

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский Г.Ф. Плазменное воспламенение и сжигание топлива в судовых установках. – Л.: Судостроение, 1986. – 88 с.
2. Жуков М.Ф., Коротеев В.А., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1975. – 299 с.
3. Воронов А.Ю., Герасимов В.А. Электрическая дуга в канале плазматрона при случайных газодинамических возмущениях // Вологодские чтения: Матер. научно-техн. конф. – Владивосток: ДВГТУ, 2009. – С. 95.
4. Достовалов В.А. Газодинамическое управление термической плазмой. – Владивосток: ДВГТУ, 2004. – 230 с.
5. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 747 с.
7. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. – М.: МГТУ, 1993. – 492 с.
8. Катханов М.Н. Теория судовых автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1985. – 374 с.

Поступила 29.03.2011 г.

УДК 621.314:621.382:621.314.572

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КПД МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.А. Харитонов, А.Г. Гарганеев\*

Новосибирский государственный технический университет

\*Томский политехнический университет

E-mail: Kharit@ntcom.ru; garganeev@rambler.ru

*Предложена методика расчета активных потерь в элементах системы генерирования постоянного тока на базе магнитоэлектрического синхронного генератора и полупроводникового преобразователя. Особое внимание уделено анализу электрических потерь в синхронном генераторе: учитываются как искажения формы тока и напряжения синхронного генератора, так и изменение частоты вращения его вала, что позволяет повысить точность расчетов и качество проектирования отдельных элементов системы.*

### Ключевые слова:

*КПД, мехатронная система, синхронный генератор с постоянными магнитами, полупроводниковый преобразователь, переменная частота, ветроэнергетическая установка.*

### Key words:

*Efficiency, mechatron system, synchronous generator with permanent magnets, semiconductor converter, variable frequency, wind power installation.*

Разработка методики расчета КПД и расчет активных потерь в элементах систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ), в которых механическая энергия вращающегося с переменной скоростью вала синхронного генератора с постоянными магнитами (далее по тексту магнитоэлектрический генератор – МЭГ), преобразуется в электрическую энергию постоянного или переменного тока является задачей актуальной, так как такие системы находят широкое применение в возобновляемой энергетике, а также в системах электроснабжения автономных объектов, в частности летательных аппаратов. Проблеме анализа энергетических процессов в системах «синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь» посвящен ряд работ научных школ МАИ, МЭИ, ТПУ, ВНИИЭ и др. Однако, анализ таких систем с магнитоэлектрическим генератором при переменной скорости вращения вала в составе систем генерирования электрической энергии впервые проведен в научной школе профессора Г.В. Грабовецкого из Новосибирского государственного технического университета (ныне НГТУ).

Ниже рассматривается мехатронная СГЭЭ постоянного тока, в состав которой входят (рисунок):  $m$ -фазный синхронный генератор (СГ) – МЭГ, полупроводниковый преобразователь (ПП) с естественной коммутацией (ЕК), реактор  $L_f$ , моделирующий индуктивность фидера между СГ и ПП, или специально установленный [1].

Предполагается, что данная система является частью ветроэнергетической установки с переменной частотой вращения вала ветровой турбины. В СГЭЭ электрическая энергия переменного на выходе МЭГ преобразуется в электрическую энергию постоянного тока с помощью ПП с ЕК, например, на основе управляемого выпрямителя. Выпрямитель работает на противоЭДС постоянного тока  $e_c$  [1]. Подобная система может применяться самостоятельно, либо, например, являться источником напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты с инвертором напряжения.

При расчете КПД основное внимание уделяется анализу активных потерь, прежде всего в СГ, при учете несинусоидального характера тока и напряжения в сечении  $S_{Cr}$  (рисунок). Отличительными осо-

бенностями работы СГ в системе «МЭГ – ПП» являются относительно высокая и переменная частота вращения вала  $n$  и частота выходного напряжения СГ; широкий диапазон изменения величины и частоты токов и напряжений при существенно несинусоидальной их форме; необходимость отбора предельной мощности в режимах минимальных и максимальных оборотов; повышенные требования к массе, габаритам и надежности функционирования; экстремальные условия эксплуатации. Целью анализа является определение соотношений для расчета активных потерь в системе, учитывающих специфику режимов работы агрегатов системы и их взаимное влияние, а также основных тенденций изменения КПД в функции частоты вращения вала.

При анализе полагалось, что СГ имеет демпферные контуры по продольной и поперечной осям. Кроме этого были использованы следующие относительные единицы [1]:  $U_0 = E_c / \sqrt{3}$ ;  $E_c$  – величина противоЭДС;  $n_0 = n_{\min}$ ,  $n_{\min}$  – минимальная частота вращения вала СГ, при которой  $U_0 = E_{CGM}$ ;  $E_{CGM}$  – амплитуда ЭДС СГ;  $\omega_0 = \omega_{\min} = 2\pi n_{\min} / 60$ ;  $X_0 = \omega_0 [L_f + (L_d'' + L_q'') / 2] = \omega_0 (q + 1) (L_d'' + L_q'') / 2$ ;  $q = L_f (L_d'' + L_q'') / 2$ ;  $L_d''$ ,  $L_q''$  – сверхпереходные индуктивности СГ;  $I_0 = U_0 / X_0$ ;  $S_0 = I_0 U_0 = U_0^2 / X_0$ .

В общем случае потери активной мощности  $\Delta P = \Delta P / S_0$  в рассматриваемой системе содержат три составляющие:

$$\Delta P^* = \Delta P_{ПП}^* + \Delta P_{СГ}^* + \Delta P_{L_f}^*,$$

где  $\Delta P_{ПП}^*$ ,  $\Delta P_{СГ}^*$ ,  $\Delta P_{L_f}^*$  – потери в ПП, СГ и реакторе (потери на аппаратуру управления включены в  $\Delta P_{ПП}^*$ ).

КПД системы может быть определен с помощью соотношения

$$\eta = \eta_{ПП} \eta_{СГ} \eta_{L_f},$$

где  $\eta_{ПП}$ ,  $\eta_{СГ}$ ,  $\eta_{L_f}$  – КПД соответственно ПП, СГ и реактора, причем

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{ПП} &= \frac{P_n^*}{P_n^* + \Delta P_{ПП}^*}, \\ \eta_{L_f} &= \frac{P_n^* + \Delta P_{ПП}^*}{P_n^* + \Delta P_{ПП}^* + \Delta P_{L_f}^*}, \\ \eta_{СГ} &= \frac{P_n^* + \Delta P_{ПП}^* + \Delta P_{L_f}^*}{P_n^* + \Delta P_{ПП}^* + \Delta P_{L_f}^* + \Delta P_{СГ}^*}, \end{aligned} \right.$$

Здесь  $P_n^*$  – относительное значение активной мощности, потребляемой цепью с противоЭДС.

Потери активной мощности в ПП можно представить в виде

$$\Delta P_{ПП}^* = \Delta P_{ППст}^* + \Delta P_{ППдин}^* + \Delta P_{ППдоп}^*,$$

здесь  $\Delta P_{ППст}^*$ ,  $\Delta P_{ППдин}^*$ ,  $\Delta P_{ППдоп}^*$  – статические, динамические и дополнительные потери.

При определении статических потерь воспользуемся общепринятой схемой замещения вентилей [2] в виде источника напряжения  $\Delta U_v^*$  и динамиче-

ского сопротивления  $r_d^*$ , в результате чего для мостовых схем ПП получим

$$\begin{aligned} \Delta P_{ППст}^* &= 2m [I_{вер}^* \Delta U_v^* + (I_v^*)^2 r_d^*] = \\ &= 2 \frac{\Delta U_v^*}{E_c^*} P_n^* + \frac{1}{m} \left( \frac{k_i}{E_c^*} P_n^* \right)^2 r_d^*. \end{aligned}$$

При определении динамических потерь будем полагать, что параллельно каждому вентилю включена демпфирующая  $RC$ -цепочка, которая полностью снимает динамические потери с вентилей. В этом случае под динамическими потерями в вентильном преобразователе будем понимать потери в  $RC$ -цепях. С учетом вышеизложенного имеем

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{ППдин}^* &\cong 2m(n^*)^2 [1 + (k_{div}^{(1)})^2] \frac{(U_{v(1)}^*)^2}{X_c^* Q_{RC}}, \\ X_c^* &= \frac{1}{\omega C X_0}, \\ Q_{RC} &= \frac{1}{\omega_0 C (R + R_c)} = \frac{1}{\text{tg} \delta_c + \text{tg} \delta_{RC}}. \end{aligned} \right.$$

где  $R$  и  $C$  – резистор и конденсатор  $RC$ -цепи;  $k_{div}^{(1)}$  – дифференциальный коэффициент гармоник первого порядка [3] напряжения на вентиле;  $Q_{RC}$  – добротность  $RC$ -цепи;  $R_c$  – активное сопротивление конденсатора при последовательной схеме его замещения;  $U_{v(1)}$  – относительное действующее значение основной гармоники напряжения на вентиле.

Дополнительные потери в ПП  $\Delta P_{ППдоп}^*$  определяются потерями в аппаратуре управления и системе охлаждения. При принятии специальных мер в первом приближении они могут считаться постоянными и равными  $\Delta P_{ППдоп}^* \leq (0,005 \dots 0,01) P_n^*$  [2].

Потери в реакторе определяются активными потерями в меди и стали:

$$\Delta P_{L_f}^* = \Delta P_{L_fm}^* + \Delta P_{L_fст}^*.$$

При этом потери в меди вычисляются по соотношению

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{L_fm}^* &= m \frac{q}{1+q} \frac{1}{Q_{L_fm}} (I_{СГ}^*)^2 = \frac{q}{1+q} \frac{1}{Q_{L_fm}} \left( \frac{P_n^* k_i}{E_c^*} \right)^2, \\ Q_{L_fm} &= \omega \frac{L_f}{R_f} = \frac{1}{\text{tg} \delta_{L_f}}, \end{aligned} \right.$$

где  $R_f$  – активное сопротивление дросселя;  $Q_{L_fm}$  – добротность реактора по «медным» потерям;  $\text{tg} \delta_{L_f}$  – коэффициент потерь реактора;  $E_c^*$ ,  $I_{СГ}^*$  – относительные действующие значения противоЭДС и тока СГ, при выбранных относительных единицах

$k_i = m \frac{I_{СГ}^*}{I_{иср}^*}$ ;  $I_{иср}^*$  – среднее значение тока цепи с противоЭДС.

Потери в стали реактора определяются выражением

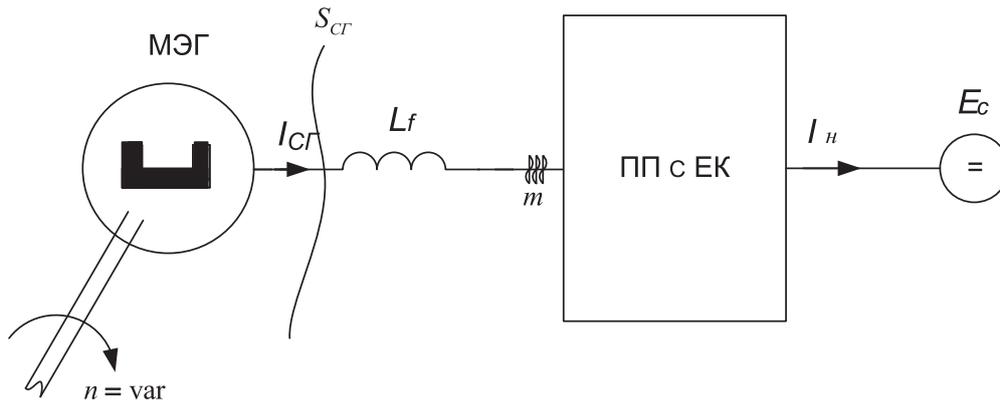


Рисунок. Структурная схема системы генерирования

$$\begin{cases} \Delta P_{L_{fct}}^* = m \frac{q}{1+q} \frac{1}{Q_{L_{fct}}} (n^*)^{1,5} \sum_{k=1} (I_{CG(k)}^*)^2 k^{1,5}, \\ Q_{L_{fct}} = \frac{1}{P_{L_{fct}}^*}, \\ P_{L_{fct}}^* = P_0 k_T \frac{(\omega_b)^{0,5}}{(2\pi \cdot 400)^{1,5}} \frac{\gamma_{ст}}{\mu \mu_0}, \end{cases}$$

где  $P_0$  – удельные потери в стали при  $f=400$  Гц и индукции 1 Тл;  $k_T$  – технологический коэффициент [4];  $\gamma_{ст}$  – удельный вес стали;  $\mu, \mu_0$  – магнитная проницаемости стали и магнитная постоянная.

Оценка потерь в стали реактора может быть произведена посредством соотношения

$$\Delta P_{L_{fct}}^* < m \frac{(U_{L_f}^*)^2}{Q_{L_{fct}}},$$

где  $U_{L_f}^*$  – действующее значение напряжения на индуктивности  $L_f$ .

Необходимо учесть, что для принятых относительных единиц при  $q \leq 1$  выполняется соотношение  $U_{L_f}^* \approx \sqrt{n^*}$ , т. е.  $\Delta P_{L_{fct}}^* \approx n^*$  [1]. С увеличением величины  $q$  действующее значение напряжения на реакторе становится пропорциональным частоте вращения, а потери в стали соответственно  $\Delta P_{L_{fct}}^* \approx (n^*)^2$ .

Обратимся к рассмотрению потерь в СГ. Полные потери активной мощности определяются соотношением [4]

$$\Delta P_{СГ}^* = \Delta P_{СГм}^* + \Delta P_{СГд}^* + \Delta P_{СГz}^* + \Delta P_{СГja}^* + \Delta P_{СГпов}^* + \Delta P_{СГпул}^* + \Delta P_{СГдоб}^* + \Delta P_{СГмех}^*,$$

где  $\Delta P_i^*$  – составляющие потерь, соответственно,  $\Delta P_{СГм}^*$  – в меди статора;  $\Delta P_{СГд}^*$  – в демпферных контурах;  $\Delta P_{СГz}^*$  – в стали зубцов;  $\Delta P_{СГja}^*$  – в стали спинки якоря;  $\Delta P_{СГпов}^*$  – поверхностные в полюсных башмаках;  $\Delta P_{СГпул}^*$  – пульсационные в зубцах статора и ротора (имеют место при наличии открытых или полузакрытых пазов для укладки стержней демпферной клетки; ввиду их отсутствия далее эта составляющая потерь не учитывается);  $\Delta P_{СГдоб}^*$  – добавочные, возникающие при нагрузке;  $\Delta P_{СГмех}^*$  – механические на трение в подшипниках и на тре-

ние вращающихся частей о воздух, плюс потери на вентилятор.

На основании проведенного анализа систем и с учетом рекомендаций, изложенных в [4] и ряде других работ, получим следующие выражения для остальных составляющих потерь в СГ:

$$\begin{cases} \Delta P_{СГм}^* + \Delta P_{СГд}^* = \\ = \frac{1}{1+q} (I_{СГ}^*)^2 \left( \frac{m}{Q_{СГм}} + \frac{k_{id}^2}{Q_{kd}} + \frac{k_{iq}^2}{Q_{kq}} \right) = \\ = \frac{1}{1+q} \left( \frac{P_H^* k_i}{E_c^*} \right)^2 \left( \frac{m}{Q_{СГм}} + \frac{k_{id}^2}{Q_{kd}} + \frac{k_{iq}^2}{Q_{kq}} \right) = \\ = \frac{1}{1+q} \left( \frac{P_H^* k_i}{E_c^*} \right)^2 \frac{1}{Q_{СГм\Sigma}}, \\ \Delta P_{СГст}^* = \Delta P_{СГz}^* + \Delta P_{СГja}^* + \Delta P_{СГпов}^* = \\ = \frac{(n^*)^{1,5}}{Q_{СГдоб}} \sum_{k=1}^{\infty} (\Psi_{\delta\alpha(k)}^*)^2 k^{1,5}, \\ \Delta P_{СГмех}^* = \frac{n^*}{Q_{СГмех1}} + \frac{Q_{СГдоб}}{Q_{СГмех2}}, \\ \Delta P_{СГдоб}^* = \frac{(n^*)^2}{Q_{СГдоб}} (I_{СГ}^*)^2 = \frac{Q_{СГдоб}}{Q_{СГдоб}} \left( \frac{k_i P_H^*}{E_c^*} \right)^2, \end{cases}$$

где  $k_{id} = I_{kd}^*/I_{СГ}^*$ ,  $k_{iq} = I_{kq}^*/I_{СГ}^*$ ,  $I_{kd}^*$ ,  $I_{kq}^*$  – относительные действующие значения приведенных токов демпферных контуров по поперечной и продольной осям;

$$Q_{СГм} = \frac{\omega_b}{2} \frac{L_d'' + L_q''}{r_{СГм}}, \quad Q_{kd} = \frac{\omega_b}{2} \frac{L_d'' + L_q''}{r_{kd}}, \\ Q_{kq} = \frac{\omega_b}{2} \frac{L_d'' + L_q''}{r_{kq}},$$

где  $r_{СГм}$ ,  $r_{kd}$ ,  $r_{kq}$  – активные сопротивления обмотки фазы статора и приведенных демпферных контуров;

$$\frac{1}{Q_{\text{СГ}\Sigma}} = \frac{m}{Q_{\text{СГ}m}} + \frac{k_{id}^2}{Q_{kd}} + \frac{k_{iq}^2}{Q_{kq}};$$

$$Q_{\text{СГ}\text{ст}} = \frac{1}{P_{\text{СГ}\text{ст}\text{min}}^*},$$

$$P_{\text{СГ}\text{ст}\text{min}}^* = P_{\Sigma} \left( \frac{1}{S w_{\text{ст}}} \right)^2 \left( \frac{1}{2\pi 400} \right)^{1.5} (\omega_5)^{0.5},$$

где  $P_{\Sigma}$  – технологическая величина, определяемая геометрией СГ и характеристиками стали статора;  $S$  и  $w_{\text{ст}}$  – площадь полюса и число витков обмотки статора;  $Q_{\text{СГ}\text{мех}1}$ ,  $Q_{\text{СГ}\text{мех}2}$ ,  $Q_{\text{СГ}\text{люб}}$  – эквивалентные добротности, определяются конструктивным исполнением генератора;  $\Psi_{\delta\alpha(k)}^*$  – относительное действующее значение  $k$ -й гармоники потокосцепления в воздушном зазоре СГ.

При расчете поверхностных потерь в роторе с учетом искажений формы поля в зазоре вместо формулы Рюденберга [5], в которой потери пропорциональны множителю

$$\sum_{k=2}^{\infty} (\Psi_{\delta\alpha(k)}^*)^2 (k \pm 1)^{1.5}$$

использован множитель вида  $\approx \sum_{k=2}^{\infty} (\Psi_{\delta\alpha(k)}^*)^2 k^{1.5}$ , что не вносит ощутимой погрешности ввиду относи-

тельно высокой степени синусоидальности потока в зазоре и при  $k > 1$ .

При анализе приведенных выше соотношений необходимо иметь в виду, что в случае сохранения постоянного реактанса в цепи тока генератора и изменении величины  $q$  значения произведения  $(1+q)Q$  остаются постоянными.

#### Выводы

Получены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать КПД и определить активные потери в элементах мехатронной системы генерирования электрической энергии, в которой механическая энергия вращающегося с переменной частотой вала синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов преобразуется в электрическую энергию постоянного тока. Методика позволяет учесть особенности работы синхронного генератора на управляемый выпрямитель при переменной частоте вращения вала генератора, что дает возможность повысить точность расчетов и качество проектирования отдельных элементов систем генерирования электрической энергии.

*Работа выполнена по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г. на тему: «Исследование, разработка и организация промышленного производства мехатронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока типа «магнитоэлектрический генератор – шестифазный нулевой выпрямитель» при переменной частоте вращения вала генератора. Ч. 1 // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 2. – С. 71–83.
2. Грабовецкий Г.В., Куклин О.Г., Харитонов С.А. Непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией для электромеханических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 320 с.
3. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1990. – 220 с.
4. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
5. Лютер Р.А. Расчет синхронных машин. – Л.: Энергия, 1979. – 272 с.

Поступила 02.04.2011 г.