

**Заболотный И.П., Гришанов С.А.**

**Донецкий национальный технический университет**

**Введение.** Анализ развития систем управления энергетическими предприятиями на современном этапе развития энергетики позволяет выявить тенденцию децентрализации управления, участия субъектов энергетического рынка в управлении режимами. В новых условиях обеспечение надежности невозможно без анализа динамически складывающихся ситуаций.

Как известно, наиболее сложным элементом электрической системы, определяющим ее поведение в переходных режимах, является синхронный генератор.

Обоснование минимальной по сложности математической модели турбогенератора рассматривалось в ряде работ зарубежных и отечественных ученых. Тем, не менее, в ряде работ и в последние время, например [1], делается вывод о том, что из-за трудности описания физических процессов в роторе генератора целесообразно учитывать по одному демпферному контуру. Учитывая также то, что в новых условиях анализ настройки устройств противоаварийной автоматики, экспресс оценка аварийных режимов, обоснование мероприятий по ликвидации аварий и технологических нарушений в электрической части энергопредприятий и энергообъединений (например, связанных с нарушением режима при срабатывании стопорных клапанов турбин, при неполной посадке клапанов, при отделении электростанций от энергосистем), чрезвычайно актуальны и связаны с моделированием аномальных режимов и турбогенераторов. В статье анализируется влияние электромагнитных параметров на протекание переходных процессов в турбогенераторах.

**Цель работы.** Целью работы является сопоставительный анализ расчетов асинхронного режима генератора на основе широко используемых в программном обеспечении математических моделей турбогенераторов и сопоставление расчетов с экспериментальными данными.

Так как наибольшее число параметров, включая скольжение ротора и перемещение поршня сервомотора, полученных в результате экспериментальных исследований опубликовано для турбогенераторов типа ТВВ-200-2, ТВВ-320-2, то и моделирование выполнялось применительно к этим генераторам.

### Результаты исследований.

В статье приведены результаты расчетов по следующим моделям:

- уравнения Парка-Горева с использованием многоконтурных схем замещения, синтезированных по экспериментальным частотным характеристикам (для ТВВ-200-2 в [2]; для ТВВ-320-2:  $x_{\sigma} = 0,15$ ;  $r = 0,00106$ ;  $x_{ad} = 1,55$ ;  $x_{aq} = 1,38$ ;  $r_1 = 0,00109$ ;  $x_{\sigma 1} = 0,12$ ;

$x_{\sigma 1d} = 0,394$ ;  $r_{1d} = 0,0065$ ;  $x_{\sigma 2d} = 0,36$ ;  $r_{2d} = 0,0228$ ;  $x_{\sigma 3d} = 0,154$ ;  $r_{3d} = 0,037$ ;  $x_{\sigma 1q} = 4,05$ ;  $r_{1q} = 0,0058$ ;  $x_{\sigma 2q} = 1,32$ ;  $r_{2q} = 0,015$ ;  $x_{\sigma 3q} = 0,68$ ;  $r_{3q} = 0,041$ ;  $x_{\sigma 4q} = 0,59$ ;  $r_{4q} = 0,141$ ;  $x_{\sigma 5q} = 0,33$ ;  $r_{5q} = 0,29$ );

- уравнения Парка-Горева с использованием схемы замещения с одним контуром, параметры которого получены по данным завода «Электросила» [2];

- уравнения Парка-Горева с использованием схемы замещения с одним контуром, параметры которого получены по методике Постникова [2];

- уравнения движения ротора с использованием выражений для расчета асинхронного момента [3];

- уравнения Парка-Горева с использованием схемы замещения с одним контуром, параметры которого зависят от скольжения [4] и определяются по выражениям:

$$r_{kd} = r_{kq} = \frac{6(wK_W)^2 l}{P_K \tau} \sqrt{\frac{\mu \rho \omega_1 s}{2}},$$

$$X_{kd} = X_{kq} = \frac{6(wK_W)^2 l}{P_K \tau} \sqrt{\frac{\mu \rho \omega_1}{2s}},$$

где  $w$  – число витков обмотки статора;  $K_W$  – обмоточный коэффициент;  $l$  – длина бочки ротора;  $P_K$  – число пар полюсов;  $\tau$  – полюсное деление;  $\mu$  – магнитная проницаемость стали ротора;  $\omega_1$  – синхронная круговая частота;  $\rho$  – удельное сопротивление стали ротора. При значениях скольжения близких к нулю значения параметров данного контура представляются выражениями, не зависящими от скольжения;

- уравнения Парка-Горева с использованием параметров ротора, определенных Э.Г. Кашарским [5] для цилиндрического ротора.

Уравнения, описывающие работу АРС турбоагрегата (1) дополнены ограничениями на скорость изменения положения поршня сервомотора. Система уравнений дополнена также уравнениями, описывающими работу технологических защит блока ТЭС, в частности закрытия стопорных клапанов при превышении скольжения величины свыше 10 %.

Для приближенного учета насыщения машины в программе реализованы соотношения [6] при представлении характеристики холостого хода выражениями  $i_{f0} = c_1 e_{\delta}$ ,  $\Delta i_f = c_2 e_{\delta}^n$ .

Напряжение на кольцах ротора в асинхронном режиме при разомкнутой обмотке возбуждения или для интервала времени при провороте ротора, когда тиристоры системы возбуждения заперты, определяется по выражению:  $U_f = s \cdot e_{\delta}$ .

$$\begin{aligned}
\frac{d\mu}{dt} &= \frac{1}{T_S} \left( \mu_0 - \frac{S}{\sigma} - \mu + K_{HKH} (M_T - K\rho_{III}) \right), \\
\frac{d\rho}{dt} &= \frac{1}{T_{II}} (\mu - \rho), \\
\frac{d\rho_{III}}{dt} &= \frac{1}{T_{III}} (\rho - \rho_{III}), \\
M_T &= K_{II} * \rho + (1 - K_{II}) \rho_{III}, \\
-a_{MIN} &\leq \frac{S}{\sigma} \leq a_{MAX}, \\
\mu_{MIN} &\leq \mu \leq \mu_{MAX}, \\
\left( \frac{d\mu}{dt} \right)_{MIN} &\leq \frac{d\mu}{dt} \leq \left( \frac{d\mu}{dt} \right)_{MAX},
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $\mu$  - перемещение эквивалентного регулирующего клапана (поршня сервомотора)  $\mu_{MIN}$ ,  $\mu_{MAX}$  – предельные значения перемещения поршня сервомотора (0, 1 в о.е.);  $\mu_0$  – положение, отвечающее установившемуся режиму;  $a_{MIN}$ ,  $a_{MAX}$  – открытие окон золотника (0, 1 в о.е.);  $\rho$  - давление пара за регулирующей ступенью турбины;  $\sigma$  - статизм (неравномерность) регулирования скорости;  $\rho_{III}$  – давление пара в промежуточном перегревателе;  $T_S$  – постоянная времени эквивалентного сервомотора;  $T_{II}$  – постоянная времени парового объема за регулирующими клапанами;  $T_{III}$  – постоянная времени парового объема промежуточного пароперегревателя.

Расчеты выполнялись для различных состояний обмотки возбуждения генератора, для различной мощности турбины в исходном режиме, при учете и без учета системы регулирования скорости (АРС) турбоагрегата. Сопоставление расчетов с данными испытаний генератора в асинхронном режиме показывает, что наименьшие погрешности имеют место при использовании в расчетах многоконтурных схем замещения. С увеличением мощности турбины в исходном режиме погрешности растут.

На параметры асинхронного режима генератора при потере возбуждения насыщение сказывается незначительно. В установившемся синхронном режиме насыщение определяется величиной внутренней ЭДС, которая несколько больше величины напряжения сети за счет падения напряжения на реактивности обмотки статора. Коэффициент насыщения по продольной оси примерно равен 0,8 для условий исходного режима. В установившемся асинхронном режиме средний ток статора потребляется из сети и опережает вектор напряжения почти на  $90^0$ , т.к. большую его часть составляет намагничивающий ток. Внутренняя ЭДС, величина, которой определяет уровень насыщения, снижается по отношению к напряжению сети и уровень насыщения при асинхронном ходе невозбужденного турбогенератора снижается. Средний коэффициент насыщения по продольной оси составлял от 0,9 до 0,95.

Наименьшие отличия от результатов эксперимента имеют место для расчетов, выполненных с использованием многоконтурных схем замещения.

В качестве примера, на рис. 1-3 приведены некоторые параметры асинхронного режима и данные натурных испытаний.

Сопоставление расчетов с учетом многоконтурности ротора с вариантом расчета асинхронного режима с использованием параметров одноконтурной схемы замещения и с данными натурных испытаний (рис. 3) показывает, что не учет многоконтурности ротора приводит к значительным погрешностям в первую очередь в периоде колебаний параметров режима (период проворота вдвое превышает значения в опыте). Характерно, что наименьшие отличия наблюдаются в средних значениях параметров режима. Таким образом, использование схемы замещения с одним контуром дает относительно приемлемые результаты только для оценки средних значений параметров режима, что необходимо для некоторых практических задач.

Наиболее близкие результаты к расчетам по многоконтурным схемам замещения получены в варианте с приближенным учетом изменения параметров массива ротора в зависимости от частоты в роторе [4].

Асинхронный режим турбогенератора зависит от действия автоматической системы регулирования скорости агрегата. Для выявления влияния АРС на протекание процессов при асинхронном ходе были проведены расчеты с учетом действия АРС и без. На основании сопоставления результатов расчета можно сделать выводы, что действия системы АРС в начальный период выпадения генератора из синхронизма вызывает сравнительно быстрое снижение вращающего момента турбины примерно на 15-25 % по отношению к начальному (зависит от мощности генератора) и в дальнейшем проявляется в уменьшении экстремумов колебаний режимных параметров. В вариантах замыкания обмотки возбуждения на малое активное сопротивление наблюдается некоторое повышение среднего значения вращающегося момента турбины по сравнению с вариантами расчета, в которых ОВГ остается разомкнутой или замыкается на сопротивление самосинхронизации величиной более 5-ти кратного сопротивления ОВГ.

**Выводы.** Из проведенного анализа следует, что моделирование асинхронных режимов по уравнениям Парка-Горева с использованием схем замещения, параметры которых определены по частотным характеристикам, позволяет с наибольшей точностью предопределить как характер изменения параметров режима, так и экстремальные значения. Наибольшие отличия, в первую очередь в периоде проворота ротора генератора имеют место при расчете по уравнениям Парка-Горева с одноконтурной схемой замещения с постоянными параметрами, а также при расчетах с использованием уравнения движения ротора и выражений для расчета асинхронного момента по [3].

Минимальное число контуров в многоконтурных схемах замещения составляет два по оси d и два по оси q, что отмечается в ряде зарубежных и отечественных работ.

АРС турбоагрегата упрощенно может быть учтено путем снижения мощности турбины в исходном режиме на 10-15 %.

Повышение достоверности расчетов по уравнениям Парка-Горева с использованием многоконтурных схем замещения связано с учетом насыщения

путей магнитных потоков рассеяния и уточнением описания системы АРС агрегата.

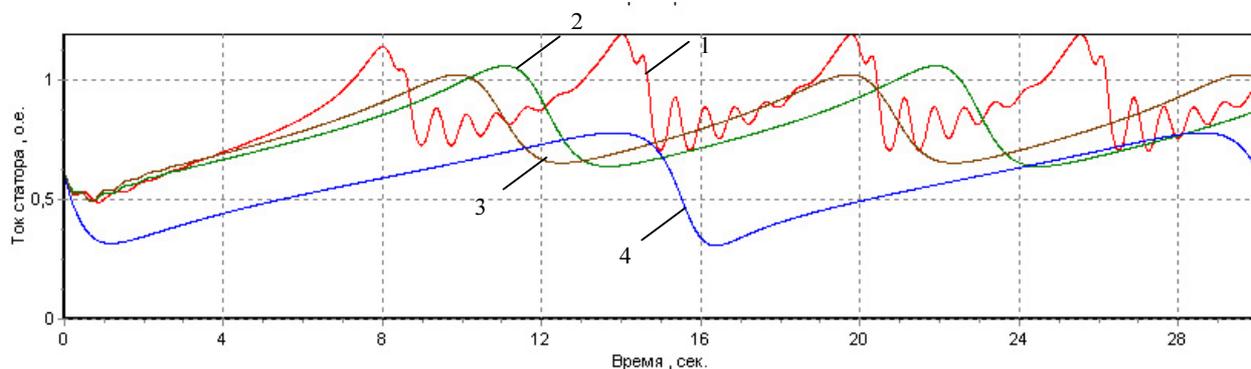


Рисунок 2 Асинхронный режим турбогенератора ТВВ-200-2 при короткозамкнутой ОВГ и работе АРС, мощность в исходном режиме  $P = 0,6 * P_{ном} = 120$  МВт:

- 1 – полные уравнения Парка-Горева (многоконтурная схема);
- 2 – полные уравнения Парка-Горева (одноконтурная схема по данным завода «Электросила»);
- 3 – полные уравнения Парка-Горева (одноконтурная схема по данным Постникова);
- 4 – уравнение движения с расчетом асинхронной мощности по [3].

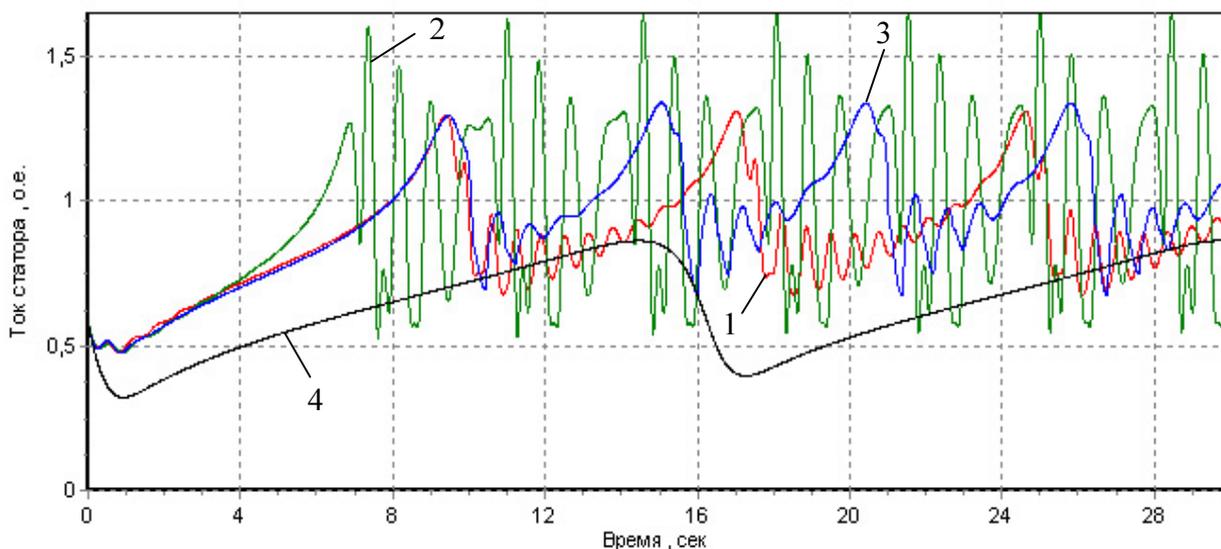


Рисунок 3 Асинхронный режим турбогенератора ТВВ-320-2 при короткозамкнутой ОВГ и работе АРС, мощность в исходном режиме  $P = 0,62 * P_{ном} = 185$  МВт

- 1 – полные уравнения Парка-Горева (многоконтурная схема);
- 2 – полные уравнения Парка-Горева (многоконтурная схема по данным Кашарского);
- 3 – полные уравнения Парка-Горева (одноконтурная схема при зависимости сопротивлений контура от скольжения);
- 4 – модель с использованием формулы Веникова [3] для расчета асинхронной мощности.

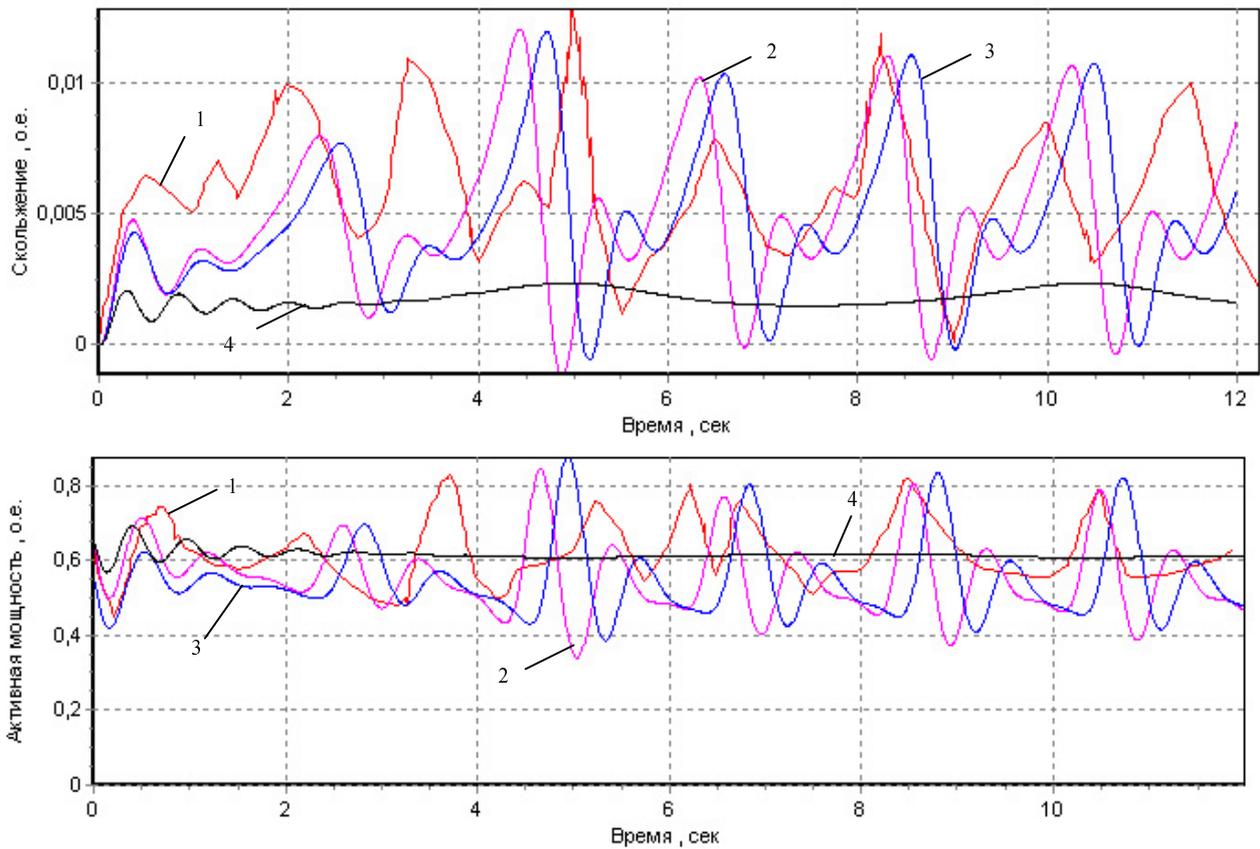


Рисунок 3 Асинхронный режим турбогенератора ТВВ-200-2 при ОВГ замкнутой на сопротивление  $R_{cc}=3,5R_f$  и мощность в исходном режиме  $P = 152$  МВт:

- 1 – опытные данные;
- 2 – полные уравнения Парка-Горева (многоконтурная схема), учтена АРС;
- 3 – полные уравнения Парка-Горева (многоконтурная схема), АРС не учтена, момент турбины в исходном режиме уменьшен на 15%;
- 4 – полные уравнения Парка-Горева (одноконтурная схема по данным Постникова и завода «Электросила»), учтена АРС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коновал В.С. Динамічна модель комплексу парадника диспетчера електроенергетичної системи. Автореф.дис... канд.техн.наук / Львівська політехніка. Л.: 1998. - 17 с.
2. Сидельников В.А. Влияние выбора параметров массивного ротора на переходные процессы электрических машин переменного тока. – В кн. Исследование электромагнитных полей, параметров и потерь в мощных электрических машинах. М.-Л.: Наука, 1966. - С. 147-156.

3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высш. шк., 1985. - 536 с.
4. Постников И.М. Проектирование электрических машин. К.: Гостехиздат, 1960
5. Кашарский Э.Г. Специальные вопросы расчета и исследования синхронных машин с массивным ротором. – М.-Л.: Наука, 1965. - 104 с.
6. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.-Л.: АН СССР, 1962. – 624 с.