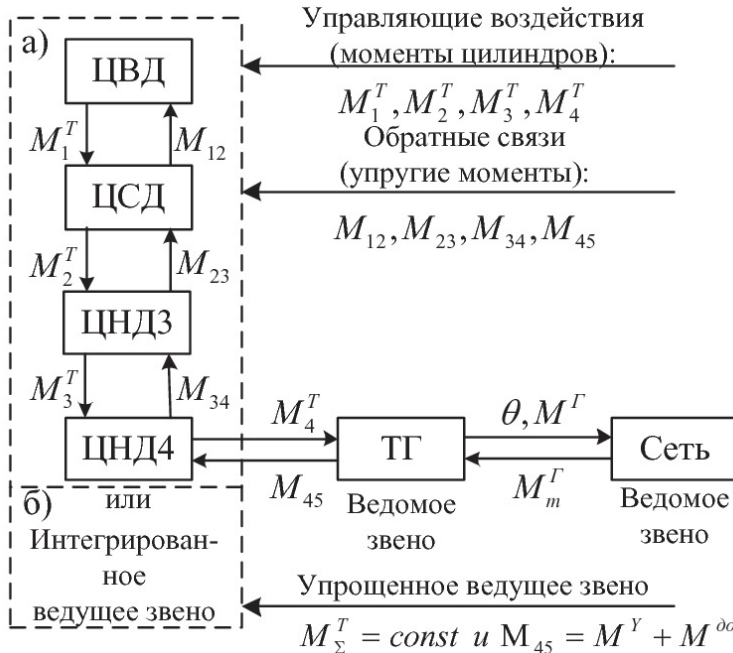


Рис. 3. Функциональная схема электромеханической модели системы «паротурбогенератор–сеть»: а) распределенное ведущее звено, состоящее из четырех цилиндров; б) интегрированное-упрощенное ведущее звено — турбина с суммарным моментом M

Выходными параметрами ведомого звена 1 или входными параметрами сети будут угол нагрузки θ , момент генератора M^Γ и демпферный момент M^{D0} . Сигналами обратных связей являются:

с ведущим звеном — скорость ω_p ротора ТГ;

звена 2 со звеном 1 — максимальный момент генератора M_m^Γ , определяемый угловой характеристикой ТГ.

Предварительные расчеты жесткостей валов ПТГ C_B и жесткости магнитного поля ТГ C_M показали, что это величины приблизительно одного порядка для агрегата $P = 220$ МВт:

$$C_B \cong 3 - 6 \times 10^6 \left[\frac{\text{Нм}}{\text{рад}} \right], \quad C_M \cong 1 - 1,2 \times 10^6 \left[\frac{\text{Нм}}{\text{рад}} \right].$$

Моменты же инерции цилиндров турбины и ротора ТГ различаются на два порядка и более. Следовательно, более высокочастотные свободные колебания ожидаются скорее у валов турбин (ω_0^T), чем у ротора ТГ (ω_0^Γ) в магнитном поле. Эти значения частот механического резонанса ориентировочно могут быть определены как

$$\omega_0^T = \sqrt{\frac{C_i}{J_i}}, \quad \omega_0^\Gamma = \sqrt{\frac{C_M}{J_p}}. \quad (16)$$

Конечно, реальные процессы в модели паротурбогенератора в определенной степени будут зависеть и от параметров (электрической) нагрузки турбогенератора. Прежде всего, под нею понимается сеть энергосистемы. На первой стадии исследуем работу ПТГ непосредственно на сеть бесконечной мощности, без трансформаторов и линий электропередачи.

Рассмотрим процессы в электромеханической двухмассовой модели турбогенератора при традиционных допущениях, изложенных в (Веников, 1985, Левитский, 1988, Костенко, 1965):

E и U — напряжение и ЭДС генератора постоянны; r_a — активное сопротивление обмоток статора генератора. Его значением пренебрегают. Также пренебрегаем влиянием блока автоматической регулировки (АРВ) генератора. Постоянные потери ΔP_{const} в ТГ учитываем в моменте турбины M^T .

И при этом следует иметь в виду, что, даже в простейших случаях, уравнения переходных режимов получаются нелинейными и, следовательно, их решение во многих случаях выполняется численными методами.

На рис. 4 показаны зависимости потенциальной энергии упругости магнитного поля W_n от угла нагрузки θ в относительных единицах. Реальное значение W_n получается умножением на максимальный момент генератора M_m^Γ . В общем случае выражение для потенциальной энергии от упругой деформации φ при скручивании имеет вид:

$$W_n = C_\varphi \times \frac{\varphi^2}{2},$$

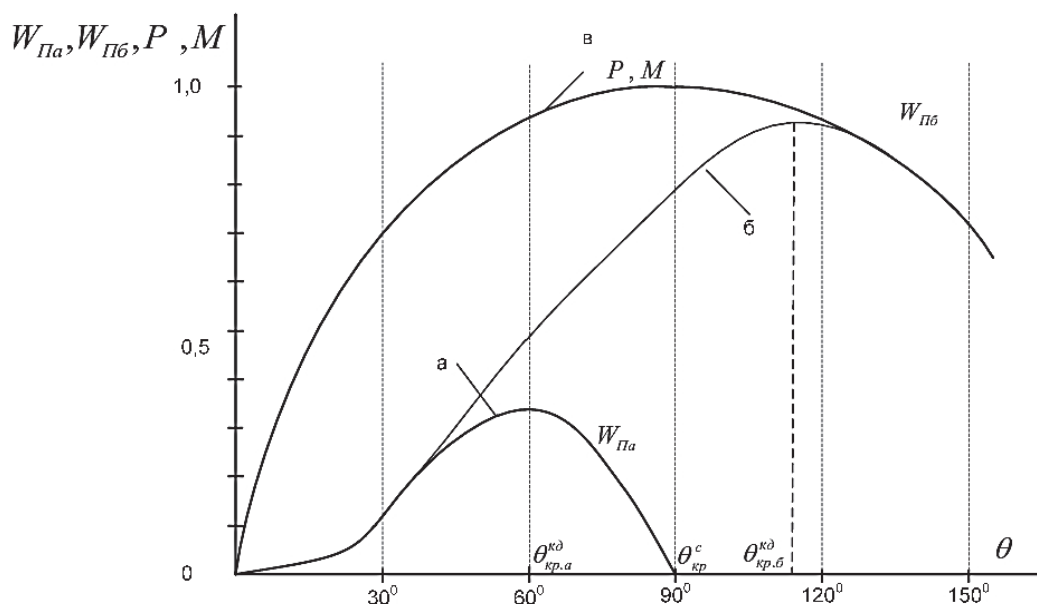


Рис. 4. Зависимость потенциальной энергии упругости магнитного поля от угла нагрузки θ в относительных единицах в статике: а — по данным [3, 4]; б — по данным авторов статьи; в — угловая характеристика мощности и момента в относительных единицах

По мнению авторов, выражение для потенциальной энергии магнитного поля в относительных единицах при $C_M = M_m^\Gamma (\sin \theta) / \theta$ будет иметь вид:

$$W_{Пб}^* = \frac{\sin \theta}{2} \times \theta, \quad W_{Пб} = W_{Пб}^* \times M_m^\Gamma; \quad (17)$$

и по выражению из [3, 4] при $C_M = M_m^\Gamma \cos \theta$:

$$W_{Па}^* = \frac{\cos \theta}{2} \times \theta^2, \quad W_{Па} = W_{Па}^* \times M_m^\Gamma. \quad (18)$$

Полученные зависимости для функции $W_{Пб}^*(\theta)$ подтверждают возможность перехода ее в кинетическую энергию ротора и обратно (в колебательном переходном процессе) в широком диапазоне изменения угла $\theta - 0 < \theta \leq \theta_m \equiv 115^\circ (135^\circ)$, а не $0 < \theta \leq \theta_m \equiv 90^\circ$, что совпадает с результатами натуральных экспериментальных исследований ПП (Костенко, 1965) и позволяет сделать вывод о необходимости пересмотра результатов, полученных на линеаризованных моделях. Так как удалось разбить систему «ПТГ–сеть» на составные ведущие и ведомые звенья с обратными связями (т. е. разделить ее на составные зависимые подсистемы), то рассматривается возможность отладки методики расчета ПП отдельных звеньев при известных входных воздействиях и известных обратных связях.

Необходимо заметить, что частные решения по параметрам режимов во времени в двухмассовой ЭММ будут давать только качественные характеристики. Реальные зависимости могут быть получены на следующих стадиях при решении единой системы «ПТГ–сеть», включая автоматические регуляторы — турбины (АРТ) и возбуждения турбогенератора (АРВ).

Рассмотрим подробнее электромеханическую модель ТГ. При этом введем следующие допущения и уточнения:

J_{Σ} — суммарный момент инерции агрегата; M_{Σ}^T — суммарный момент четырех цилиндров турбины.

Модель турбины на первой стадии будем рассматривать, как идеальный источник момента $M_{\Sigma}^T = \text{const}$.

M^Y — упругий момент магнитного поля;

M^T — расчетный момент турбины;

$M^{\text{до}}$ — демпферный момент ТГ;

$M_{\Delta P}$ — момент учета постоянных потерь ТГ;

$$M_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{МХ}} + \Delta P_{\text{д}}}{\omega_0}, \quad M^T = M_{\Sigma}^T - M_{\Delta P},$$

где ΔP_{Fe} , $\Delta P_{\text{МХ}}$, $\Delta P_{\text{д}}$ — потери соответственно в стали статора, механические и добавочные.

Указанные потери условно принимаем постоянными, т. к. изменение скорости ω_p происходит в небольших пределах и магнитный поток также считаем также постоянным. В дальнейшем в объединенной механической и электрической модели турбогенератора, при необходимости, можно будет учесть и изменение ΔP_{Fe} и $\Delta P_{\text{д}}$.

– r_a и ΔP_{ω} — сопротивление генератора и активные потери положены равными нулю;

– θ — угол сдвига между векторами E и U (ЭДС и напряжение генератора);

– ω_p и ω_0 — скорости ротора и магнитного поля;

– \bar{J}_{∞} — эквивалентный момент инерции сети бесконечной мощности.

Под ним будем понимать механическое влияние такой сети, исходя из эквивалентности электрической и механической энергий.

С учетом изложенного, двухмассовая модель ТГ представлена на рис. 2. В ней упругие магнитные связи учтены эквивалентной интегральной жесткостью C_M магнитной «пружины», предложенной еще М. Фарадеем (Костенко, 1965, Вольдек, 1966). Она одним своим концом прикреплена к ротору ТГ, а другим — «приклеена» к полю статора, вращающемуся с постоянной синхронной скоростью ω_0 . Все процессы в двухмассовой модели будут опреде-

ляться управляющим воздействием M^T , и параметрами модели J_Σ , C_M и максимальным значением момента генератора M_m^Γ .

Эквивалентная жесткость магнитного поля C_M может быть определена следующим выражением из классической теории механики в виде:

$$C = \frac{M}{\varphi}, \quad C_M = \frac{M^\Gamma}{\theta} = \frac{M_m^\Gamma \sin \theta}{\theta}, \quad (19)$$

а момент M^Γ из угловых характеристик турбогенератора.

В простейшем случае, (при работе ТГ непосредственно на сеть бесконечной мощности $E = \text{const}$ и $U = \text{const}$) имеем следующее:

$$M^\Gamma = M_m^\Gamma \sin \theta \text{ и } M^\Gamma = -M^Y.$$

Демпферный момент от соответствующей обмотки генератора или от вихревых токов в стали ротора может быть найден, как:

$$M^{D0} = K^{D0} (\omega_p - \omega_0).$$

Для предлагаемой двухмассовой модели ТГ была построена структурная схема, содержащая нелинейные элементы ($\sin x$). Ниже будут показаны решения уравнений, полученные с помощью стандартных программ (MATLAB Simulink) (Герман-Галкин, 2008). Расчетные параметры из полученного решения могут быть положены в электрическую модель системы «генератор–сеть», что позволит определить остальные искомые величины ведомого звена — сети.

Преобразованная структурная схема для MATLAB Simulink была отлажена, и после проверки достоверности был выполнен комплекс расчетов. Основное внимание уделялось проверке достоверности отказа от допущений направленных на ограничение θ_0 и $\Delta\theta$ (Костенко, 1965, Вольдек, 1966) и от решений, основанных на методе линеаризации (Рубисов, 1986). На рис. 5 представлены зависимости переходных процессов в двухмассовой модели ТГ при работе непосредственно (без трансформатора и линий) на сеть бесконечной мощности.

Начальные условия при этом были следующие:

$$M_H^\Gamma = -M^Y = M_{\max}^\Gamma \sin \frac{\pi}{6}; \quad \theta_0 = \frac{\pi}{6}; \quad \omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

На вход структурной схемы подаем воздействие $M^T = 1,5M_H^\Gamma$. Выходными параметрами ведомого звена ТГ являются:

- угол $\theta(t)$,
- момент генератора $M^\Gamma(t)$

В системе возникают синусоидальные колебания, которые затухают под действием успокоительного момента M^{D0} демпферной обмотки.

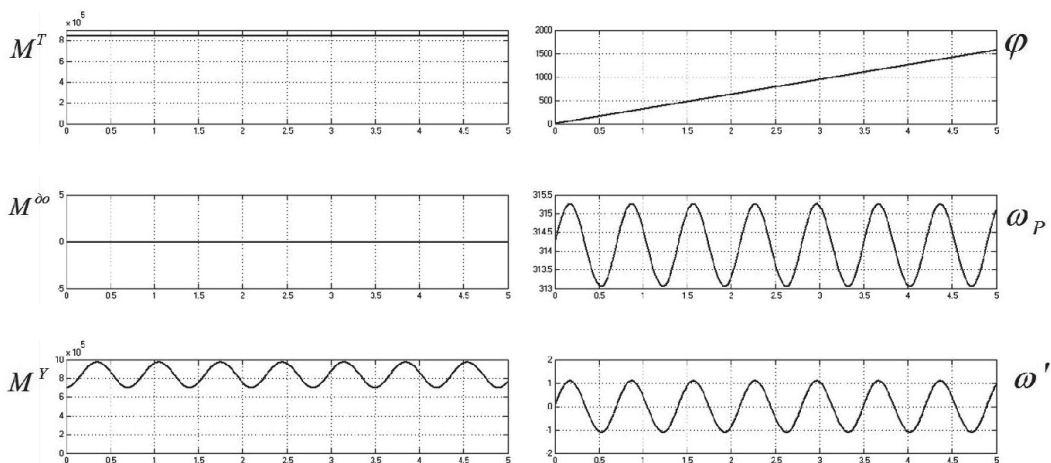


Рис. 5, а. Зависимости параметров режима при увеличении момента турбины

$$M^T = 1,2M^\Gamma \text{ и отсутствии демпфирования}$$

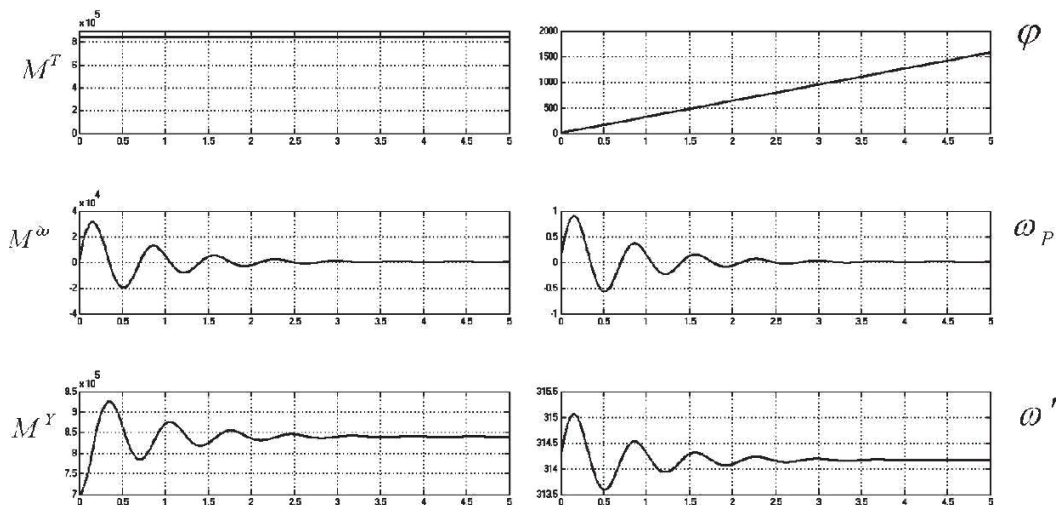


Рис. 5, б. Зависимости параметров режима при увеличении момента турбины

$$M^T = 1,1M^\Gamma \text{ и наличии демпфирования}$$

На основании анализа выходных параметров системы был сделан вывод об адекватности методики и необходимости выполнения последующих стадий исследования переходных процессов:

- режима трехфазного короткого замыкания в двухмассовой модели;
- определения колебательности в многомассовой модели турбоагрегата;
- определения электрических параметров режима в ТГ при изменении параметров электрической сети;
- определения возможности блока автоматической регулировки по улучшению качества и надежности работы турбоагрегата в сети.

Выводы.

1. Выполнен анализ подсистемы (турбогенератор–сеть) с учетом упругих связей между ротором и статором, и разработана механическая двухмассовая модель турбогенератора, учитывающая эти упругие связи.

2. Разработана методика расчета переходных процессов турбогенератора с учетом упругих связей магнитного поля.

3. Разработан алгоритм проверки методики расчета переходных процессов в многомассовой модели турбогенератора.

4. Определены план и технические требования для следующих стадий теоретических исследований по повышению качества надежности и безопасности работы турбоагрегата в сети.

Литература

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах. М. : Высшая школа, 1985. 536 с.
2. Рубисов Г. В., Сигаев В. Е. Расчетный метод анализа крутильных колебаний валопривода турбогенератора. Электротехника, 1986. № 1.
3. Левитский Н. П. Колебания в механизмах. Л. : Наука, 1988. 336 с.
4. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины Часть II. М.; Л. : Энергия, 1965. 704 с.
5. Вольдек А. И. Электрические машины. М.; Л. : Энергия, 1966. 782 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : Корона, 2008, 367 с.

K. A. Ballas, V. E. Egorov, S. V. Drozdov, V. D. Smirnov

OSCILLATE IN A MODEL STEAM TURBINE, TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTICITY OF THE MAGNETIC FIELD

In this paper we propose a new theory, model and algorithms for calculating the quasi-dynamic transient processes (TP), taking into account the elasticity of the magnetic field of turbo-generator. Part of results of the calculations are confirmed by experimental studies. In this article investigated two-mass electro-mechanical model of steam turbogenerator and TP on a network of infinite capacity directly, without transformers and transmission lines.

Keywords: power station, steam-turbogenerator, mathematical simulation, oscillate, transient processes.

Баласс Кирилл Алексеевич — ассистент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, +7 (8112) 75-22-46, kir.a.balass@gmail.com.

Егоров Владимир Егорович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент, egorov_v_e@mail.ru.

Дроздов Сергей Владимирович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент, sergei_drozdov@inbox.ru.

Смирнов Вадим Дмитриевич — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент.