

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.314: 621.382: 621.314.572

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Б. Ф. Симонов¹, С. А. Харитонов^{2,3}, С. В. Брованов³, Е. Я. Букина², Д. В. Макаров³

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*

³*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, E-mail: Kharit1@yandex.ru,
просп. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия*

Проанализирована возможность стабилизации напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в автономных системах электроснабжения с переменной частотой генерируемого напряжения. Способ стабилизации базируется на использовании последовательно включенного с генератором полупроводникового преобразователя электрической энергии, генерирующего реактивную мощность. Аналитически определены основные энергетические характеристики полупроводникового преобразователя и синхронного генератора, выявлены ограничения по диапазону частот на возможность использования данного способа, определен рациональный диапазон частот и полные мощности элементов системы.

Синхронный генератор, постоянные магниты, переменная частота вращения, стабилизация напряжения, полупроводниковый преобразователь

Для энергоемких сфер промышленности, таких как горнодобывающая и горно-обогательная, характерной закономерностью является опережающий рост энергопотребления по отношению к темпам роста продукции. Так, в горнодобывающей промышленности США затраты на электроэнергию по некоторым оценкам составляют более 15 % от общей стоимости производства [1]. Горнодобывающие компании все больше уделяют внимания мероприятиям по энергосбережению с использованием устройств силовой электроники и экономически эффективных способов генерации электроэнергии, включая элементы концепции “smart grid”, основанной на применении многообразия источников электроэнергии и рациональном их объединении в адаптивную энергетическую систему. Многие компании стремятся к развитию проектов по расширению ряда возобновляемых источников энергии на основе ветроэнергетики и фотовольтаики. Предпринимаются попытки повысить энергетическую эффективность традиционных автономных систем электроснабжения, в частности на базе дизель-генераторов. В этом случае используются дизель и электрогенератор с переменной частотой вращения вала, что существенно снижает затраты на топливо и делает его экологичным [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0198, уникальный идентификатор ПНИЭР — RFMEFI57715X0198).

Компании, работающие на инновации для горнодобывающей промышленности, внедряют системы силовой электроники в регулируемые электроприводы тягачей, что гарантирует оптимальный скоростной диапазон дизельных двигателей. Особое внимание уделяется безредукторным регулируемым электроприводам. Энергосберегающие электроприводы внедрены в США, Китае, Канаде и Австралии, а компания Siemens VAI разработала низкоскоростные электроприводы для дисковых мельниц, многоковшовых экскаваторов и работает над электроприводами для насосов, конвейеров и холодильников. Широко рекламируется замена механических дросселей на регулируемые с полупроводниковыми преобразователями частоты [1]. Применение частотных преобразователей приводит к значительной экономии электроэнергии в механизмах, связанных с перемещением значительных масс, где часто осуществляются режимы торможения. В этом случае обеспечение режима рекуперации существенно повышает энергетическую эффективность. Электротехнические компании утверждают, что если каждый электропривод во всем мире довести до последних технологических стандартов, то годовая экономия энергии составит ≈ 130 млрд кВт/ч.

Внедряя энергоэффективные технологии производства и генерации энергии, горнодобывающие предприятия иногда превращаются в поставщиков электроэнергии для местных населенных пунктов, беря на себя ответственность за их электрификацию.

Применение автономного энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии, например ветроэнергетических установок или экологичных дизель-генераторных систем, приводит к необходимости решения задачи преобразования механической энергии вращающегося с переменной частотой вала в электрическую [2–4]. Эта задача решается с помощью электрогенераторов различного типа при высоких мощностях, обычно синхронных генераторов, но при этом возникает проблема обеспечения заданного качества генерируемой электрической энергии и надежности функционирования [5–12].

Ранее в таких системах ставилась задача стабилизации частоты генерируемого напряжения [13, 14], однако в последние годы эта проблема стала неактуальной [15], так как 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.), но остается жестким требование к стабильности генерируемого напряжения. Возможность использования переменной частоты в автономных системах электропитания закреплена рядом стандартов. В работах [7–12] показана эффективность применения в подобных системах синхронных генераторов (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов.

Настоящая статья посвящена исследованию электромагнитных процессов в автономной системе генерирования трехфазного переменного тока с изменяющейся частотой выходного напряжения, где стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет последовательного включения в канале генерирования полупроводникового преобразователя частоты. В отличие от рассмотренного варианта [5–12, 16] с параллельным включением полупроводникового преобразователя (ПП), в данном случае ПП рассчитывается на величину тока, не превышающего тока нагрузки, а его выходное напряжение может превышать выходное напряжение системы генерирования. Такое решение позволяет уменьшить стоимость ПП, если при выборе параметров транзисторов оставаться в одном классе по напряжению. С целью исключения перегрузки по току ПП в режимах короткого замыкания в нагрузке предусматриваются устройства для шунтирования выходных зажимов преобразователя. К достоинствам варианта можно отнести отсутствие дополнительного дроссельного оборудования для подавления высокочастотных пульсаций в токе ПП, их роль выполняют реактансы синхронного генератора. В системе предусмотрено применение трансформатора (или автотрансформатора), подключенного между ПП и СГ, что расширяет возможности по выбору параметров преобразователя.

Структурная схема такой системы приведена на рис. 1, где ПП — полупроводниковый преобразователь частоты, выходное напряжение u_{VS} которого регулируется по частоте, фазе и величине; СГ — магнитоэлектрический синхронный генератор, частота и значение его выходного напряжения u_G изменяются при изменении частоты вращения вала n и тока нагрузки i . Нагрузка является потребителем электрической энергии, напряжение на ее зажимах определяется соотношением $u_L = u_{VS} + u_G$, при этом действующее значение u_L поддерживается постоянным за счет соответствующего изменения напряжения u_{VS} .

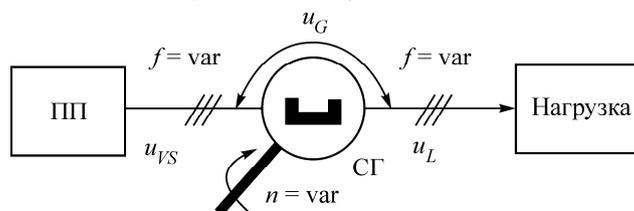


Рис. 1. Структурная схема системы генерирования с переменной частотой выходного напряжения

Функцию ПП могут выполнять различные схемы преобразователей, однако предпочтение следует отдать инвертору напряжения с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). При таком построении преобразователя обеспечивается достаточно высокое качество генерируемого напряжения как в статических, так и динамических режимах.

Рассматривается вариант стабилизации выходного напряжения системы u_L за счет формирования с помощью ПП напряжения u_{VS} , ортогонального по основной гармонике току нагрузки. Это означает, что преобразователь генерирует только реактивную мощность, изменяющуюся по величине и знаку. Проводится оценка напряжений, токов и полных мощностей элементов системы генерирования, находятся особые точки в работе системы при изменении частоты вращения вала генератора. Определяются предпочтительные диапазоны работы и дается их количественная оценка, выявляются физические ограничения возможности стабилизации напряжения синхронного генератора.

Один из вариантов построения функциональной схемы такой системы представлен на рис. 2. Здесь ИН — инвертор напряжения с высокочастотной ШИМ; ТК — тиристорный коммутатор для шунтирования ИН в режимах короткого замыкания в нагрузке и внештатных режимах работы ИН; С, C_ϕ — емкостные фильтры; ЗВУ — зарядно-выпрямительное устройство небольшой мощности, обеспечивающее заряд конденсаторов С и компенсирующее активные потери в ИН; при некотором выборе параметров и режимов работы от применения ЗВУ можно отказаться.

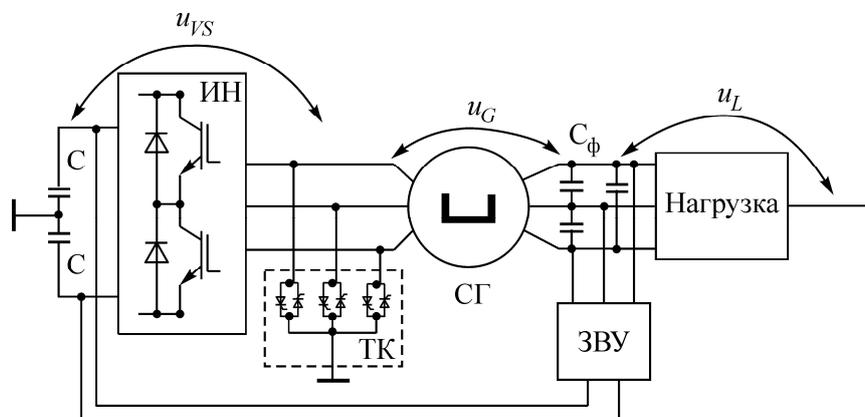


Рис. 2. Функциональная схема системы генерирования

ПРИНЦИП СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Принцип стабилизации напряжения в системе генерирования с последовательным ПП при изменяющейся частоте вращения вала поясним с помощью векторной диаграммы для основных гармоник тока и напряжений. Учитывая, что подобного рода генераторы, как правило, явнополюсные, векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 3 [9]. Она построена в предположении, что активные потери в СГ равны нулю и частота ШИМ существенно больше частоты выходного напряжения СГ. Здесь \dot{X} , согласно символному методу, принятому в электротехнике, — вектор в декартовых d, q координатах, изменяющийся по гармоническому закону величины x , его длина равна действующему значению этой величины; I — действующее значение основной гармоники тока нагрузки; r — активные сопротивления фазных обмоток статора генератора; $L_d = L_\sigma + L_{ad}$, $L_q = L_\sigma + L_{aq}$, I_d, I_q — индуктивности генератора и проекции тока I на продольную и поперечную оси; L_σ — индуктивность рассеяния, L_{ad}, L_{aq} — главные индуктивности генератора по d и q осям; Ψ_0 — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами; U_{VS}, U_L — действующие значения основных гармоник напряжений ПП и СГ.

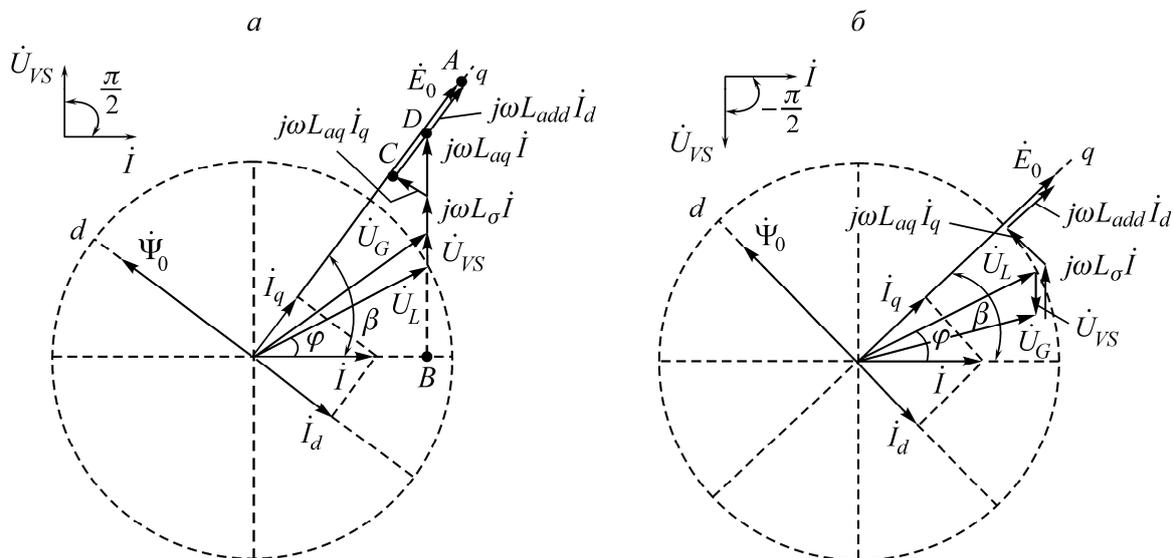


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений (а) и токов (б) системы генерирования

Как следует из рис. 3, стабилизация выходного напряжения U_L при изменении тока I или частоты вращения вала СГ возможна за счет изменения величины и знака напряжения ПП, которое всегда поддерживается ортогональным току. Такой способ стабилизации физически эквивалентен увеличению или уменьшению падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния СГ.

Рассмотрим, как меняются напряжения элементов системы при изменении частоты вращения вала СГ, величины и характера тока нагрузки при условии, что напряжение на нагрузке поддерживается равным номинальному значению $U_{Lном}$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ

В 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 ампли-

туда и частота пропорциональны частоте вращения Ω ; активные потери в генераторе пренебрежимо малы; ПП работает с высокочастотной ШИМ, частота которой намного выше частоты генерируемого напряжения; вентили полупроводникового преобразователя “идеальны”; расчет проводится по основной гармонике.

С учетом принятых допущений математическая модель системы во вращающейся синхронно с ротором СГ системе координат при условии ориентации оси d по продольной оси синхронного генератора имеет следующий вид [14, 17]:

$$\mathbf{u}_L = \mathbf{u}_{VS} + \mathbf{u}_G = \mathbf{u}_{VS} - \frac{d}{dt} \Psi - \omega \Psi, \quad (1)$$

$$\Psi = \mathbf{L} \mathbf{i} - \omega \Psi_0,$$

где $\Psi = [\Psi_d \ \Psi_q]^t$, Ψ_d , Ψ_q — потокосцепления генератора по продольной и поперечной осям; $\mathbf{u}_{VS} = [U_{VSd} \ U_{VSq}]^t$, $\mathbf{u}_G = [U_{Gd} \ U_{Gq}]^t$, $\mathbf{i} = [I_d \ I_q]^t$, $\mathbf{u}_L = [U_{Ld} \ U_{Lq}]^t$ — векторы напряжений ПП, СГ, тока и напряжения нагрузки; $\Psi_0 = [\Psi_0 \ 0]^t = \text{const}$ — 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 тока генератора и принимая во внимание, что согласно рис. 3 $I_d = I \sin \beta$, $I_q = I \cos \beta$, после несложных преобразований получим из уравнения (1) в скалярной форме для установившегося режима:

$$U_{Ld} = \omega L_q I \cos \beta + U_{VS} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right), \quad (2)$$

$$U_{Lq} = \omega \Psi_0 - \omega L_d I \sin \beta - U_{VS} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right).$$

Из (2) и рис. 3а находим

$$E_0 = \omega \Psi_0 = U_L \cos(\beta - \varphi) + U_{VS} \sin \beta + \omega L_d I \sin \beta, \quad (3)$$

где

$$\cos \beta = \frac{U_L \cos \varphi}{\sqrt{(U_L \sin \varphi + \omega L_q I + U_{VS})^2 + (U_L \cos \varphi)^2}}, \quad (4)$$

$$\sin \beta = \frac{U_L \sin \varphi + \omega L_q I + U_{VS}}{\sqrt{(U_L \sin \varphi + \omega L_q I + U_{VS})^2 + (U_L \cos \varphi)^2}}.$$

Соотношения (3), (4) позволяют определить функциональные зависимости $U_{VS} = f(\omega, I, \cos \varphi)$, $U_G = \xi(\omega, I, \cos \varphi)$ для обеспечения $U_L = U_{L\text{ном}}$ при заданных L_d , L_q , Ψ_0 , а также рассчитать установленные мощности ПП и СГ.

Для общности полученных результатов воспользуемся относительными единицами, которые обозначим величиной со звездочкой. В качестве базовых примем номинальное напряжение, ток и полную мощность нагрузки: $U_\delta = U_{L\text{ном}}$, $I_\delta = I_{\text{ном}}$, $S_\delta = 3U_{L\text{ном}} I_{\text{ном}}$, а также циклическую частоту $\omega_\delta = \omega_{\text{ном}}$, на которой $U_{VS} = 0$, $U_G = U_L$ и реализуется номинальный режим работы системы генерирования $I = I_{\text{ном}}$. Введем обозначения:

$$k_L = \frac{L_q}{L_d}, \quad k_{sc} = \frac{I_{sc}}{I_{ном}}, \quad E_{0ном} = \omega_{ном} \Psi_0,$$

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.

Ток короткого замыкания при принятых допущениях

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

Это соотношение позволяет вычислить L_d при заданном потокосцеплении Ψ_0 :

$$L_d = \frac{\Psi_0}{I_{sc}} = \frac{\Psi_0}{k_{sc} I_{ин}}. \quad (5)$$

Используя относительные единицы и выражения (3)–(5), определим ЭДС холостого хода $\left(E_{0ин}^* = \frac{\omega_{ин} \Psi}{U_{ин}} \right)$ из трансцендентного уравнения

$$E_{0ном}^* = \frac{1 + (1 + k_L) \frac{E_{0ном}^*}{k_{sc}} \sin \varphi + k_L \left(\frac{E_{0ном}^*}{k_{sc}} \right)^2}{\sqrt{1 + 2 \frac{E_{0ном}^*}{k_{sc}} k_L \sin \varphi + \left(\frac{E_{0ном}^*}{k_{sc}} k_L \right)^2}}. \quad (6)$$

Зная $E_{0ном}^*$, найдем из (3)–(6) уравнение для определения относительного значения напряжения ПП U_{VS}^* , при котором обеспечивается $U = U_{ном}$ для заданного тока в нагрузке I^* и $\cos \varphi$:

$$\omega^* E_{0ном}^* = \frac{1 + (U_{VS}^*)^2 + \frac{\omega^* E_{0ном}^* I^*}{k_{sc}} k_L \left(\frac{\omega^* E_{0ном}^* I^*}{k_{sc}} + U_{VS}^* + \sin \varphi \right) + \frac{\omega^* E_{0ном}^* I^*}{k_{sc}} (U_{VS}^* + \sin \varphi) + 2U_{VS}^* \sin \varphi}{\sqrt{1 + 2 \left(U_{VS}^* + \frac{\omega^* E_{0ном}^* I^*}{k_{sc}} k_L \right) \sin \varphi + \left(U_{VS}^* + \frac{\omega^* E_{0ном}^* I^*}{k_{sc}} k_L \right)^2}}. \quad (7)$$

При известном напряжении ПП U_{VS}^* из векторной диаграммы рис. 3а рассчитаем относительное значение напряжения СГ:

$$U_G^* = \sqrt{(1 + U_{VS}^* \sin \varphi)^2 + (U_{VS}^* \cos \varphi)^2} = \sqrt{1 + 2U_{VS}^* \sin \varphi + (U_{VS}^*)^2}. \quad (8)$$

Относительные значения полной мощности ПП S_{VS}^* , СГ S_G^* и всей системы генерирования S_Σ^* получим из соотношений:

$$S_{VS}^* = I^* U_{VS}^*, \quad S_G^* = I^* U_G^*, \quad S_\Sigma^* = S_{VS}^* + S_G^*. \quad (9)$$

Учитывая, что ПП не генерирует и не потребляет активной мощности, рассчитаем коэффициент мощности синхронного генератора:

$$\chi_G = \frac{3U_L I \cos \varphi}{3U_G I} = \frac{\cos \varphi}{U_G^*}. \quad (10)$$

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ГЕНЕРАТОРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОСТОЯНСТВО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ

При проектировании автономных систем электроснабжения кроме номинальных параметров задается режим перегрузки, характеризующийся током I_{\max} , при котором напряжение на зажимах генератора должно быть равно номинальному, т. е. $I_{\max} = (1.5 \div 2)I_{\text{ном}}$. 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 $k_{sc} = I_{sc} / I_{\text{ном}}$ принимается равным $2 \div 4$. Такое превышение I_{sc} над $I_{\text{ном}}$ обеспечивает селективное отключение неисправных нагрузок за счет срабатывания автоматов или плавких предохранителей.

На рис. 4 представлены рассчитанные с помощью соотношений (6) и (7) зависимости относительного номинального значения ЭДС холостого хода СГ $E_{0\text{ном}}^*$ от коэффициента k_{sc} (рис. 4а) и относительного значения напряжения преобразователя U_{VS}^* от относительного значения частоты ЭДС СГ (рис. 4б) для двух значений $\cos \varphi^*$ при условии выполнения равенства $U = U_{\text{ном}}$.

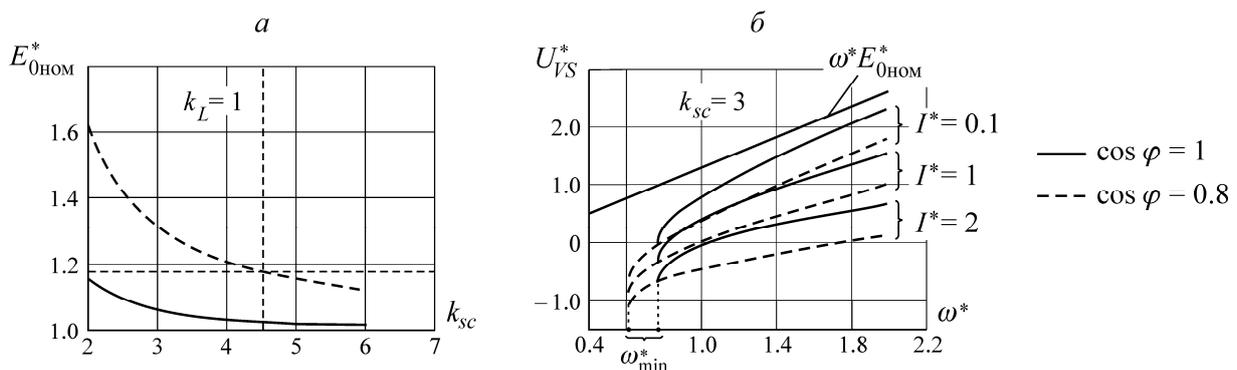


Рис. 4. Зависимости относительного номинального значения ЭДС холостого хода СГ от k_{sc} (а) и относительного значения напряжения преобразователя от относительного значения частоты ЭДС СГ (б)

На рис. 5 приведены зависимости $E_{0\text{ном}}^*$ и U_{VS}^* от коэффициента k_L , характеризующего различие магнитных сопротивлений СГ по поперечной и продольной осям. Видно, что влияние k_L несущественно, различие между $E_{0\text{ном}}^*$ и U_{VS}^* при $k_L = 1$ и $k_L \neq 1$ не превышает ошибки, возникающей в результате принятых допущений. По этой причине оценка значений $E_{0\text{ном}}^*$ и U_{VS}^* при данном способе стабилизации напряжения может быть проведена при $k_L = 1$. Соотношения (6) и (7) значительно упрощаются и приобретают вид:

$$E_{0\text{ном}}^* = \frac{\frac{\sin \varphi}{k_{sc}} + \sqrt{1 - \left(\frac{\cos \varphi}{k_{sc}}\right)^2}}{1 - \left(\frac{1}{k_{sc}}\right)^2},$$

*Здесь и далее предполагается индуктивный характер нагрузки системы генерирования.

$$U_{VS}^* = \sqrt{(\omega^* E_{0ном}^*)^2 - (\cos \varphi)^2} - \sin \varphi - \frac{I^* \omega^* E_{0ном}^*}{k_{sc}}.$$

Последнее соотношение, по сути, представляет собой в масштабе закон изменения модуля управляющего сигнала в d, q координатах полупроводниковым преобразователем на базе инвертора напряжения. Данный закон обеспечивает стабилизацию выходного напряжения системы генерирования при изменении частоты вращения вала СГ, а также величины и характера нагрузки.

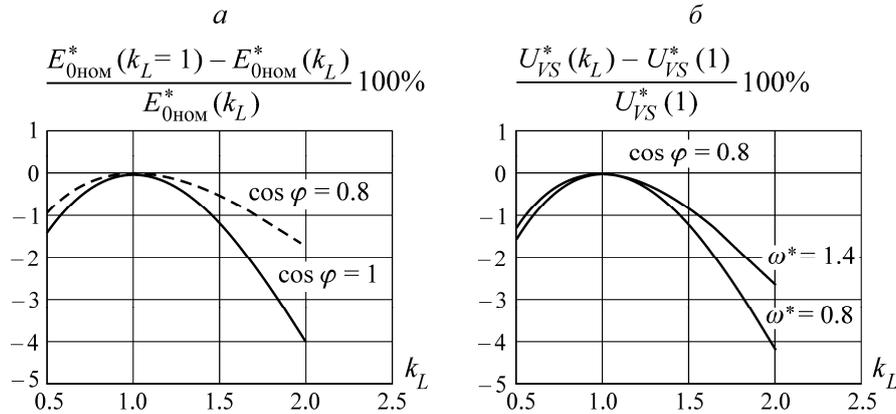


Рис. 5. Влияние различных магнитных сопротивлений генератора по поперечной и продольной осям на относительное значение $E_{0ном}^*$ (а) и U_{VS}^* (б); $k_{sc} = 3$

Учитывая, что $E_{0ном}^* = \omega_{ном} \Psi_0 / U_{ном}$, а также соотношение (5), из рис. 4а следует, что при заданных номинальных параметрах нагрузки функция $E_{0ном}^*(k_{sc})$ устанавливает взаимосвязь между параметрами генератора Ψ_0 и L_d .

Характер влияния коэффициента k_{sc} на величину $E_{0ном}^*$ (рис. 4а) достаточно очевиден, т. е. с его ростом уменьшается значение необходимой ЭДС $E_{0ном}^*$, так как внешняя характеристика генератора становится более “жесткой”; с ростом индуктивного характера нагрузки увеличивается реакция якоря, вследствие чего возникает необходимость увеличения $E_{0ном}^*$.

Зависимости $U_{VS}^*(\omega^*)$ на рис. 4б построены при $E_{0ном}^* = 1.31$ для $k_{sc} = 3$, $\cos \varphi = 0.8$, $k_L = 1$. Видно, что максимальное значение напряжения преобразователя $U_{VS\max}^*$ определяется режимом холостого хода на максимальной рабочей частоте ω_{\max}^* . При этом максимальное напряжение преобразователя имеет место для $\cos \varphi = 1$, $I^* = 0$ и находится с помощью соотношения

$$U_{VS\max}^* = \sqrt{(\omega_{\max}^* E_{0ном}^*)^2 - 1}.$$

При $\omega^* = \omega_0^*$ напряжение $U_{VS}^* = 0$, эта точка характеризует момент изменения знака генерируемой ПП реактивной мощности. При $\omega^* > \omega_0^*$ напряжение U_{VS}^* опережает по фазе ток нагрузки (см. рис. 3а), а при $\omega^* < \omega_0^*$ ток нагрузки опережает по фазе напряжение U_{VS}^* . Частота ω_0^* вычисляется как

$$\omega_0^* = \frac{\sin \frac{I^*}{k_{sc}} + \sqrt{1 - \left(\cos \varphi \frac{I^*}{k_{sc}} \right)^2}}{\left[1 - \left(\frac{I^*}{k_{sc}} \right)^2 \right] E_{0ин}^*}.$$

Зависимость ω_0^* от тока нагрузки показана на рис. 6. В режиме холостого хода $\omega_0^* = 1/E_{0ном}^*$, с увеличением тока нагрузки ω_0^* быстро растет, особенно при малых значениях коэффициента мощности нагрузки, а в режиме короткого замыкания она асимптотически стремится к бесконечности.

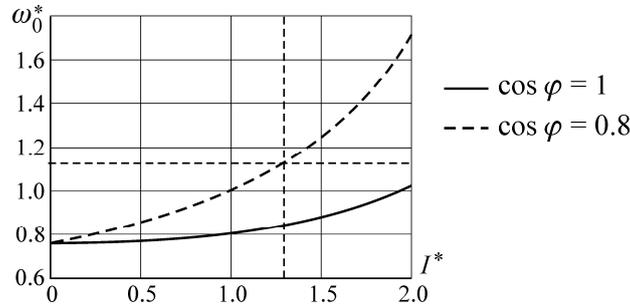


Рис. 6. Зависимость частоты ω_0^* от тока нагрузки; $k_{sc} = 3$

В диапазоне $\omega^* < \omega_0^*$ при некоторых значениях частоты $\omega^* = \omega_{min}^*$ напряжение U_{VS}^* ограничено предельными возможностями данного способа стабилизации напряжения на нагрузке, что иллюстрирует рис. 7. При этой частоте фаза ЭДС генератора совпадает с фазой тока нагрузки, при дальнейшем уменьшении частоты для поддержания равенства $U = U_{ном}$ необходимо увеличивать ЭДС генератора, что физически невозможно.

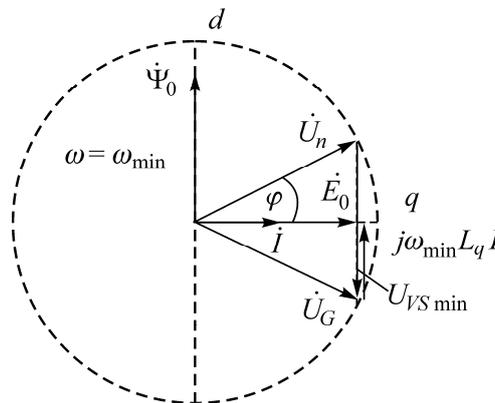


Рис. 7. Векторная диаграмма, соответствующая режиму минимально возможной частоте вращения вала СГ

Частота $\omega^* = \omega_{min}^*$ определяется следующим образом:

$$\omega_{min}^* = \frac{\cos \varphi}{E_{0ном}^*}. \tag{11}$$

При этом напряжение ПП в этой точке находится из выражения

$$U_{VSmin}^* = - \left(\sin \varphi + \frac{I^*}{k_{sc}} \cos \varphi \right).$$

Характер изменения ω_{min}^* от k_{sc} и U_{VSmin}^* от I^* показан на рис. 8. С увеличением k_{sc} значение ω_{min}^* асимптотически приближается к $\omega_{min}^* = \cos \varphi$. Значение U_{VSmin}^* лежит в диапазоне $0, -(\sin \varphi_{max} + \cos \varphi_{max})$, при изменении тока нагрузки от нуля до тока короткого замыкания и угла φ — в диапазоне $0, \varphi_{max}$.

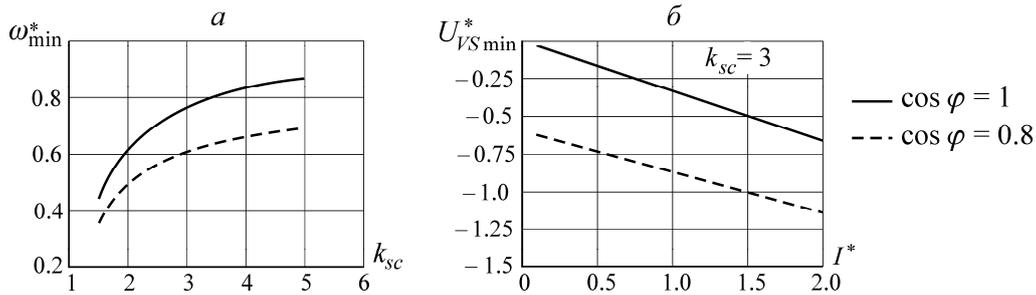


Рис. 8. Зависимость граничных значений ω_{\min}^* от коэффициента k_{sc} (а) и $U_{VS\min}^*$ от тока нагрузки I^* (б)

На рис. 9а представлены зависимости U_G^* и коэффициента мощности χ_G генератора от частоты ω^* , рассчитанные с помощью соотношений (8) и (10) для различных I^* и $\cos \varphi$. С уменьшением ω^* уменьшается напряжение генератора, эта тенденция сохраняется до некоторой частоты $\omega^* = \omega_{g0}^*$, при которой фазовый сдвиг между током нагрузки и напряжением генератора становится равным нулю (рис. 10). В этой точке коэффициент мощности СГ равен единице (рис. 9б), при дальнейшем уменьшении частоты происходит рост напряжения генератора, так как эквивалентная нагрузка для него становится емкостной. Найдем значение ω_{g0}^* , пользуясь соотношением (8) и рис. 10:

$$\omega_{g0}^* = \frac{\cos \varphi}{E_{0\text{ном}}^* \sqrt{1 - \left(\frac{I^*}{k_{sc}}\right)^2}}. \quad (12)$$

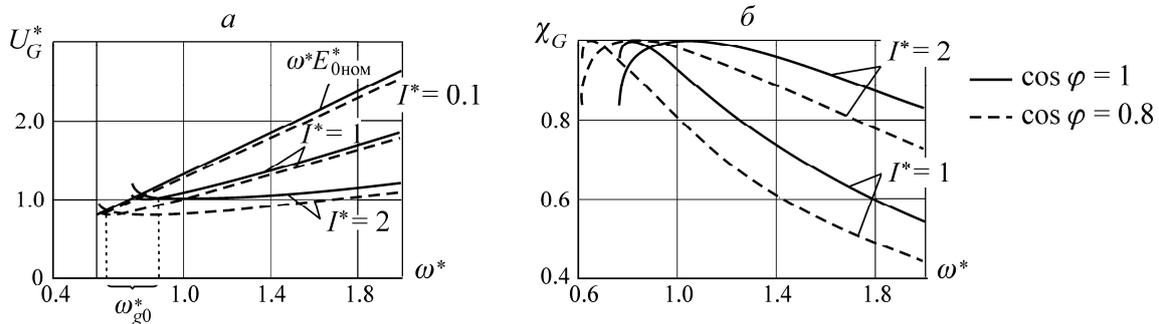


Рис. 9. Зависимость относительного значения напряжения (а) и коэффициента мощности (б) синхронного генератора от частоты ω^* ; $k_{sc} = 3$

Характер изменения ω_{g0}^* в функции тока нагрузки при различных $\cos \varphi$ показан на рис. 11. При $I^* = 0$, как следует из соотношений (11) и (12), $\omega_{g0}^* = \omega_{\min}^*$; с увеличением тока нагрузки ω_{g0}^* быстро возрастает и в режиме короткого замыкания стремится к бесконечности.

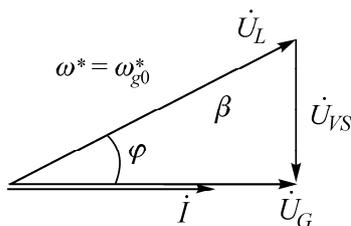


Рис. 10. Векторная диаграмма, соответствующая режиму $\omega^* = \omega_{g0}^*$

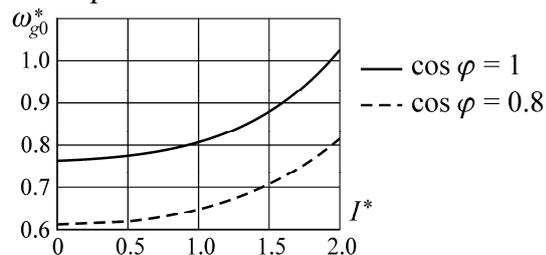


Рис. 11. Зависимость частоты ω_{g0}^* от тока нагрузки; $k_{sc} = 3$

Зависимости относительного значения полной мощности полупроводникового преобразователя и синхронного генератора для различных значений тока и $\cos \varphi$ приведены на рис. 12.

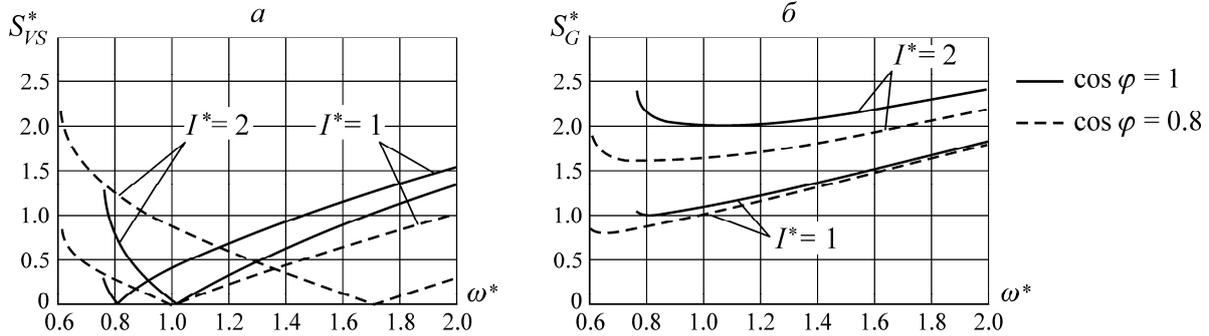


Рис. 12. Зависимость относительного значения полной мощности полупроводникового преобразователя (а) и синхронного генератора (б) от частоты ω^* ; $k_{sc} = 3$

Характер поведения данных графиков в значительной степени обусловлен особенностями изменения напряжений на указанных элементах системы и позволяет судить об установленной мощности СГ и ПП по максимальным значениям в рабочем диапазоне частот ω^* . Диапазон $\Delta\omega_w^*$ определим следующим образом:

$$\Delta\omega_w^* = \omega_{w\max}^* - \omega_{w\min}^*,$$

где $\omega_{w\max}^*$, $\omega_{w\min}^*$ — максимальная и минимальная рабочая частота системы генерирования.

Для выбора $\omega_{w\max}^*$ и $\omega_{w\min}^*$ воспользуемся зависимостью полной мощности системы генерирования S_Σ^* от частоты ω^* , которая показана на рис. 13 для различных I^* и $\cos \varphi$.

Выберем $\Delta\omega_w^* = 2$ как наиболее часто встречающийся в практике диапазон рабочих частот и предположим, что коэффициент мощности нагрузки лежит в наиболее вероятном диапазоне $\cos \varphi = 0.8 \div 1$. Кроме того, примем, что система генерирования имеет трехкратный ток короткого замыкания ($k_{sc} = 3$) и обеспечивает двойную относительно номинального тока перегрузку ($I^* = 2$) при всех возможных $\cos \varphi$. Для заданных условий рабочие частоты будут следующие: $\omega_{w\max}^* = 1.578$, $\omega_{w\min}^* = 0.789$. Такое значение рабочих частот возможно при условии, что $S_\Sigma^* = 3.038$. Как правило, это значение называют установленной мощностью системы. При заданных условиях выбора диапазона получим, что установленная мощность системы больше максимальной мощности нагрузки в $\gamma_\Sigma = S_\Sigma^* / S_{L\max} = S_\Sigma^* / 2 = 1.519$ раза.

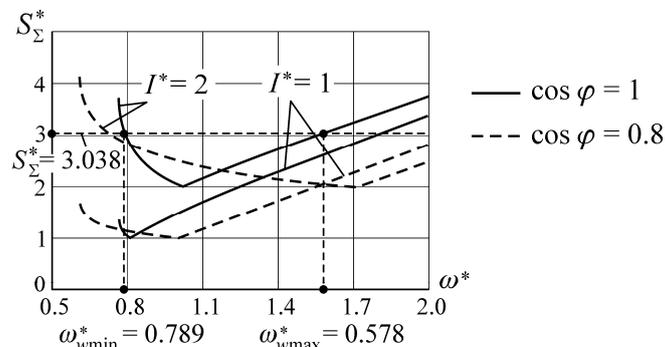


Рис. 13. Зависимость относительного значения полной мощности системы генерирования от частоты ω^* при выборе рабочего диапазона частот $[\omega_{w\min}^*, \omega_{w\max}^*]$; $k_{sc} = 3$

Для определения установленных мощностей СГ и ПП обратимся к рис. 14, где представлена зависимость полной мощности системы и ее элементов от частоты ω^* при двух значениях коэффициента мощности нагрузки: $\cos \varphi = 0.8$ и $\cos \varphi = 1$. Здесь также найдены установленные мощности СГ и ПП для минимальной и максимальной рабочих частот. Выбирая из двух значений максимально возможных установленных мощностей для каждого из элементов системы, получим $S_{VS}^* = 1.271$, $S_G^* = 2.177$.

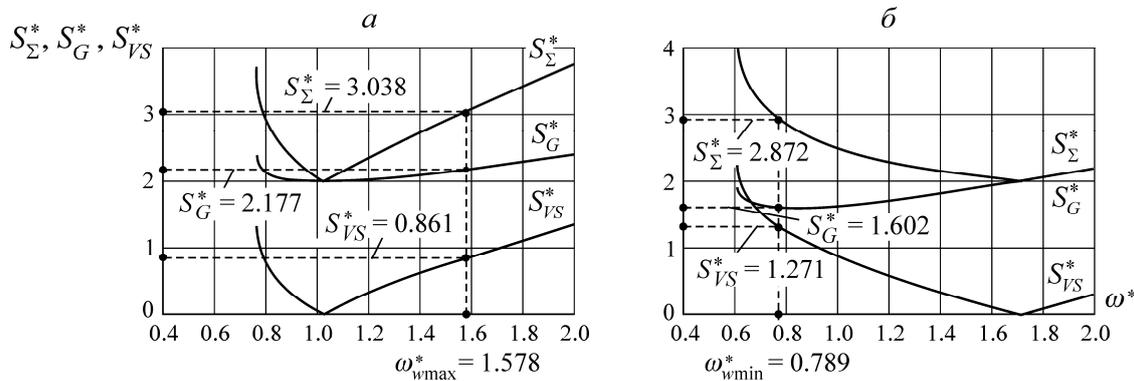


Рис. 14. Зависимость относительного значения полной мощности полупроводникового преобразователя (а) и синхронного генератора (б) от частоты ω^* ; $k_{sc} = 3$, $\cos \varphi = 1$

Следовательно, отношения установленной мощности полупроводникового преобразователя и синхронного генератора к максимальной мощности нагрузки составят соответственно:

$$\gamma_{VS} = \frac{S_{VS}}{S_{L\max}} = \frac{S_{VS}^*}{2} = 0.635, \quad \gamma_G = \frac{S_G}{S_{L\max}} = \frac{S_G^*}{2} = 1.089.$$

Значения γ_{VS} , γ_G и γ_Σ являются важными показателями при сопоставлении различных систем и способов стабилизации напряжения синхронного генератора. При выбранном рабочем диапазоне частот напряжения преобразователя и генератора изменяются в следующих пределах: $U_{VS}^* = 0 \div 1.74$, $U_G^* = 1 \div 2$.

Таким образом, рассмотренный способ выполняет функции по стабилизации выходного напряжения в диапазоне изменения частот, равном двум. Как следует из рис. 13 и 14, увеличение рабочего диапазона может повлечь увеличение установленной мощности полупроводникового преобразователя и синхронного генератора. Однако, если оставаться в одном классе напряжений изоляции и типов полупроводниковых приборов, это не приведет к значительному увеличению массы и стоимости системы, что следует отнести к преимуществу такого способа стабилизации. В качестве недостатка системы следует отметить необходимость вывода начала и конца фазных обмоток генератора, что увеличивает размеры клеммной колодки, а значит, и генератора в целом.

ВЫВОДЫ

Установлено, что стабильность выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе автономных систем электроснабжения с переменной выходной частотой может быть обеспечена за счет последовательного включения полупроводникового преобразователя, генерирующего реактивную мощность.

Определены ограничения использования данного способа стабилизации по минимальной частоте вращения вала генератора, что обусловлено физикой процесса стабилизации за счет регулирования реактивной мощности с помощью полупроводникового преобразователя. Так, при условии реализации в системе трехкратного относительно номинального значения тока короткого замыкания минимально возможная частота вращения, при которой обеспечивается стабилизация напряжения, не может быть меньше чем 0.6 номинальной частоты вращения.

Полученные аналитические выражения для напряжений, токов и мощностей полупроводникового преобразователя и синхронного генератора позволяют по заданному диапазону изменения частоты выходного напряжения, значению тока в режимах перегрузки и короткого замыкания, а также по характеру и значению нагрузки выбрать основные электрические параметры синхронного генератора и полупроводникового преобразователя, например ЭДС холостого хода и индуктивности по продольной и поперечной осям генератора, максимальное выходное напряжение, ток преобразователя, а также закон управления им, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения системы при изменении частоты вращения вала СГ, значения и характера нагрузки.

Для диапазона изменения частоты вращения вала синхронного генератора, равного двум, определены граничные частоты и минимально возможные установленные мощности синхронного генератора и полупроводникового преобразователя. Показано, что при двойной перегрузке относительно номинального режима отношения установленной мощности полупроводникового преобразователя и синхронного генератора к максимальной мощности нагрузки составят соответственно 0.635 и 1.089.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.cleantechinvestor.com/portal/fuel-cells/6422-mining-and-energy.html>
2. Харитонов С. А., Рябчицкий М. В., Воробьева С. В., Калинин В. В. Интеллектуальные системы электроснабжения для небольших населенных пунктов // Техн. электродинамика. Темат. вып. "Силовая электроника и энергоэффективность". — Киев: Ин-т электродинамики НАН, 2010. — Т. 2. — С. 32–37.
3. Kharitonov S., Riabchitsky M., and Vorobiova S. Smart grid for the small regions, Proc. of 2nd International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, Sibircon, 2010, Vol. 2. — P. 530–532.
4. Харитонов С. А., Рябчицкий М. В. Новое поколение автономных энергетических установок // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: тр. Всерос. науч.-практ. конф. — М. — 2010. — Т. 2. — С. 54–58.
5. 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. — С. 102–116.
6. Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Левин А. В., Юхнин М. М., Коняхин С. Ф. Система генерирования электроэнергии переменного тока при постоянной частоте вращения вала генератора // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2012. — № 4–5. — С. 2–8.

7. **Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Левин А. В., Коняхин С. Ф., Юхнин М. М.** О возможности стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами в системе генерирования электрической энергии летательного аппарата // *Авиац. пром-сть.* — 2012. — № 4. — С. 9–13.
8. **Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Левин А. В., Коняхин С. Ф., Юхнин М. М.** Расчет электрических параметров системы генерирования электроэнергии нестабильной частоты и стабильного напряжения // *Авиац. пром-сть.* — 2013. — № 1. — С. 3–10.
9. **Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Гарганеев А. Г.** Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке // *Докл. ТУСУР.* — 2012. — № 1(25). — С. 139–146.
10. **Харитонов С. А., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Левин А. В., Коняхин С. Ф., Юхнин М. М.** Авиационная система генерирования электроэнергии // *Науч. вестн. НГТУ.* — 2013. — № 1(50). — С. 147–162.
11. **Makarov D. V., Kharitonov S. A., Makarova E. A.** Generation system of electric energy of “variable speed–variable frequency–constant amplitude” type, micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), International Conference and Seminar, 2010. — P. 464–469.
12. **Makarov D. V., Khlebnikov A. S., Geist A. V., and Bachurin P. A.** Generation system with variable frequency and constant amplitude, *Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on*, 2011 — P. 1–9.
13. **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.
14. **Харитонов С. А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. — 536 с.
15. **Xiuxian X.** Dynamic Power Distribution Management for All Electric Aircraft, Cranfield University, 2011. — 114 p.
16. **Симонов Б. Ф., Харитонов С. А., Машинский В. В.** Мехатронная система “синхронный генератор–трехфазный мостовой выпрямитель” для автономных энергетических систем // *ФТПРПИ.* — 2012. — № 3. — С. 102–113.
17. **Иванов-Смоленский А. В.** Электрические машины: учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980. — 928 с.

Поступила в редакцию 15/Х 2015