УДК 621.313

Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов

КОСВЕННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

В мировой практике основным видом электрической машины, используемой для выработки электрической энергии на тепловых, атомных и гидравлических электростанциях, а также на передвижных и транспортных установках (тепловозы, самолёты и д.р.) являются синхронные генераторы, на долю которых приходится более 90% производимой сегодня электроэнергии [1].

Параметры генераторов зависят от типа электростанции и используемого привода.

Например, мощные синхронные генераторы, работающие на гидроэлектростанциях, характеризуются низкими номинальными частотами вращения, а следовательно увеличенными габаритами, массами вращающихся частей и повышенным вращающим моментом. Элементы и узлы таких электрических машин, как правило, выполняются на заводе-изготовителе, а сборка агрегатов осуществляется непосредственно на электростанции.

Синхронные генераторы, используемые на гидроэлектростанциях, обычно имеют вертикальное исполнение, и в зависимости от расположения подпятника могут быть зонтичного или подвесного типов.

Синхронные генераторы и гидротурбины, работающие как на крупных так и на маломощных гидроэлектростанциях, подвергаются большому количеству внешних воздействий в виде разного рода механических и электрических нагрузок.

Электрические нагрузки формируются токами, протекающими по обмоткам статора и в роторной цепи, а также коммутационными и иными перенапряжениями в цепях статора и ротора.

Механические нагрузки возникают при передаче рабочего момента от вала гидротурбины на ротор синхронного генератора, от веса вращающихся частей, воспринимаемого опорными подшипниками (подпятниками) агрегата, от других осевых усилий, в том числе нагрузки от гидроударов, от дополнительных усилий, вызываемых вибрационными и иными явлениями (кавитация).

Оценивая существующие способы защиты гидроагрегатов можно отметить, что контроль функционирования электрической части осуществляется в достаточно полном объёме с замером электрических параметров и контролем всех возможных аварийных ситуаций.

В то же время контроль и защита механической части гидроагрегата ограничивается набором технологических защит путём измерения следующих параметров: перегрев сегментов подпятника, направляющих подшипников генератора и гидротурбинного подшипника; аварийное снижение давления и снижение уровня масла в маслонапорном устройстве.

К технологическим относятся также двухступенчатая защита от разгона агрегата и вибрационная защита основных узлов гидроагрегата. Наиболее ответственным и уязвимым узлом гидроагрегата является опорный подшипник (подпятник), на который передаются все усилия от веса вращающихся частей гидроагрегата.

В сравнении с набором возможных причин, приводящих к авариям механической части, защиту гидроагрегата стандартными методами следует признать недостаточной.

В этой связи, учитывая тяжесть возможных последствий аварийных ситуаций на электротехнических комплексах, имеющих в своём составе гидротурбину и синхронный генератор, работающий параллельно с сетью, разработка дополнительных средств автоматической защиты от недопустимых режимов является актуальной задачей.

Известно, что для контроля и защиты от аварийных режимов механической части электротехнического комплекса, имеющего в своем составе электрическую машину, можно использовать косвенные методы, основанные на измерении электрических параметров рассматриваемой электротехнической системы [2, 3].

Разработка подобных схем защитыможет быть основана на предварительной оценке изменения контролируемых электрических и технологических параметров в различных аварийных режимах.

По причине невозможности воспроизведения аварийных ситуаций на реальном объекте, для получения таких оценок наиболее приемлемым средством может служить математическая модель электротехнического комплекса, имеющего в своем составе гидравлическую турбину малого расхода и синхронный генератор, работающий параллельно с сетью.

Получение такой модели является весьма сложной задачей.

Поэтому эффективным может быть использование мощных чисто математических и объектно-ориентированных пакетов программ таких например как, математический пакет Mathematica, MatLab- интерактивная система для выполнения инженерных и научных расчетов, MathCad - среда для выполнения на компьютере разнообразных математических и технических расчетов, Model Vision Studium- компьютерная лаборатория для моделирования и исследования сложных динамических систем, Work Bench – пакет разработки

электрических схем и других, позволяющих автоматизировать процессы синтеза и анализа изучаемых объектов» [4].

Математическое описание синхронного генератора с целью разработки алгоритма построения структуры рассматриваемой системы и расчета её параметров, выполнено по известным уравнениям [5], [6].

Взаимные индуктивности M_{af}, M_{bf}, M_{cf} между обмоткой возбуждения и фазными обмотками статора определяются системой уравнении:

$$M_{af} = M_{afd}cos\gamma;$$
$$M_{bf} = M_{afd}\cos(\gamma - \frac{2\pi}{3});$$
$$M_{cf} = M_{afd}\cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}), \quad (1)$$

где γ – угол между магнитной осью фазы статора и продольной осью ротора $\gamma = \omega_1 t$;

t – произвольный момент времени.

Амплитуды и действующие значения ЭДС фаз обмоток статора определяются выражениями:

$$E_{ma} = \omega_1 M_{af} i_f;\ E_a = \frac{E_{mc}}{\sqrt{2}};$$
$$E_{mb} = \omega_1 M_{bf} i_f;\ E_b = \frac{E_{mb}}{\sqrt{2}};$$
$$E_{mc} = \omega_1 M_{cf} i_f;\ E_c = \frac{E_{mc}}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где $\omega_1 = 2\pi f$ – угловая скорость вращения ротора;

i_f – ток возбуждения.

Взаимная индуктивность M_{afd} обмотки возбуждения с фазой обмотки статора определяется по выражению:

$$M_{afd} = \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \frac{\omega_f k_f \omega_1 k_{об}}{\rho}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

τ – полюсное деление;

l_δ – расчетная активная длина машины;

ω_f – число витков обмотки возбуждения;

k_f – обмоточный коэффициент обмотки возбуждения;

ω_1 – число последовательных витков обмотки статора;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора;

k_δ – коэффициент зазора;

$k_{\mu d}$ – коэффициент насыщения магнитной цепи по продольной оси;

δ – величина воздушного зазора между полюсным наконечником и статором;

ρ – число пар полюсов машины.

Поскольку трехфазная обмотка машины принимается полностью симметричной, то взаимная индуктивность всех фаз с обмоткой возбуждения будет одинаковой M_{afd}=M_{bfd}=M_{cfd}.

Индуктивные сопротивления реакции якоря соответственно по продольной и по поперечной осям, x_d и x_q, определяется из уравнений:

$$x_d = \frac{4m_1 f \mu_0 \tau l_\delta \omega_0^2 k_{об}^2 k_d}{\pi k_\delta \delta \rho k_{\mu d}}; \quad (4)$$

$$x_q = \frac{4m_1 f \mu_0 \tau l_\delta \omega_0^2 k_{об}^2 k_q}{\pi k_\delta \delta \rho k_{\mu q}}, \quad (5)$$

где k_d, k_q – коэффициенты реакции якоря соответственно по продольной и поперечной осям.

Взаимные индуктивности между обмотками фаз статора определяется системой уравнений:

$$M_{ab} = m_0 + l_2 cos2(\gamma - \frac{2\pi}{3});$$
$$M_{ac} = m_0 + l_2 cos2(\gamma + \frac{2\pi}{3}); \quad (6)$$
$$M_{bc} = m_0 + l_2 cos2\gamma,$$

где $l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q)$ – минимальная величина амплитуды индуктивности, определяемой по уравнениям;

$L_d = \frac{x_d}{\omega_1}$ – индуктивность по продольной оси;

$L_q = \frac{x_q}{\omega_1}$ – индуктивность по поперечной оси.

Действующие значения напряжения на зажимах фаз обмоток статора синхронного генератора принимаются равными напряжению сети.

Мощность, отдаваемая в сеть синхронным генератором, вычисляется по выражению [6]:

$$P = \frac{3U_c E}{x_d} sin\theta + \frac{3U^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) sin2\theta, \quad (7)$$

где U_c – напряжения сети;

Е–ЭДС синхронного генератора;

θ – угол сдвига фаз между напряжением сети и ЭДС синхронного генератора.

Действующие значение фазных токов обмотки статора определяются по выражению [6]:

$$I_\phi = \frac{P}{3E_\phi} = \frac{Usin\theta}{x_d} + \frac{U^2\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) sin2\theta}{2E_\phi}, \quad (8)$$

Механические параметры гидроагрегата определяются из уравнений движения [7]:

$$(1 + T_э\rho)M = \beta(\omega_0 - \omega_1);$$
$$M_m - M_{эм} - \Delta M = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

где M_m – момент создаваемой гидротурбиной;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент, создаваемый током статора синхронного генератора [7].

$$M_{эм} = 3CeI\Phi, \quad (10)$$

ΔM – изменение момента, вызванное неисправностью механической части синхронного гидрогенератора;

I – фазный ток статора синхронного генератора;

Ce – конструктивный коэффициент;

Φ – магнитный поток, создаваемый током возбуждения синхронного генератора.

Алгоритмическая структура, соответствующая уравнениям (1–10) рассматриваемого электротехнического комплекса, приведена на рисунке 1.

Полученная алгоритмическая структура отличается от известных тем, что содержит две взаимосвязанные составляющие:

–математическая модель входящей в состав электротехнического комплекса электрической машины (явнополюсного синхронного генератора);

– математическая модель механической части комплекса, представленная в виде двухмассовой системы.

Связующими параметрами между двумя указанными составляющими модели являются фазданных постоянных величин; 6- блок измерения исследуемых параметров; 7- блок задания математического выражения [блоки моделирование величин тока, момента и угла θ];

Разработанная математическая модель позволила получить в среде MATLAB переходные процессы электрических и механических параметров агрегата, вызванные возникновением неисправности механической части (разрушение опорного

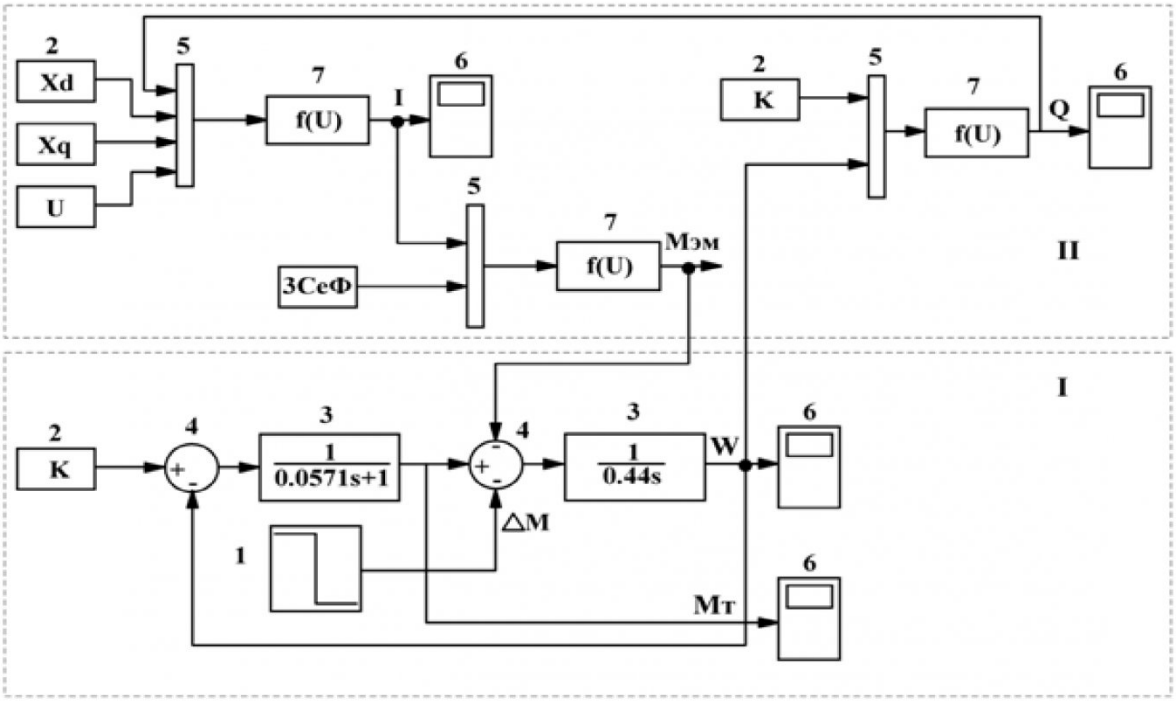


Рисунок 1. Алгоритмическая структурная схема агрегата, имеющего в своём составе гидротурбину и синхронный генератор: (механическая часть –I); (электрическая часть –II)

ныйток обмотки статора и момент создаваемый гидротурбиной.

Постоянными величинами при моделировании являются частота вращения ротора гидрогенератора (ω_1).

Входной переменной является изменение момента, вызванное неисправностью механической части синхронного гидрогенератора (ΔM).

Выходными исследуемыми параметрами модели являются электрические параметры генератора: фазный ток (I_ϕ) и угол сдвига фаз между напряжением сети и ЭДС синхронного генератора (θ). Исследуемым параметром также является величина отклонения момента гидротурбины в аварийных режимах (M_m).

На приведенной схеме приняты следующие обозначения: 1- блок задания с выдержкой времени; 2- блок задания постоянной величины; 3-блок перехода с одной системы координат в другую [выходной сигнал блока моделирует момент турбины]; 4- блок суммирования; 5- блок ввода за-

подшипника). В численных экспериментах использовались данные генератора малой мощности со следующими параметрами: тип СГ-15, номинальная полная мощность 17 кВА, номинальное напряжение 0,4 кВ, номинальный ток 25 А. В ходе эксперимента моделировалась аварийная ситуация с заклиниванием и разрушением опорного подшипника ротора гидравлической турбины. В качестве эталонного принято отклонение момента на валу турбины, вызванное аварийным событием, не выше 15% от номинального, что является вполне приемлемым для моделируемой турбины с диаметром колеса 0,42 м. Графики тока статора синхронного генератора, электромагнитного момента создаваемого током статора синхронного генератора, угол θ синхронного генератора, при неизменном открытии задвижки напорного водовода, показаны на рис.2 и 3.

Характеристики переходных процессов, приведенные на рисунках 2 и 3 показывают, что уменьшение момента гидротурбины приводит к уменьшению угла θ синхронного генератора и

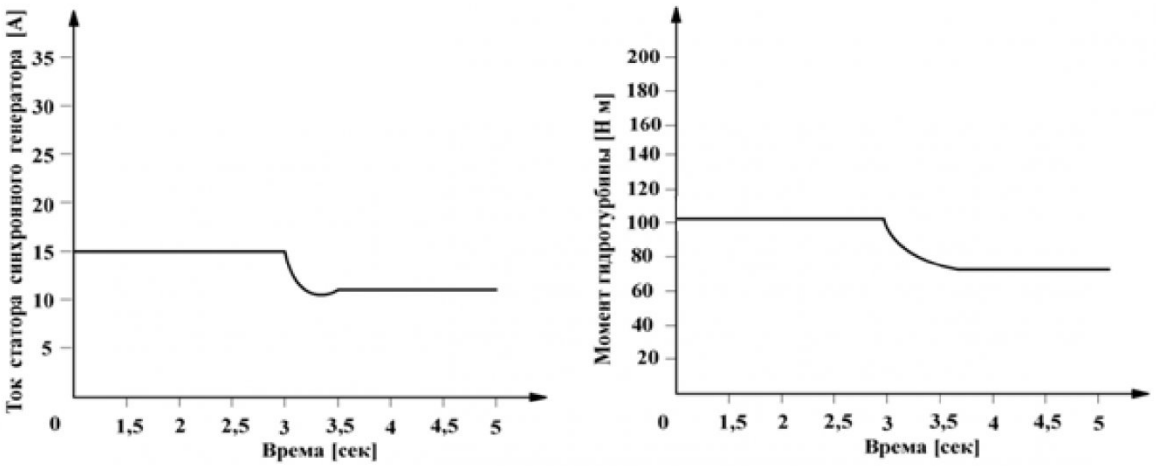
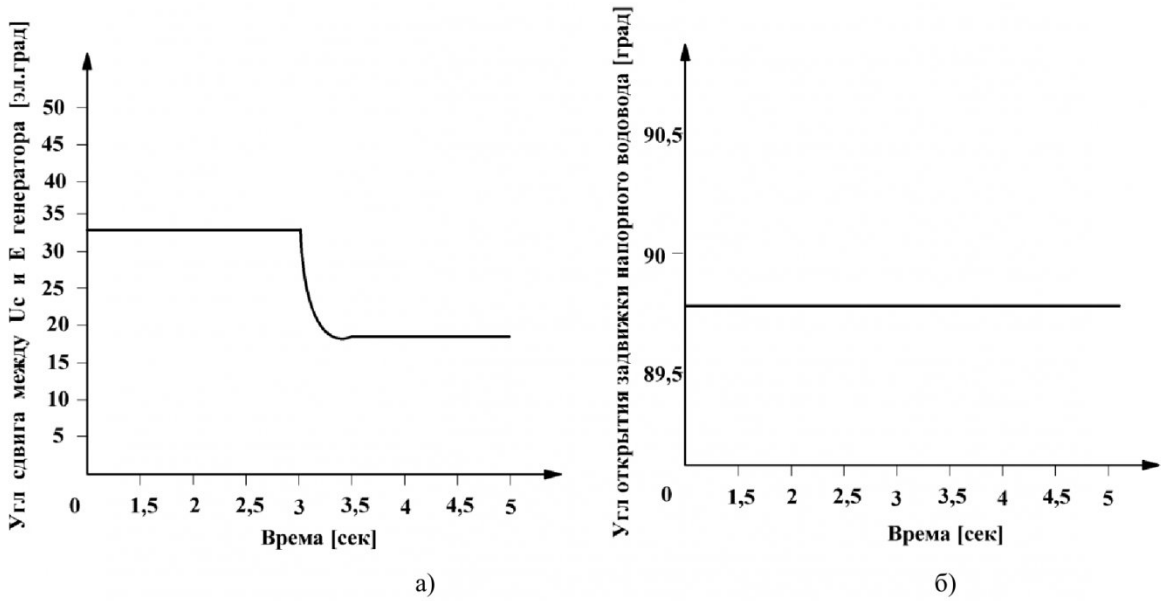


Рисунок 2. Переходной процесс изменения тока статора синхронного генератора (а) и момента гидротурбины (б) при механическом повреждении опорного подшипника

а) б)



а) б)

Рисунок 3. Переходной процесс изменения угла θ синхронного генератора (а) и величина угла открытия задвижки напорного водовода (б)

снижению тока статора.

Поскольку синхронный гидрогенератор работает параллельно с сетью, в момент механической поломки синхронная скорость и напряжение синхронного генератора остается неизменными, и поддерживаются за счет электрических параметров сети бесконечной мощности.

Механическая поломка приводит к уменьшению момента на валу гидротурбины, что связанно с увеличением момента сопротивления, создаваемого механической неисправностью. Уменьшение момента на валу гидротурбины приводит к уменьшению угла θ синхронного генератора, исследовательно уменьшению тока статора синхронного генератора.

Из полученных графиков переходных процессов при работе синхронного генератора параллельно с сетью следует:

- моменты времени начала переходных процессов контролируемых значений тока, электромагнитного момента и изменения угла θ совпадают с временем возникновения аварийной ситуации.

- изменение электрических параметров при неизменном угле открывания задвижки означает наличие аварийной ситуации в рассматриваемом электротехническом комплексе.

- переходные процессы носят апериодический характер.

- время протекания переходных процессов и

постоянная времени переходного процесса в цепи тока статора составляют соответственно 0,8 с. и 0,2 с.

- отклонение от номинального значения тока статора синхронного генератора при аварийном режиме, при неизменном угле открытия задвижки составляет около 45%, что является достаточным для его фиксации и выработки аварийного отключающего сигнала.

- быстродействие срабатывания защиты при значении постоянной времени (0,2с) не будет превышать 0,3…0,4 секунды, что вполне достаточно для предотвращения развития аварийной ситуации на ранней стадии.

Таким образом, полученные в ходе моделирования оценки параметров синхронного генератора, работающего параллельно с сетью и сопряженного с гидравлической турбиной, позволяют установить наличие устойчивой связи между происходящими аварийными событиями механической части и электрическими параметрами агрегата.

В свою очередь наличие такой связи даёт возможность использовать отклонения электрических параметров в аварийных режимах для косвенной оценки и защиты гидроагрегата от механических повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История электротехники / под ред. И.А. Глебова – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 524 с.: ил.

2. *Пугачев Е.В. Кипервассер М.В. Гуламов Ш.Р.* Динамические характеристики системы гидротурбина – синхронный генератор работающей на автономную нагрузку в аварийных режимах. / Вестник Таджикского национального университета, 2014, № 1/2 (130).с. 117-124.

3. *Пугачев Э.В. Кипервассер М.В. Аниканов Д.С*. Контроль работоспособности конвейерного транспорта посредством регистрации параметров электропривода. / *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2013, №3. с. 101-105.

4.*Ещин Е.К.* Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. -Кемерово: Кузбасский гос.техн.ун-т, 2003. -247 с.

5. *Осин И.Л. Шакарян Ю.Г.* Электрические машины: Синхронные машины: Учебное пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.: ил.

6. *Вольдек А.И. Попов В.В.* Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008 – 349 с.: ил.

7. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. Учебник для вузов – М.:РАСХН. 2003. – 320 с.: ил.

Авторы статьи:

Пугачев Емельян Васильевич,
доктор технических наук., профессор, зав. каф. электромеханики
(Сибирский государственный индустриальный университет) ,
тел: (3843) 74-86-37

Кипервассер Михаил Вениаминович,
кандидат технических наук, доцент, зав. каф. электротехники и электрооборудования
(Сибирский государственный индустриальный университет),
тел: (3843) 46-23-88

Гуламов Шухрат Рахматуллоевич,
аспирант кафедры электромеханики
(Сибирский государственный индустриальный университет),

Поступило в редакцию 16.03.2015