

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.314: 621.382: 621.314.572

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Б. Ф. Симонов¹, С. А. Харитонов², А. В. Сапсалева²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: Simonov_BF@mail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный технический университет, E-mail: Kharitonov@corp.nstu.ru,
просп. К. Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

Анализируется возможность стабилизации напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в автономных системах электроснабжения с переменной частотой генерируемого напряжения. Способ стабилизации базируется на изменении частоты вращения вала генератора. Получены аналитические выражения для регулировочных характеристик, определены необходимые диапазоны изменения частоты вращения при заданных параметрах генератора и нагрузки. Выявлены условия симметрии регулировочной характеристики относительно изменения частоты вращения.

Синхронный генератор, постоянные магниты, переменная частота вращения, стабилизация напряжения, регулировочная характеристика

Как показано в [1–3], технологии построения систем электроснабжения на базе синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов находят широкое применение при построении автономных систем электроснабжения в горной промышленности. В частности, такие системы используются на экскаваторах, карьерных самосвалах, драгах, в локальных конвейерах, а также на участках зарядки аккумуляторов.

В автономных объектах синхронный генератор осуществляет функцию преобразования механической энергии вращающегося с переменной частотой вала в электрическую. Ранее в таких системах ставилась задача стабилизации частоты генерируемого напряжения, но в последние годы данная проблема стала неактуальной, поскольку значительная часть генерируемой электрической энергии преобразуется с помощью устройств силовой электроники, кроме того, многие нагрузки не критичны к частоте питающего напряжения (освещение, обогрев и др.). Однако остается жестким требование к стабильности величины генерируемого напряжения. Возможность использования переменной частоты в автономных системах электроснабжения закреплена рядом стандартов.

Такие системы, как правило, строятся на базе достаточно сложных безщеточных синхронных генераторов, где стабилизация напряжения осуществляется за счет регулирования с помощью полупроводникового преобразователя тока в обмотке возбуждения генератора [4, 5].

Существуют альтернативные варианты построения аналогичных по характеристикам систем генерирования электрической энергии [1–3]. В частности, представляется перспективным использование в подобных системах синхронных генераторов (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов. Данный тип СГ обладает известными преимуществами, к которым можно отнести: отсутствие вращающихся контактов, возможность применения при воздушном охлаждении, минимальные эксплуатационные расходы, возможность реализации режима электростартерного запуска, относительная простота конструкции.

Особенностью такого генератора является пропорциональная зависимость частоты ω и ЭДС холостого хода E_0 от частоты вращения вала Ω , при этом амплитуда выходного напряжения СГ зависит как от ω , так и от величины и характера тока I нагрузки. Данные свойства генератора позволяют предложить для систем с нестабильной частотой выходного напряжения способ стабилизации напряжения путем изменения частоты вращения вала генератора.

Структурная схема такой системы приведена на рис. 1, где ПД — первичный двигатель с регулируемой частотой вращения выходного вала Ω , СУО — система управления оборотами ПД, обеспечивающая выработку управляющих сигналов таким образом, что происходит изменение Ω , осуществляющее стабилизацию выходного напряжения СГ (U).

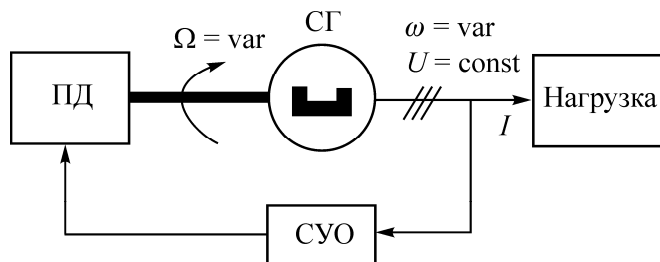


Рис. 1. Структурная схема системы генерирования с переменной частотой выходного напряжения

Функцию ПД может выполнять двигатель внутреннего сгорания или газотурбинный двигатель, оборудованные приводом регулирования частоты вращения выходного вала.

В настоящей статье количественно оценивается возможность стабилизации выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов за счет изменения частоты вращения вала генератора. Определяется регулировочная характеристика в форме зависимости частоты ω от тока генератора при условии сохранения постоянства выходного напряжения СГ.

ПРИНЦИП СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Принцип стабилизации напряжения в СГ с возбуждением от постоянных магнитов путем изменения частоты вращения вала, а следовательно, и частоты ЭДС холостого хода, легко пояснить с помощью векторной диаграммы генератора. Учитывая, что подобного рода генераторы являются явнополюсными, векторная диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 2 [2].

Стабилизация выходного напряжения ($U = U_{\text{ном}}$) при изменении тока I возможна за счет вариации частоты вращения вала Ω , учитывая, что при $\omega = p\Omega$ происходит увеличение или уменьшение ЭДС холостого хода E_0 и реактансов генератора $X_d = \omega L_d$, $X_q = \omega L_q$. Очевидно, что относительно номинального режима, характеризующегося величинами $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ и $\omega_{\text{ном}}$ ($\Omega_{\text{ном}}$), необходимо уменьшать или увеличивать частоту $\Omega \equiv \omega$ в зависимости от соотношения $I/I_{\text{ном}}$ и коэффициента сдвига нагрузки $\cos\varphi$.

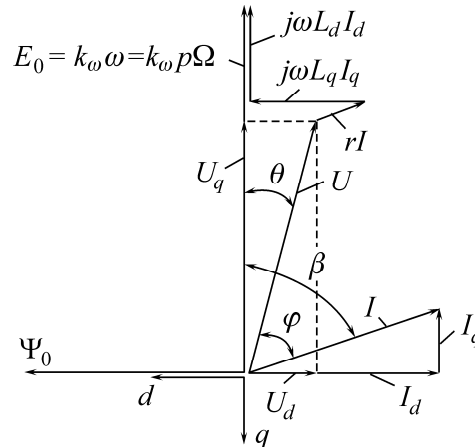


Рис. 2. Векторная диаграмма синхронного генератора: U, I — напряжение и ток генератора; r — активные сопротивления фазных обмоток статора генератора; L_d, L_q, I_d, I_q — индуктивности генератора и проекции тока I на продольную и поперечную ось; Ψ_0 — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами; k_ω — конструктивный коэффициент, p — число пар полюсов СГ

Определим необходимый закон изменения частоты ω , обеспечивающий $U = U_{\text{ном}}$ при вариации тока нагрузки и $\cos \varphi$, а также выясним, в каком диапазоне относительно $\omega_{\text{ном}}$ должна изменяться частота $\omega(\Omega)$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СГ

При разработке математической модели приняты следующие допущения: анализу подлежит статический режим, магнитная система СГ не насыщена и линейна, нагрузка СГ симметричная, СГ не имеет успокоительных контуров, ЭДС генератора изменяется по синусоидальному закону, ее амплитуда и частота пропорциональны частоте вращения Ω , активные потери в генераторе пренебрежимо малы, $r = 0$.

С учетом принятых допущений математическая модель СГ во вращающейся синхронно с ротором системе координат, при условии ориентации оси d по продольной оси синхронного генератора, будет иметь вид [1]:

$$\mathbf{u} = -\frac{d}{dt}\Psi - \omega\Psi, \quad \Psi = \mathbf{L}\mathbf{i} - \omega\Psi_0, \quad (1)$$

где $\Psi = [\Psi_d \ \Psi_q]^t$, Ψ_d, Ψ_q — потокосцепления генератора по продольной и поперечной осям; $\mathbf{u} = [U_d \ U_q]^t$, $\mathbf{i} = [I_d \ I_q]^t$ — векторы напряжений и токов генератора; $\Psi_0 = [\Psi_0 \ 0]^t$, $\Psi_0 = \text{const}$ — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами; $\mathbf{L} = \text{diag}\{L_d, L_q\}$; $\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}$, ω — круговая частота ЭДС СГ.

Выбрав в качестве переменных токи генератора и принимая во внимание, что из рис. 2 следует $I_d = I \sin \beta$, $I_q = I \cos \beta$, после несложных преобразований получим из уравнения (1) в скалярной форме

$$U_d = \omega L_q I \cos \beta, \quad U_q = -\omega L_d I \sin \beta + \omega \Psi_0. \quad (2)$$

В соотношении (2)

$$\beta = \arctg\left(\frac{U \sin \varphi + \omega L_q I}{U \cos \varphi}\right), \quad U^2 = (U_d)^2 + (U_q)^2. \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) позволяют определить функциональную зависимость $\omega = f(I, \cos \varphi)$ для обеспечения $U = U_{\text{ном}}$ при заданных L_d, L_q, Ψ_0 . Далее эта зависимость называется регулировочной характеристикой.

Для общности полученных результатов воспользуемся относительными единицами, которые будем обозначать x^* . В качестве базовых величин примем номинальное напряжение и ток СГ: $U_0 = U_{\text{ном}}, I_0 = I_{\text{ном}}$, а также циклическую частоту $\omega_0 = \omega_{\text{ном}}$ ЭДС E_0 , на которой реализуется номинальный режим. Введем обозначения:

$$k_L = \frac{L_q}{L_d}, \quad k_{sc} = \frac{I_{sc}}{I_{\text{ном}}}, \quad E_{0\text{ном}} = \omega_{\text{ном}} \Psi_0, \quad \Delta\omega\% = \frac{\omega_{\text{ном}} - \omega}{\omega_{\text{ном}}} 100\%,$$

где I_{sc} — расчетное значение тока короткого замыкания; коэффициенты k_L и k_{sc} характеризуют различие магнитных сопротивлений СГ по поперечной и продольной осям, а также превышение расчетного тока короткого замыкания СГ над номинальным током; $\Delta\omega\%$ — процентное отклонение частоты выходного напряжения СГ от номинального значения.

Величина тока короткого замыкания при принятых допущениях находится из следующего соотношения:

$$I_{sc} = \frac{\Psi_0}{L_d}.$$

Это соотношение позволяет получить необходимую величину L_d при заданном потоко-сцеплении Ψ_0 :

$$L_d = \frac{\Psi_0}{I_{kz}} = \frac{\Psi_0}{k_{kz} I_{\text{ном}}}. \quad (4)$$

Используя соотношения (2) и (3), определим относительное значение ЭДС холостого хода $E_{0\text{ном}}^* = \omega_{\text{ном}} \Psi_0 / U_{\text{ном}}$, исходя из обеспечения номинального режима:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{0\text{ном}}^* &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{k_{sc}}\right)^2 [(k_L \cos \beta)^2 + (\sin \beta)^2] + 1 - 2 \frac{1}{k_{sc}} \sin \beta}}, \\ \beta &= \arctg \frac{\sin \varphi + \frac{E_{0\text{ном}}^*}{k_{sc}} k_L}{\cos \varphi}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Зная величину $E_{0\text{ном}}^*$, вычислим из (2) и (3) необходимое относительное значение частоты ω^* , при которой обеспечивается $U = U_{\text{ном}}$ для заданного значения тока в нагрузке I^* и $\cos \varphi$:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega^* &= \frac{1}{E_{0\text{ном}}^* \sqrt{\left(\frac{I^*}{k_{sc}}\right)^2 [(k_L \cos \beta)^2 + (\sin \beta)^2] + 1 - 2 \frac{I^*}{k_{sc}} \sin \beta}}, \\ \beta &= \arctg \frac{\sin \varphi + \omega^* \frac{E_{0\text{ном}}^*}{k_{sc}} k_L I^*}{\cos \varphi}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Нелинейное уравнение (6) представляет собой аналитическое выражение для регулировочной характеристики, необходимое для реализации системы управления оборотами первичного двигателя.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОСТОЯНСТВО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СГ

Количественная оценка параметров СГ и регулировочной характеристики проводилась с использованием соотношений (4) и (5).

При проектировании автономных систем электроснабжения, кроме номинальных параметров, задается режим перегрузки, характеризующийся током I_{\max} . При этом значении тока напряжение на зажимах генератора должно быть равно номинальному, на практике $I_{\max} = (1.5 \div 2)I_{\text{ном}}$. Кроме режима перегрузки в технических требованиях на систему задается ток короткого замыкания I_{sc} , при этом коэффициент превышения расчетного тока короткого замыкания СГ над номинальным током $k_{sc} = I_{sc} / I_{\text{ном}}$, как правило, принимается равным $2 \div 4$. Такое превышение тока короткого замыкания I_{sc} над номинальным током нагрузки $I_{\text{ном}}$ обеспечивает селективное отключение неисправных нагрузок за счет срабатывания автоматов или плавких предохранителей.

На рис. 3 представлена зависимость относительного номинального значения ЭДС холостого хода СГ $E_{0\text{ном}}^*$ от коэффициента короткого замыкания k_{sc} для двух значений $\cos \varphi^1$ при условии выполнения равенства $U = U_{\text{ном}}$. Учитывая, что $E_{0\text{ном}}^* = \omega_{\text{ном}} \Psi_0 / U_{\text{ном}}$, а также соотношение (4), данный график определяет взаимосвязь между такими параметрами СГ, как Ψ_0 и L_d . Вид данной зависимости достаточно очевиден, т. е. с увеличением коэффициента k_{sc} уменьшается необходимая ЭДС $E_{0\text{ном}}^*$, так как внешняя характеристика СГ становится более “жесткой”; с увеличением индуктивного характера нагрузки увеличивается реакция якоря, вследствие чего возникает необходимость увеличения $E_{0\text{ном}}^*$.

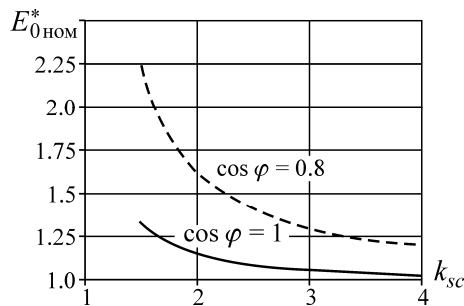


Рис. 3. Зависимость относительного номинального значения ЭДС холостого хода СГ от коэффициента короткого замыкания k_{sc} ; $k_L = 1$

Регулировочная характеристика для данного способа стабилизации при различных значениях коэффициентов k_{sc} и $\cos \varphi$ приведена на рис. 4а. На рис. 4б для удобства анализа при тех же значениях k_{sc} и $\cos \varphi$ представлена зависимость отклонения частоты выходного напряжения СГ ($\Delta \omega = (\omega_{\text{ном}} - \omega) / \omega_{\text{ном}} 100\%$) от относительного значения тока нагрузки I^* в диапазоне $0.1 \div 2$ и сохранении равенства $U = U_{\text{ном}}$.

Как следует из рис. 4, необходимый диапазон изменения частоты $\Delta \omega_w$ выходного напряжения СГ для обеспечения его стабильности для $k_{sc} = 3 \div 4$ и $\cos \varphi = 0.8 \div 1$ не превышает 100%. Данный диапазон, в соответствии с ГОСТ Р54073-2010, допускается для автономных авиаци-

¹ Здесь и далее предполагается индуктивный характер нагрузки СГ.

онных систем электроснабжения. Кроме того, при использовании в качестве первичного двигателя внутреннего сгорания, например, дизельного, появляется возможность за счет регулирования частоты повысить его КПД и экономить горючее [6]. Следует отметить, что этот диапазон существенно уменьшается, если коэффициент кратности тока короткого замыкания k_{sc} возрастает. Так, при $k_{sc} = 4$ он не превышает 50%. Существенно влияет на диапазон регулирования частоты характер нагрузки: с уменьшением индуктивной составляющей в токе диапазон уменьшается и, например, при $k_{sc} = 4$ не превышает 15%.

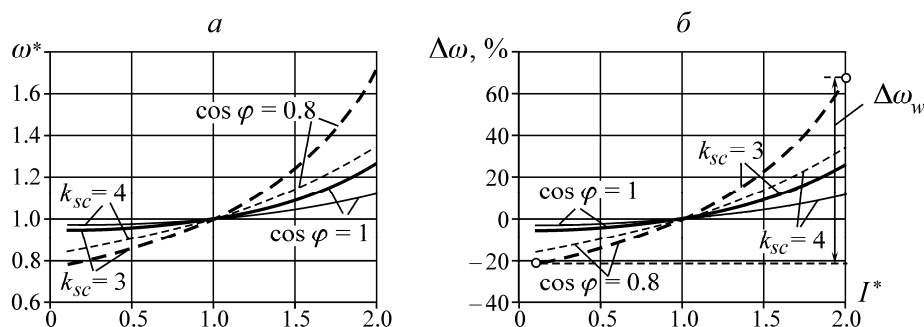


Рис. 4. Зависимость относительного значения частоты ω^* (а) и $\Delta\omega$ (б) напряжения СГ от относительного значения тока нагрузки I^* ; $k_L = 1$

Согласно рис. 5, влияние коэффициента различия магнитных цепей СГ по продольной и поперечной осям k_L на параметр $E_{0ном}^*$ и $\Delta\omega$ относительно невелико и определяется единицами процентов, что лежит в пределах точности расчетов с учетом сделанных допущений. Это позволяет сделать вывод о возможности полагать $k_L \approx 1$ при инженерной оценке параметров СГ на начальной стадии проектирования. Такое допущение дает возможность упростить выражения (5) и (6) для ЭДС холостого хода и регулировочной характеристики так, что они становятся линейными и явно разрешаются относительно $E_{0ном}^*$ и ω :

$$E_{0ном}^* = \frac{k_{sc}}{(k_{sc})^2 - 1} [\sin \varphi + \sqrt{(\sin \varphi)^2 + (k_{sc})^2 - 1}],$$

$$\omega^* = \frac{1}{E_{0ном}^*} \cdot \frac{I^*}{k_{sc}} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{I^*}{k_{sc}}\right)^2} \left[\sin \varphi + \sqrt{(\sin \varphi)^2 + \left(\frac{k_{sc}}{I^*}\right)^2 - 1} \right].$$

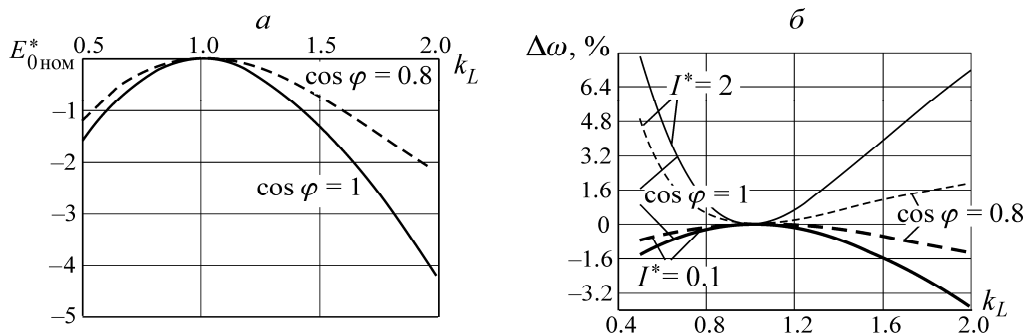


Рис. 5. Зависимость ЭДС холостого хода СГ (а) и частоты $\Delta\omega$ напряжения СГ (б) от k_L ; $k_{sc} = 3$

Систему электроснабжения можно спроектировать так, что регулировочные характеристики, а также зависимость $\Delta\omega(I^*)$ при $I^*=0$ и $I^*=I_{\max}^*$ будут иметь одинаковое по величине и различное по знаку отклонение по частоте $\Delta\omega$. Для этого необходимо $E_{0\text{ном}}^*$, соответствующую $\omega_{\text{ном}}$, выбирать при некотором токе I_0 , лежащем в диапазоне $I_{\text{ном}} < I_0 < I_{\max}$. Анализ показывает, что величина этого тока для $\cos\varphi = 1$ находится с помощью следующего соотношения:

$$I_0^* = \frac{I_0}{I_{\text{ном}}} = k_{sc} \sqrt{1 - \frac{4}{\left[1 + 1/\sqrt{1 - \left(\frac{I_{\max}^*}{k_{sc}}\right)^2}\right]^2}}. \quad (7)$$

Тогда значение ЭДС холостого хода определится как

$$E_{0\text{ном}}^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{I_0^*}{I_{sc}}\right)^2}}. \quad (8)$$

На рис. 6а представлена зависимость $\Delta\omega(I^*)$ для различных значений $\cos\varphi$ при условии выбора $E_{0\text{ном}}^*$ по соотношению (8). Видно, что отклонения по частоте одинаковы по модулю при $I^*=0$ и $I^*=I_{\max}^*$. Следует отметить, что соотношения (7) и (8) можно применять и при других значениях $\cos\varphi$. Это наглядно подтверждает рис. 6б, где показана зависимость $I_0^*(\cos\varphi)$.

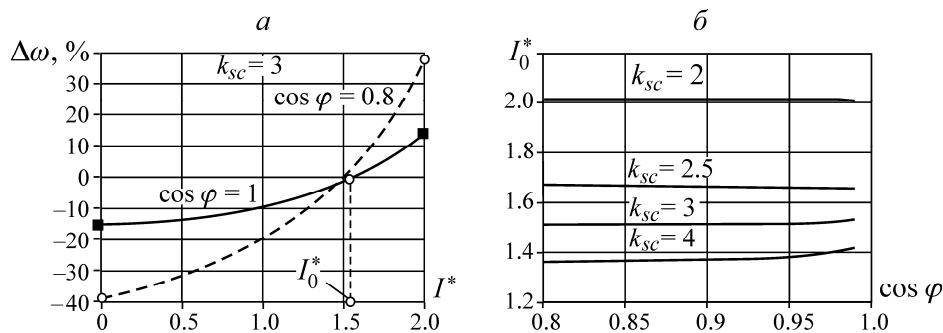


Рис. 6. Зависимости: а — отклонения частоты $\Delta\omega$ напряжения СГ от относительного значения тока нагрузки I^* при расчете E_0 исходя из режима симметрии регулировочной характеристики; б — расчетного значения тока I_0^* от коэффициента сдвига нагрузки $\cos\varphi$, при котором регулировочная характеристика симметрична относительно отклонения частоты $\Delta\omega$

ВЫВОДЫ

Стабильность выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе автономных систем электроснабжения с переменной выходной частотой может быть обеспечена за счет регулирования частоты вращения вала генератора.

Полученные аналитические выражения для регулировочных характеристик генератора позволяют по заданному диапазону изменения частоты выходного напряжения, величине тока в режимах перегрузки и короткого замыкания, а также характеру и величине нагрузки выбрать основные электрические параметры синхронного генератора, например такие, как ЭДС холостого хода и индуктивности по продольной и поперечной осям.

Показано, что условие симметрии регулировочной характеристики генератора при изменении частоты его вращения вверх и вниз от номинальной может быть обеспечено за счет выбора ЭДС холостого хода в режиме номинальной частоты вращения на определенный уровень нагрузки. Так, при трехкратном токе короткого замыкания и двойном токе перегрузки относительно номинального расчет ЭДС холостого хода необходимо проводить для тока, который в 1.5 раза больше, чем номинальный. При этом диапазон регулирования частоты при изменении тока в нагрузке от нуля до двукратного значения относительно номинального и $\cos\varphi \geq 0.8$ не превысит $\pm 40\%$ от номинальной частоты.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе генераторов, работающих в автономных системах энергоснабжения угольных и горнорудных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Харитонов С. А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.
2. **Симонов Б. Ф., Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В.** К вопросу стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной частоте вращения // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
3. **Симонов Б. Ф., Харитонов С. А., Машинский В. В.** Мехатронная система “Синхронный генератор–трехфазный мостовой выпрямитель” для автономных энергетических систем // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
4. **Herrera J. I., Reddoch T. W.** Testing requirements for variable speed generating technology for wind turbine applications, Electric Power Research Institute (EPRI) AP-4590, Project 1996-22, final report, May 1986.
5. **Xiuxian Xia.** Dynamic power distribution management for all electric aircraft, Cranfield University, 2011.
6. **Герасимов А., Толмачев В., Уткин К.** Дизель-генераторные электростанции: работа при переменной частоте вращения дизеля // Новости электротехники. — 2005. — № 4 (34) (<http://www.news.ele-teh.ru/arh/2005/34/13.php>).

Поступила в редакцию 25/V 2015