

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ДЛЯ РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПАРОТУРБОГЕНЕРАТОРА

*Техническая безопасность работы главных компонентов электростанции определяет безопасность всей электростанции. Наиболее опасным компонентом является паротурбогенератор (ПТГ). Опыт эксплуатации показывает, что аварии ПТГ приводят к полному разрушению машинного зала и гибели людей. Аварии на ПТГ могут происходить как по причине отказа противоаварийной защиты (ПАЗ), так из-за усталостных разрушений ПТГ. Исследованию параметров динамических режимов работы посвящена данная работа.*

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

При расчётах механической прочности валов паротурбогенератора необходимо с достаточной точностью определить динамические моменты, действующие на отдельные участки валопровода паротурбогенератора (ПТГ). Динамические моменты характеризуются формой, амплитудой, длительностью и частотой повторения и их принято называть возмущающей силой. Причём возмущения в ПТГ могут приходиться как со стороны турбины (гидравлические удары в паропроводе и воздействия регуляторов турбин), так и со стороны нагрузки турбогенератора (изменения параметров нагрузки турбогенератора — вплоть до трёхфазного короткого замыкания). Эти возмущения (импульсные и скачкообразные) вызывают резонансные явления:

- в лопатках генератора;
- в соединительных валах ПТГ;
- в колебаниях турбогенератора (ТГ) в магнитном поле.

В [1] показано, что жёсткость магнитного поля  $C_m$  в приближённой модели магнитного поля нелинейна и колебания ротора ТГ в магнитном поле также будут нелинейными [2].

На первой стадии исследования переходных процессов (ПП) была рассмотрена 2-х массовая модель ТГ, где цилиндры турбины были добавлены к моменту инерции ТГ.

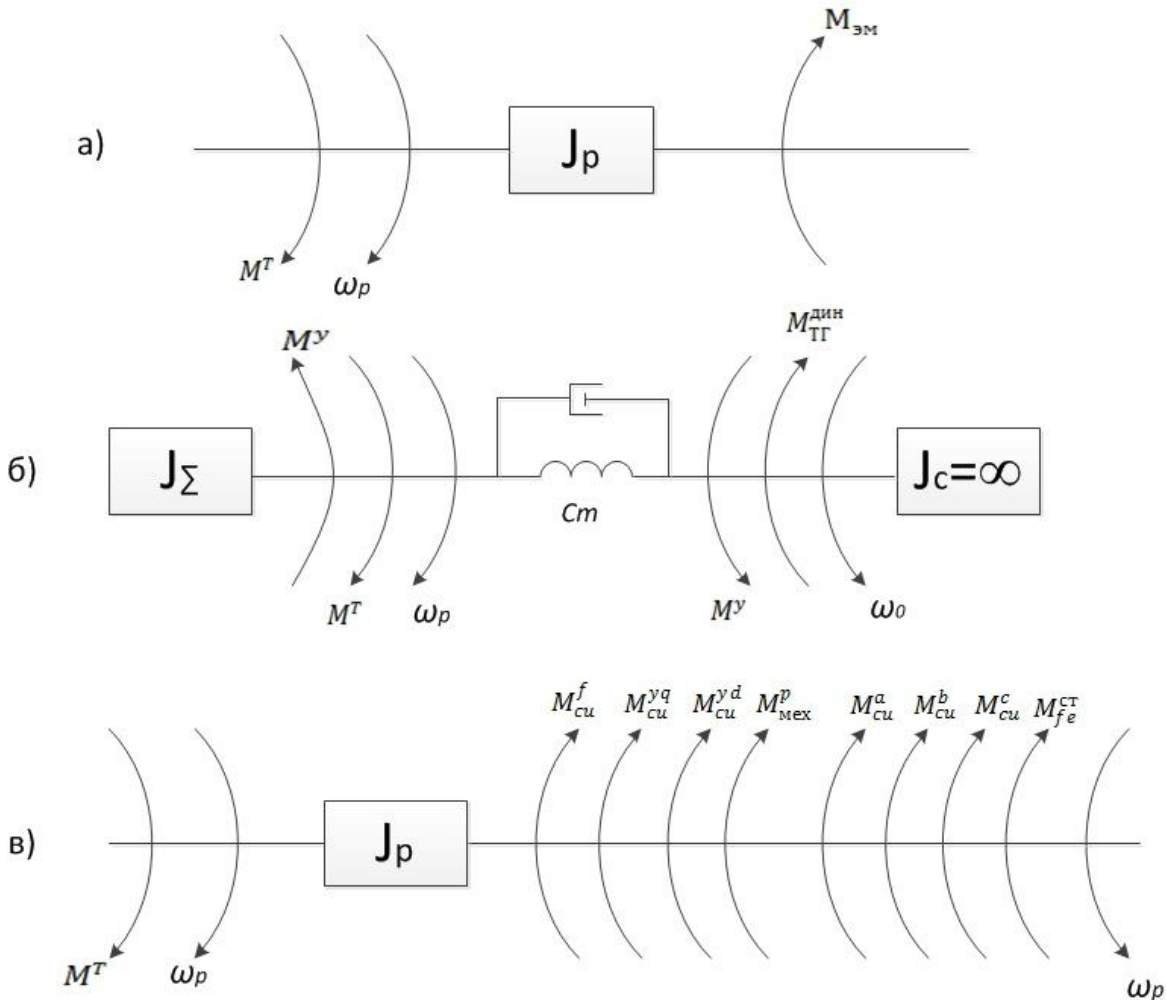
Таким образом, ставилась задача подтвердить нелинейность экспериментальных зависимостей углов нагрузки  $\theta(t)$ , скорости  $\omega_c(t)$  и токов фаз  $i(t)$  (в самом тяжёлом ПП — при трёхфазном коротком замыкании на шинах ТГ).

Решение данной задачи может быть выполнено по методикам:

- упрощённая по одномассовой модели ТГ [3];
- приближённая по двухмассовой электромеханической модели ТГ с учётом зависимостей  $M = f(\theta)$  [1, 2, 3];

- точная по одномассовой модели ТГ с учётом решений для токов: фаз статора, обмотки возбуждения, демпферной обмотки [3] а также потерь в стали статора и механических потерь [4].

На рис. 1 представлены соответственно три модели ТГ для расчёта ПП:



**Рис. 1.** Электромеханические модели турбогенератора:  
 а) упрощённая — одномассовая, б) приближенная — двухмассовая,  
 в) точная одномассовая с учётом упругости магнитного поля

Где  $M_{эм}$  — получаемый из расчёта по методике [2]:

$$M_{эм} = M'_{\psi_3} + M''_{\psi_3} + M'''_{\psi_3},$$

$M'_{\psi_3}$  — знакопеременный момент;  $M''_{\psi_3}$  — асинхронный момент статора;  $M'''_{\psi_3}$  — асинхронный момент ротора;  $M_{дин}$  — динамический момент  $M_{дин}^{дин} = f(\theta)$ ;  $\theta$  — угол нагрузки;  $M^y$  — упругий момент [1];  $M^T$  — момент турбины;  $J_{\Sigma}$  — суммарный момент упругости ПТГ;  $\omega_2 = \omega_p$  и  $\omega_1 = \omega_0$  — скорость ротора и поля статора;  $M_{CU}^{ст}$  — момент от потерь в меди фазах статора.

$$M_{CU}^{ст} = \frac{\Delta P_{cu}^a + \Delta P_{cu}^b + \Delta P_{cu}^c}{\omega_1},$$

где  $\Delta P_{cu}^a, \Delta P_{cu}^b, \Delta P_{cu}^c$  — потери меди в фазах статора;  $M_{Fe}^{ст}$  — момент от потерь в железе фазах статора [3];  $M_{Мех}^P$  — момент от механических потерь в роторе.

$$M_{Мех}^P = \frac{\Delta P_{Мех}^P}{\omega_1},$$

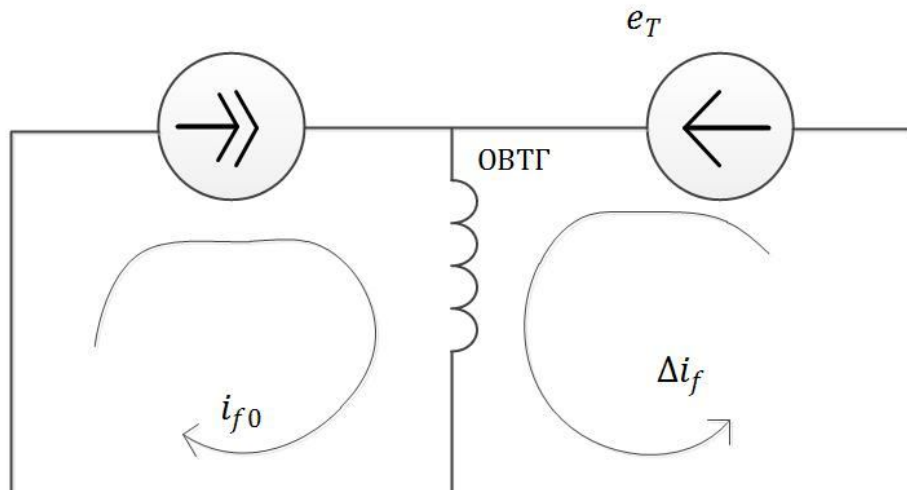
где  $\Delta P_{Мех}^P$  — механические потери ротора [3];  $M_{Cu}^P$  — момент потерь в меди ротора.

$$M_{Cu}^P = \frac{\Delta P_{cu}^f + \Delta P_{cu}^{yd} + \Delta P_{cu}^{yq}}{\omega_1},$$

где  $\Delta P_{cu}^f$  — потери в меди в обмотке возбуждения;  $\Delta P_{cu}^{yd}$  и  $\Delta P_{cu}^{yq}$  — потери в меди в обмотке в успокоительных обмотках по продольной и поперечной осям

Расчёт переходных процессов в турбогенераторе может быть выполнен по приближенной методике [1,2] численными методами например при помощи пакета проведённой в Matlab&Simulink.

Вычисление выше названных моментов не представляет особой трудности за исключением потерь в обмотке возбуждения (ОВ) ТГ. На рис. 2 представлены эквивалентная схема замещения ОВ. Ток возбуждения  $i_{f0}$  представлен в виде источника тока, а всплеск тока возбуждения  $\Delta i_f$  создаётся трансформаторной ЭДС при коротком замыкании (к.з.) на шинах ТГ:



**Рис. 2.** Эквивалентная схема замещения обмотки возбуждения

Тогда суммарные потери при к. з. можно определить:

$$\Delta P_{cu}^{f\Sigma} = (i_{f0} + \Delta i_f)^2 * r_f.$$

Причём за счёт энергии ПТГ потери определяются как

$$\Delta P_{cu}^f = [(i_{f0} + \Delta i_f)^2 - r_{f0}^2] r_f,$$

где  $r_f$  — сопротивление обмотки возбуждения.

По данным уравнениям (для точной методики) была также разработана структурная схема, фрагмент которой показан на рис. 3

В явном виде нелинейность типа  $M^{\text{дин}} = f(\theta)$  [3] не показана, но эта нелинейность содержится в трёх множителях  $\sin \theta$ ,  $\cos \theta$  и  $\cos(\gamma - \theta)$  в выражениях для токов  $i_i$ , и следовательно она будет и в выражениях для моментов  $M = f(i_i)$

Например [3]:

$$i_a = \left\{ \frac{E_0}{X_d} + U \cos \theta \left[ \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \right\} \cos(\tau + \gamma_0) - U \sin \theta \left[ \left( \frac{1}{X''_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_q}} \right] \sin(\tau + \gamma_0) + \frac{U}{2} (\cos \gamma_0 - \theta) \left[ \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \right] e^{-\frac{t}{T_a}}$$

В выражении тока фазы А выделены три компонента, содержащие нелинейность.

В отличие от уравнения  $i_a$  в [3], угол нагрузки  $\theta$  рассматриваемой структурной схемы задается не как постоянная, а как переменная величина

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta.$$

Это сделано в соответствии с экспериментальными данными по 3ф к. з. [5], из которых следует, что угол  $\theta$  переменная величина даже на малом отрезке времени  $t \leq 0,3$  равному установке по защите ТГ противоаварийной защиты [ПАЗ].

Топология структурной схемы включает также возможность приложения возмущаемой по многим входам, в том числе и в явном виде переменной времени (модельного времени  $t$ ).

Одновременно можно контролировать все параметры режимов важных для эксплуатации. Получить решения по трём методикам можно будет:

- оценить точность решения по упрощённой и приближённой методикам;
- перейти к следующим стадиям расчёта ПП с учётом упругости валов ПТГ;
- получить реальные значения параметров возмущающих моментов, необходимых для оценки усталостного состояния валов ПТГ при наличии крутильных колебаний;

- определить степень опасности возмущений при изменении параметров сети вплоть до короткого замыкания.

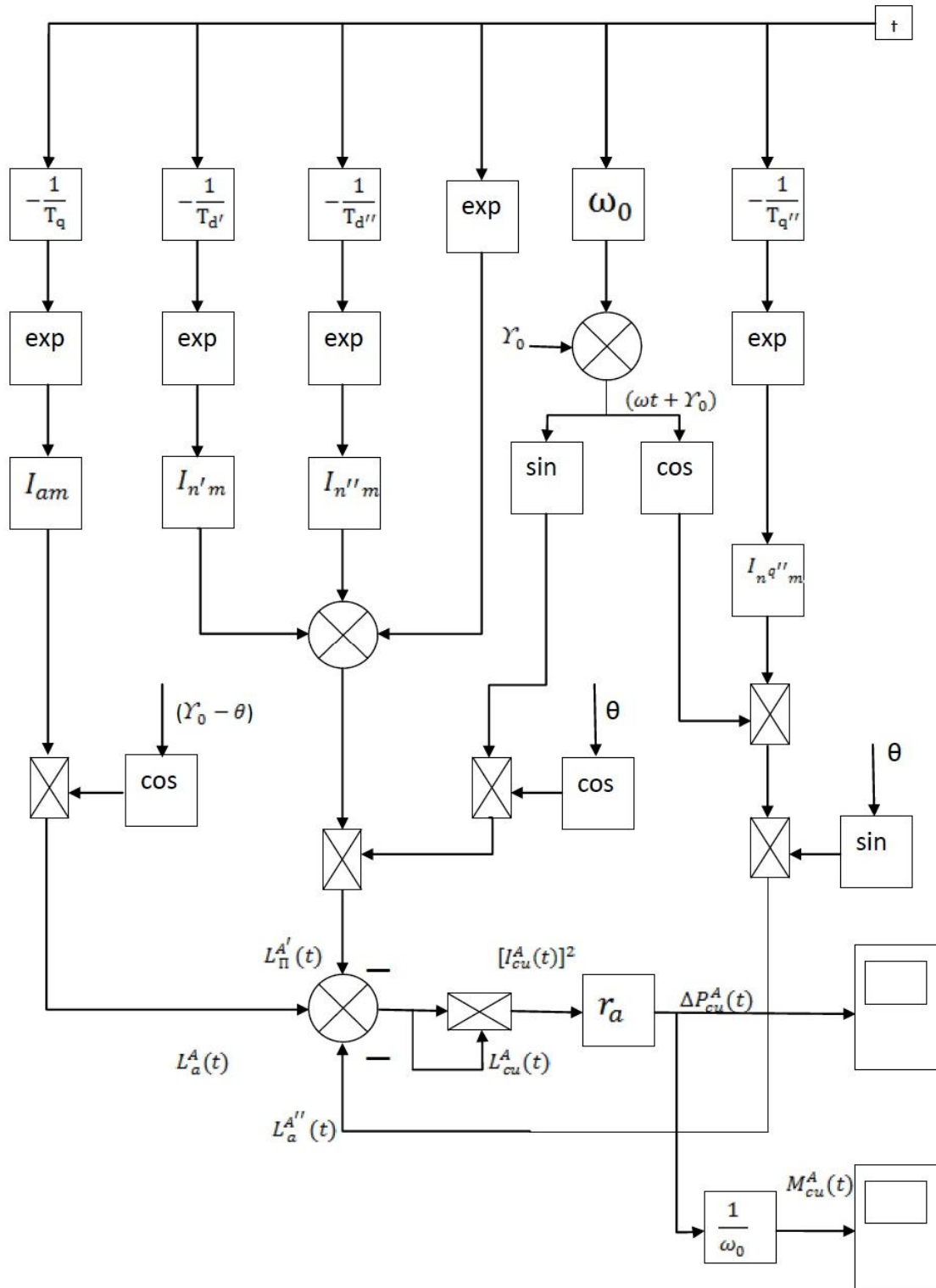


Рис. 3. Структурная схема. Определение момента, создаваемого фазой А

**Выводы.**

1. Выполнен анализ динамических моментов, действующих на отдельные участки валопровода паротурбогенератора.

2. Разработаны методика и алгоритм расчёта нелинейных переходных процессов паротурбогенератора с учётом упругих связей магнитного поля при помощи пакета Matlab&Simulink.

3. Определены план расчёта ПП и контроля параметров режима ПТГ для следующих стадий теоретических исследований по повышению качества надёжности и безопасности работы турбоагрегата в сети.

#### Литература

1. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: «Высшая школа», 1989. С. 312.
2. Баллас К. А. и др. О колебательности в модели паротурбогенератора с учётом упругости магнитного поля. Вестник Псковского государственного университета. 20.1.2012. С. 230–239.
3. Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронных машин. ГЭИ 1962. С. 312.
4. Постников И. М. Проектирование электрических машин. ГИТЛ УССР Киев. 1960. С. 910.
5. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Изд. «Энергия», 1973. С. 648.

#### Об авторах

**Егоров Владимир Егорович** — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

E-mail: egorov\_v\_e@mail.ru

**Родионов Юрий Александрович** — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

E-mail: egorov\_v\_e@mail.ru

**Кодолич Денис Алексеевич** — аспирант кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

E-mail: razelim@list.ru

*V. E. Egorov, Y. A. Radionov, D. A. Kodolich*

### THE DEVELOPMENT THE STRUCTURAL SCHEMES FOR THE CALCULATION TRANSIENT PROCESSES STEAM TURBINE GENERATORS

*Technical safety of the main components of power determines the safety of the power plant. The most dangerous component is the steam turbine generator. Experience has shown that accidents steam turbine lead to total destruction machine room and deaths. Accident at steam turbine can be either due to denial of emergency protection, so because of fatigue failures steam turbine generator. Research of the dynamic components of the subject of this work.*

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