

Авиационная система генерирования электроэнергии*

**С.А. ХАРИТОНОВ, Д.В. КОРОБКОВ, Д.В. МАКАРОВ, А.В. ЛЕВИН, С.Ф. КОНЯХИН,
М.М. ЮХНИН**

Анализируются три варианта проектирования авиационных систем генерирования электрической энергии не-стабильной частоты и стабильного напряжения на базе синхронного генератора с постоянными магнитами и параллельно включенного полупроводникового преобразователя с изменяющимся коэффициентом мощности. Показана возможность стабилизации напряжения синхронного генератора, определены основные энергетические величины и их зависимости от режимов работы системы.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты, переменная частота, регулирование напряжения, полупроводниковый преобразователь, коэффициент мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования снижения эксплуатационных расходов и повышения топливной эффективности летательных аппаратов и в первую очередь самолетов гражданской авиации в значительной мере стали влиять на технический облик многих бортовых систем и агрегатов.

Это сказалось и на самолетной электроэнергетике, где в качестве реакции на указанные выше требования наметился ряд тенденций, существенно определивших характер организации и построения современных бортовых систем электроснабжения (СЭС), а именно:

- перевод на электропитание ряда (а впоследствии и всех) бортовых систем, традиционно имеющих неэлектрическую (гидравлическую, пневматическую, механическую и др.) природу энергоснабжения;
- преимущественный отказ от имеющего, как правило, гидромеханическую основу привода постоянных оборотов и вращение первичных генераторов непосредственно от коробки силовых агрегатов (коробки приводов);
- увеличение установленной мощности СЭС и, соответственно, увеличение мощности первичных генераторов.

Вышеуказанные тенденции привели к внедрению на борту летательных аппаратов систем электроснабжения переменного тока нестабильной частоты, в частности, в соответствии с ГОСТ Р 54073–2010 для авиационных систем электроснабжения, допускающего изменение частоты переменного тока от 360 до 800 Гц при условии сохранения постоянства величины напряжения. В связи с реализацией концепции полностью электрический самолет – all electric aircraft (ПЭС), на борту ряда отечественных и зарубежных самолетов уже эксплуатируются подобные системы, например, на самолетах, типа Boeing–787 и А–380, АН–70 и др. [1].

Такие системы, как правило, строятся на базе трехкаскадных синхронных генераторов, где стабилизация напряжения осуществляется за счет регулирования тока в обмотке возбуждения генератора.

Однако существуют альтернативные варианты построения аналогичных по характеристикам систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ) [1]. В частности, представляется перспективным использование в подобных системах синхронных генераторов (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов.

* Статья получена 19 сентября 2012 г.

Известно, что данный тип СГ обладает определенными преимуществами, к которым можно отнести:

- отсутствие вращающихся контактов;
- уменьшение массогабаритных показателей агрегатов, расположенных непосредственно на авиадвигателе;
- возможность применения воздушного охлаждения;
- минимальные эксплуатационные расходы;
- возможность реализации режима электростартерного запуска;
- относительная простота конструкции и т. д.

Особенностью такого генератора является нестабильность выходного напряжения при изменении частоты вращения вала (n) и величины нагрузки. По этой причине данный тип СГ применяется в составе мехатронных систем, содержащих полупроводниковый преобразователь (ПП).

В настоящее время широко известно использование систем генерирования с последовательным включением полупроводникового преобразователя (рис. 1).

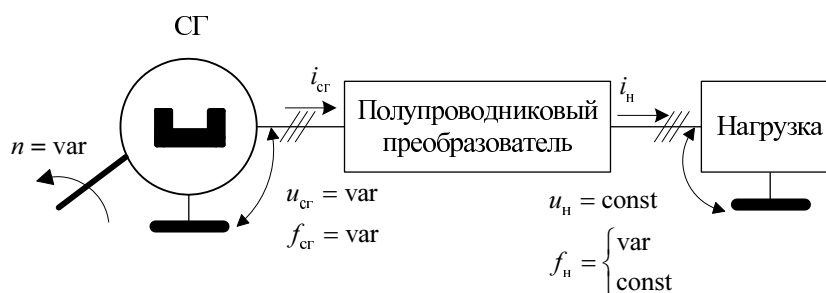


Рис. 1. Система генерирования с последовательным полупроводниковым преобразователем

При таком построении системы генерирования величина, частота и качественные показатели напряжения на нагрузке ($u_{\text{н}}$) определяются полупроводниковым преобразователем, при этом величина напряжения СГ ($u_{\text{сг}}$) является переменной и зависит от изменения частоты вращения вала (n) и величины нагрузки. Частота выходного напряжения ($f_{\text{н}}$) является постоянной.

Системы с постоянной частотой напряжения на нагрузке и переменной частотой вращения вала получили название «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ). Схематически системы данного типа строятся либо на базе преобразователей с непосредственной связью (циклоконвертеры, матричные преобразователи), либо со звеном постоянного тока (выпрямитель с инвертором напряжения или тока), причем полупроводниковый преобразователь должен быть рассчитан на величину тока короткого замыкания нагрузки, который, как известно, в авиационных системах электроснабжения должна быть в три раза больше номинального тока нагрузки. В настоящее время в эксплуатации находятся системы типа ПСПЧ на мощность до 75 кВА, которые используются как в виде основной (F/A-18; VD-90), так и в виде аварийных систем электроснабжения (B-777, Ту-214СР/ПУ, Ту-204СМ). В стадии проектирования находится система типа ПСПЧ на мощность порядка 150 кВА со стартерным запуском авиадвигателя.

В данной статье рассматривается система генерирования переменного тока с параллельным включением преобразователя (рис. 2). При таком построении СГЭЭ частота напряжения на нагрузке определяется СГ, а величина и качественные показатели этого напряжения определяются совокупностью параметров СГ и ПП. Такая система может быть использована в случае, когда нет ограничений на стабильность частоты выходного напряжения, причем к очевидным достоинствам этого типа СГЭЭ можно отнести не критичность ПП к режимам короткого замыкания в нагрузке, что уменьшает ее массогабаритные показатели по сравнению с «классической» системой ПСПЧ.

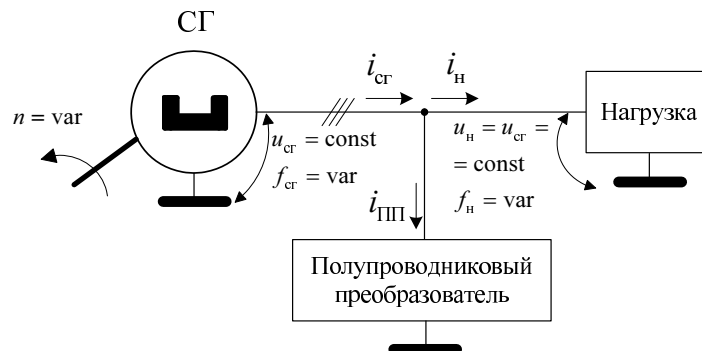


Рис. 2. Система генерирования с параллельным полупроводниковым преобразователем

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СГЭЭ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Принцип стабилизации напряжения в СГЭЭ с параллельным ПП основан на том, что с помощью полупроводникового преобразователя генерируется синусоидальный ток ($I_{ПП}$), сдвинутый по фазе относительно напряжения СГ ($\varphi_{ПП}$) на угол $\pm \pi/2$ [4]. В этом случае за счет реакции якоря происходит увеличение или уменьшение суммарного магнитного потока СГ. На рис. 3 с помощью векторных диаграмм для случая линейной магнитной системы СГ, не имеющего демпферных контуров, наглядно иллюстрируется принцип работы системы.

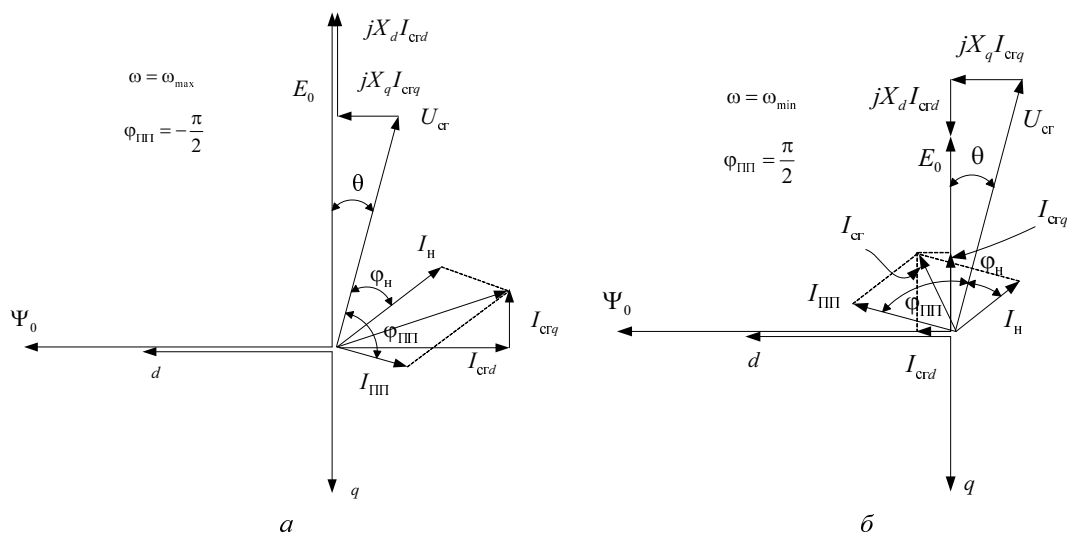


Рис. 3. Векторная диаграмма системы генерирования

Рис. 3, а характеризует режим работы СГЭЭ на максимальной частоте напряжения СГ ($\omega = \omega_{\max}$)¹, что соответствует максимальной частоте вращения вала СГ ($n = n_{\max}$). Рис. 3, б представляет режим с минимальной частотой ($n = n_{\min}$, $\omega = \omega_{\min}$). Данные рисунки характеризуют работу системы при наличии нагрузки с отрицательным углом сдвига ($\varphi_n < 0$) между током (I_n) и напряжением ($U_n = U_{cr}$) нагрузки. Векторные диаграммы построены во вра-

¹ Здесь и далее под частотой напряжения СГ понимается циклическая частота.

щающейся с частотой ω системе координат dq [2]. Здесь Ψ_0, E_0 – потокосцепление от постоянных магнитов и ЭДС холостого хода; X_d, X_q – индуктивные сопротивления СГ по продольной и поперечной осям; $I_{сг}, I_{сгd}, I_{сгq}$ – ток СГ и его проекции на d и q оси.

В рассматриваемой системе возможны три варианта проектирования параметров и способа управления СГЭЭ, их удобно идентифицировать с помощью рис. 4², где качественно показан характер изменения основных электрических величин.

При реализации варианта 1 (рис. 4, а) номинальный режим СГ по напряжению выбирается в начале диапазона изменения частоты вращения ($n_{\min}$), что соответствует минимальной частоте напряжения СГ ($\omega_{\min}$). В этом случае ПП генерирует по отношению к напряжению СГ индуктивный характер тока ($\varphi_{\text{ПП}} = -\pi/2$). Величина этого тока возрастает с увеличением частоты вращения и изменяется при варьировании величины и характера тока нагрузки.

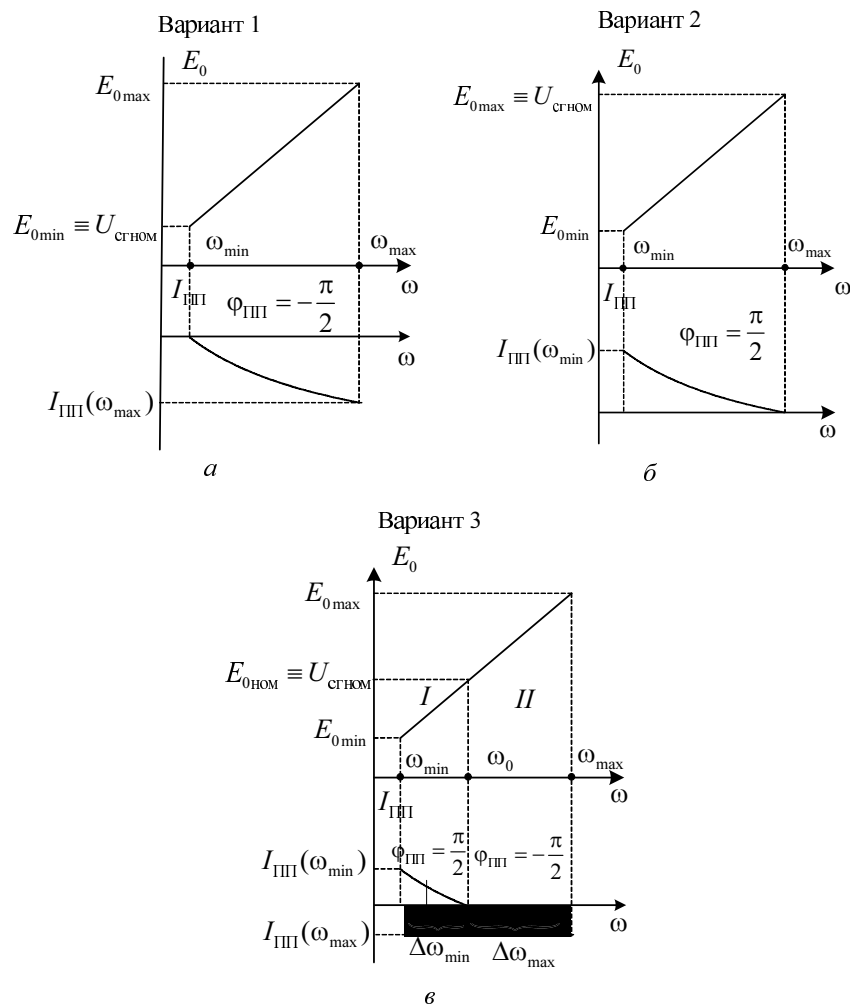


Рис. 4. Три варианта проектирования параметров и способа управления СГЭЭ

При реализации варианта 2 (рис. 4, б) номинальный режим СГ по напряжению выбирается в конце диапазона изменения частоты вращения ($n_{\max}$), что соответствует максимальной

² Нумерация вариантов сложилась исторически по мере их практической реализации.

частоте напряжения СГ ($\omega_{\max}$). В этом случае ПП генерирует по отношению к напряжению СГ емкостной характер тока ($\varphi_{\text{ПП}} = \pi/2$). Величина этого тока возрастает с уменьшением частоты вращения и изменяется при варьировании величины и характера тока нагрузки.

Вариант 3 (рис. 4, в) представляет наиболее общий вариант построения СГЭЭ, когда СГ и ПП проектируются из условия обеспечения номинального режима системы по нагрузке при $I_{\text{ПП}} = 0$ не на границах, а внутри диапазона изменения частоты вращения вала ($\omega = \omega_0$). В этом случае ПП в первом диапазоне частот ($\omega_0 - \omega_{\min}$) генерирует емкостной ($\varphi_{\text{ПП}} = \pi/2$) по отношению к напряжению СГ характер тока $I_{\text{ПП}}$, а во втором диапазоне ($\omega_{\max} - \omega_0$) генерирует индуктивный по отношению к напряжению СГ характер тока ($\varphi_{\text{ПП}} = -\pi/2$).

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СГЭЭ

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- анализу подлежит статический режим;
- магнитная система СГ ненасыщенна и линейна;
- нагрузка СГЭЭ симметричная;
- скорость изменения частоты вращения ротора СГ намного меньше частоты генерируемого напряжения;
- полупроводниковый преобразователь работает с высокочастотной ШИМ, частота которой намного выше частоты генерируемого напряжения;
- анализ электромагнитных процессов проводится по основным гармоникам тока и напряжения СЭЭ;
- СГ не имеет успокоительных контуров;
- магнитные сопротивления СГ по продольной и поперечной осям отличаются незначительно;
- ЭДС генератора изменяется по синусоидальному закону, её амплитуда и частота пропорциональны частоте вращения n ;
- выполняются условия теоремы о постоянстве потокосцеплений [2];
- вентили ПП идеальны.

Будем полагать, что преобразователь за счет внутренних возможностей регулирования работает в режиме источника трехфазного синусоидального тока $i_{\text{ПП}}$. Учитывая сделанные допущения, примем, что $L_d \approx L_q = L$, где L_d и L_q – индуктивности СГ по продольной и поперечной осям соответственно.

Без учета активных потерь в генераторе, а также высокочастотных гармоник в токе преобразователя, используя символический метод расчета, принимая напряжение на нагрузке равным номинальному напряжению ($U_{\text{H}} = U_{\text{H ном}}$), получим следующую схему замещения одной фазы СГЭЭ (рис. 5).

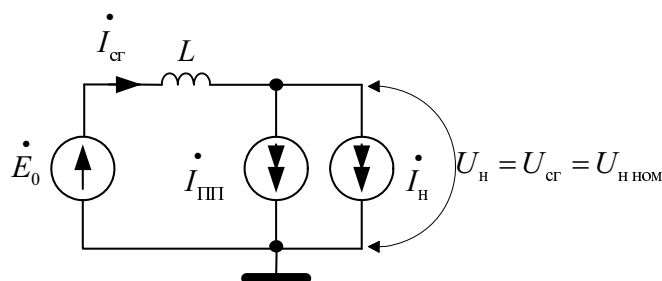


Рис. 5. Схема замещения одной фазы СГЭЭ

Здесь $\dot{E}_0 = E_0 e^{j\theta}$, $E_0 \equiv \omega$ – эффективное значение ЭДС холостого хода генератора, θ – угол сдвига ЭДС холостого хода генератора относительно напряжения на нагрузке, $\dot{I}_{\text{ПП}} = I_{\text{ПП}} e^{\pm j\frac{\pi}{2}} = \pm j I_{\text{ПП}}$, $\dot{I}_{\text{H}} = I_{\text{H}} \cos \varphi_{\text{H}} + j I_{\text{H}} \sin \varphi_{\text{H}}$, $j = \sqrt{-1}$, $I_{\text{ПП}}$, I_{H} – эффективное значение токов ПП и нагрузки, φ_{H} – угол сдвига между током и напряжением на нагрузке, $U_{\text{H}} = U_{\text{сГ}}$ – эффективное значение выходного напряжения на нагрузке, равное напряжению СГ.

Для общности полученных результатов воспользуемся относительными единицами, которые будем обозначать x^* . В качестве базовых величин примем номинальное напряжение и ток нагрузки: $U_{\text{б}} = U_{\text{H ном}}$, $I_{\text{б}} = I_{\text{H ном}}$, тогда $S_{\text{б}} = U_{\text{б}} I_{\text{б}}$ – базовое значение мощности, в качестве базового значения частоты примем минимальную циклическую частоту напряжения СГ $\omega_{\text{б}} = \omega_{\text{min}}$. Введем понятие диапазона изменения частоты вращения вала генератора $D = n_{\text{max}} / n_{\text{min}} = \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}}$ и тока короткого замыкания СГ $I_{\text{кз}} = E_0 / \omega L$ (учитывая принятые допущения и то, что $E_0 \equiv \omega$, данный ток не будет зависеть от частоты вращения).

Используя схему замещения (рис. 5), получим следующее соотношение для определения в относительных единицах величины E_0^*

$$E_0^* = E_{0\text{min}}^* \omega^* = \left\{ \left[1 + \left(\frac{I_{\text{H}}^*}{I_{\text{кз}}^*} \sin \varphi_{\text{H}} \mp \frac{I_{\text{ПП}}^*}{I_{\text{кз}}^*} \right) E_{0\text{min}}^* \omega^* \right]^2 + \left(\frac{I_{\text{H}}^*}{I_{\text{кз}}^*} \cos \varphi_{\text{H}} E_{0\text{min}}^* \omega^* \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $E_{0\text{min}}^*$ – относительное значение ЭДС СГ при минимальной частоте $\omega = \omega_{\text{min}}$.

Из соотношения (1) получим выражение для тока ПП, при котором обеспечивается равенство $U_{\text{сГ}} = U_{\text{H ном}}$.

$$I_{\text{ПП}}^* (\omega^*) = \mp \left[\sqrt{\left(I_{\text{кз}}^* \right)^2 - \left(I_{\text{H}}^* \cos \varphi_{\text{H}} \right)^2} - I_{\text{кз}}^* / E_{0\text{min}}^* \omega^* - I_{\text{H}}^* \sin \varphi_{\text{H}} \right]. \quad (2)$$

При этом ток генератора будет определяться с помощью соотношения

$$I_{\text{сГ}}^* (\omega^*) = \sqrt{\left[I_{\text{ПП}}^* (\omega^*) + I_{\text{H}}^* \sin \varphi \right]^2 + \left(I_{\text{H}}^* \cos \varphi \right)^2}. \quad (3)$$

3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СГЭЭ

Токи и напряжения в системе зависят от выбранного варианта проектирования и способа управления. Анализ процессов в системе при том или ином варианте проведем в порядке их нумерации.

При определении параметров системы будем считать заданными, кроме номинальных параметров нагрузки, также диапазон частот (D), минимальную или максимальную частоту (ω_{min} , ω_{max}), минимальное значение тока короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$), максимальный ток нагрузки и коэффициент сдвига в режиме перегрузки СГЭЭ ($I_{\text{H max}}$, $\cos \varphi_{\text{H}}$). Искомые ве-

личинами являются: зависимость тока ПП от частоты ($I_{\text{ПП}}(\omega)$) и его максимальное значение ($I_{\text{ППmax}}$), ЭДС генератора на минимальной частоте ($E_{0\min}$), а также максимальные установленные мощности генератора и преобразователя.

Вариант 1

Исходя из определения данного варианта, величина ЭДС холостого хода генератора ($E_{0\min}$) выбирается при $\omega = \omega_{\min}$ в режиме максимального тока нагрузки ($I_{\text{H}}^* = I_{\text{Hmax}}^*$), при этом ток ПП равен нулю ($I_{\text{ПП}}^*(\omega_{\min}^*) = 0$). Используя соотношение (1) при вышеуказанных условиях получим следующее соотношение для определения величины $E_{0\min}^*$

$$E_{0\min}^* = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{Hmax}}^* \cos \varphi_{\text{H}}}{I_{\text{КЗ}}^*} \right)^2} - \frac{I_{\text{Hmax}}^* \sin \varphi_{\text{H}}}{I_{\text{КЗ}}^*} \right]^{-1}. \quad (4)$$

При $\omega = \omega_{\max}$ в режиме холостого хода СГЭЭ очевидно $E_{0\max}^* = DE_{0\min}^*$, при этом ток ПП должен иметь максимальное значение ($I_{\text{ПП}}^* = I_{\text{ППmax}}^*$), учитывая это, из (2) получим

$$I_{\text{ППmax}}^* = I_{\text{КЗ}}^* \frac{E_{0\min}^* - 1/D}{E_{0\min}^*}. \quad (5)$$

В авиационных системах генерирования, как правило, $1 < D \leq 2$, а $I_{\text{КЗ}}^* > 3$, с учетом этого на рис. 6 представлена зависимость $E_{0\min}^*$ и $I_{\text{ППmax}}^*$ от величин I_{Hmax}^* , D и $I_{\text{КЗ}}^*$.

График рис. 6, а показывает, какую величину ЭДС генератора необходимо выбрать при $\omega = \omega_{\min}$, чтобы для заданного тока нагрузки обеспечить напряжение $U_{\text{H}} = U_{\text{Hном}}$. Из рис. 6, б-г следует, что при индуктивном характере нагрузки требуется большая величина тока ПП для обеспечения стабильности напряжения СГ, что объясняется необходимостью выбора большей величины ЭДС $E_{0\min}$ из условия $\cos \varphi_{\text{H}} < 1$. Расчеты показывают, что для $I_{\text{КЗ}}^* = 3$, $D = 2$ и $I_{\text{Hmax}}^* = 1.5$, максимальное значение тока ПП должно быть $I_{\text{ППmax}} \geq 2.1 I_{\text{Hном}}$.

Зависимость тока ПП ($I_{\text{ПП}}^*$) от изменения частоты ω^* , величины и характера тока нагрузки при заданной величине $E_{0\min}^*$ определяется согласно (2) соотношением вида:

$$I_{\text{ПП}}^* = \sqrt{\left(I_{\text{КЗ}}^* \right)^2 - \left(I_{\text{H}}^* \cos \varphi_{\text{H}} \right)^2} - I_{\text{H}}^* \sin \varphi_{\text{H}} - I_{\text{КЗ}}^* / E_{0\min}^* \omega^*, \quad (6)$$

а зависимость тока $I_{\text{СГ}}^*$ от тех же величин можно найти из соотношения (3). На рис. 7 приведена зависимость тока ПП и СГ от значения частоты вращения при условии постоянства тока нагрузки $I_{\text{H}}^* = 1.5$. Как следует из рис. 7, ток генератора в СГЭЭ при $I_{\text{КЗ}}^* = 4$, $D = 2$ равен величине $I_{\text{СГmax}}^* = 2.65$.

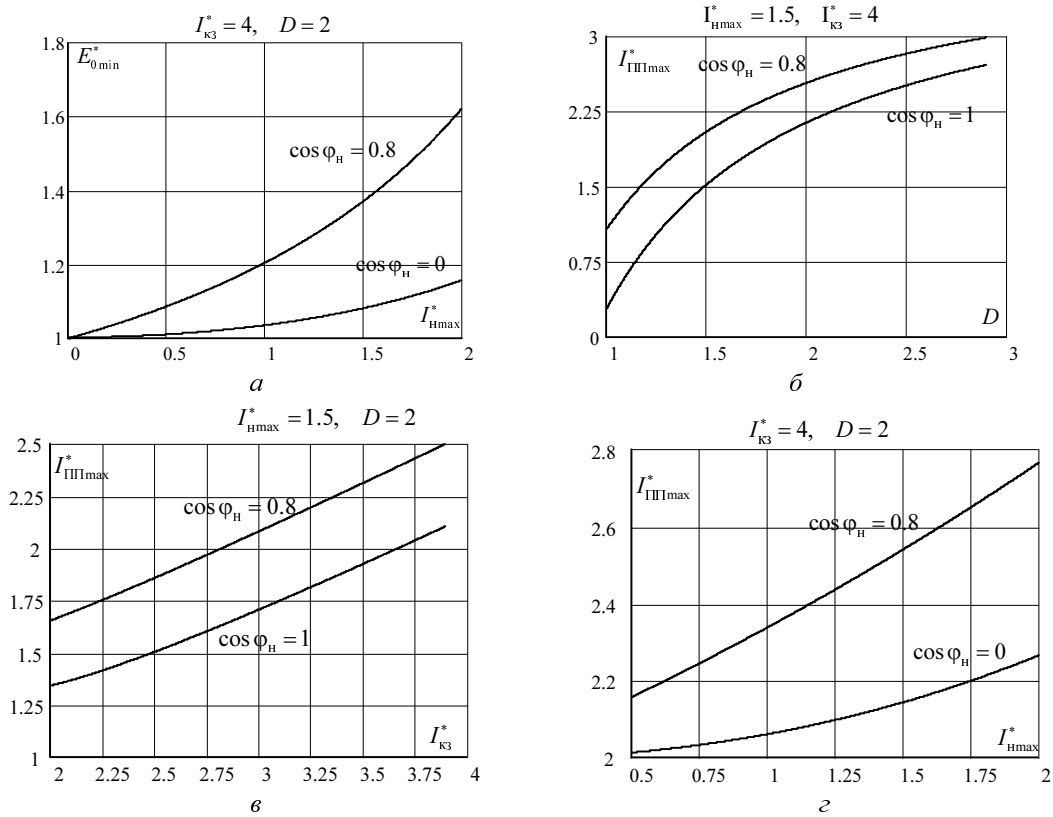


Рис. 6. Зависимости ЭДС СГ и токов ПП от режимов работы системы

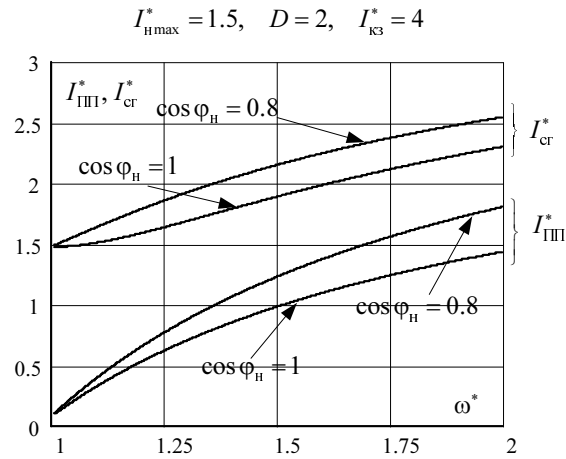


Рис. 7. Зависимость тока СГ и ПП от частоты

Значение максимальной установленной мощности СГ и ПП $(S_{сг\max}^*, S_{ПП\max}^*)$ определим относительно максимальной мощности нагрузки с помощью соотношений

$$S_{сг\max}^* = \frac{3I_{сг\max}^* U_H}{3I_{H\max} U_{H\text{ном}}} = \frac{I_{сг\max}^*}{I_{H\max}^*}; \quad S_{ПП\max}^* = \frac{3I_{ПП\max}^* U_H}{3I_{H\max} U_{H\text{ном}}} = \frac{I_{ПП\max}^*}{I_{H\max}^*}. \quad (7)$$

Зависимость величин $S_{\text{сг max}}^*$, $S_{\text{пп max}}^*$ от тока короткого замыкания СГ представлена на рис. 8.

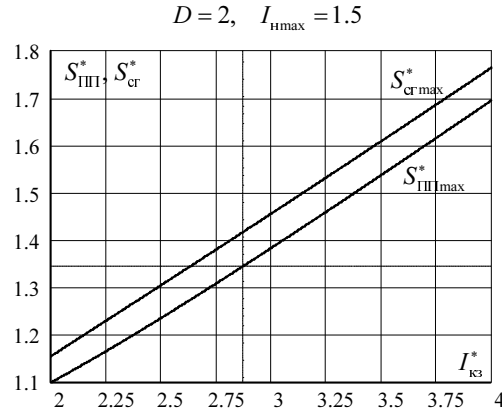


Рис. 8. Зависимость максимальной установленной мощности СГ и ПП от тока короткого замыкания

Как следует из рис. 8, максимальные установленные мощности СГ и ПП для $I_{\text{кз}}^* = 4$, $D = 2$ и $I_{\text{н max}}^* = 1.5$ будут равны: $S_{\text{сг max}} = 1.76 S_{\text{н max}}$, $S_{\text{пп max}} = 1.69 S_{\text{н max}}$.

Вариант 2

В данном варианте ЭДС СГ выбирается исходя из режима холостого хода при $\omega = \omega_{\text{max}}$ из условия $E_{0\text{max}}^* = 1$, в этом случае при $\omega = \omega_{\text{min}}$ получим $E_{0\text{min}}^* = 1/D$.

Максимальное значение тока ПП определяется из режима $\omega = \omega_{\text{min}}$ при максимальном токе нагрузки ($I_{\text{н}} = I_{\text{н max}}$) из соотношения (2):

$$I_{\text{пп max}}^* = I_{\text{кз}}^* D + I_{\text{н max}}^* \sin \varphi_{\text{н}} - \sqrt{\left(I_{\text{кз}}^*\right)^2 - \left(I_{\text{н max}}^* \cos \varphi_{\text{н}}\right)^2}.$$

Зависимость относительного значения тока ПП ($I_{\text{пп}}^*$) от изменения частоты ω^* , величины и характера тока нагрузки определяется соотношением вида:

$$I_{\text{пп}}^* = I_{\text{кз}}^* D \omega^* + I_{\text{н}}^* \sin \varphi_{\text{н}} - \sqrt{\left(I_{\text{кз}}^*\right)^2 - \left(I_{\text{н}}^* \cos \varphi_{\text{н}}\right)^2}.$$

Аналогичная зависимость тока СГ ($I_{\text{сг}}^*$) описывается соотношением (3).

Относительные значения максимальной мощности СГ и ПП ($S_{\text{сг}}^*$, $S_{\text{пп}}^*$) определяются с помощью соотношения (7) при $\omega = \omega_{\text{min}}$.

На рис. 9 приведена зависимость тока ПП от диапазона частот вращения и величины тока короткого замыкания СГ для двух значений коэффициента мощности нагрузки. Как следует из этих графиков, данный вариант построения системы требует существенно большего значения тока ПП, чем вариант 1. Отчасти это объясняется тем, что приходится компенсировать уменьшение напряжения СГ, вызванного током нагрузки.

На рис. 10 показано, как изменяется ток ПП и СГ при изменении частоты вращения вала генератора при двух значениях коэффициента мощности нагрузки. Как следует из этого графика, ток генератора практически полностью определяется величиной тока ПП.

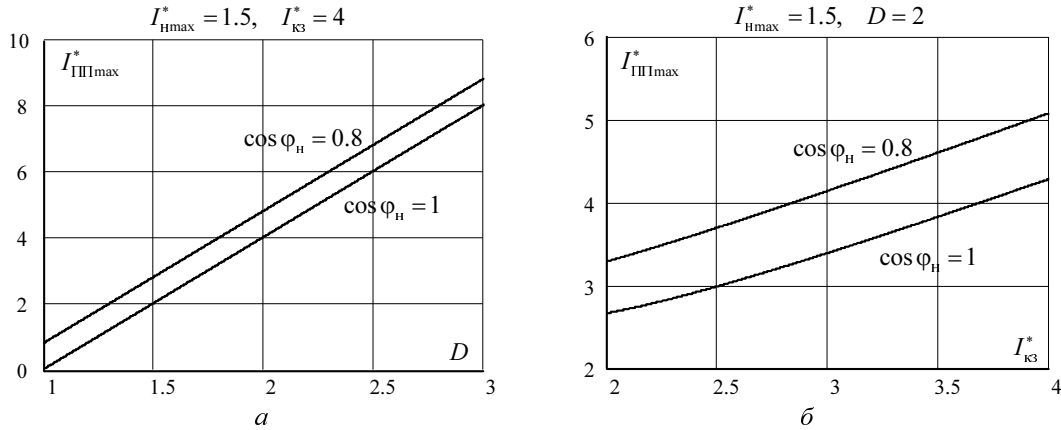


Рис. 9. Зависимость тока ПП от диапазона частот вращения и величины тока короткого замыкания

Рис. 11 иллюстрирует, как зависят максимальные установленные мощности СГ и ПП от величины тока короткого замыкания. Значения $S_{СГmax}^*$, $S_{ППmax}^*$ определены по соотношению (7).

Вариант 2 построения системы при больших диапазонах частоты вращения вала СГ значительно уступает по величине тока ПП, максимальной установленной мощности преобразователя и генератора варианту 1. Как следует из рис. 11, максимальные установленные мощности СГ и ПП для $I_{K3}^* = 4$, $D = 2$ и $I_{Hmax}^* = 1.5$ будут равны: $S_{СГmax}^* = 4.07 S_{Hmax}$, $S_{ППmax}^* = 3.39 S_{Hmax}$.

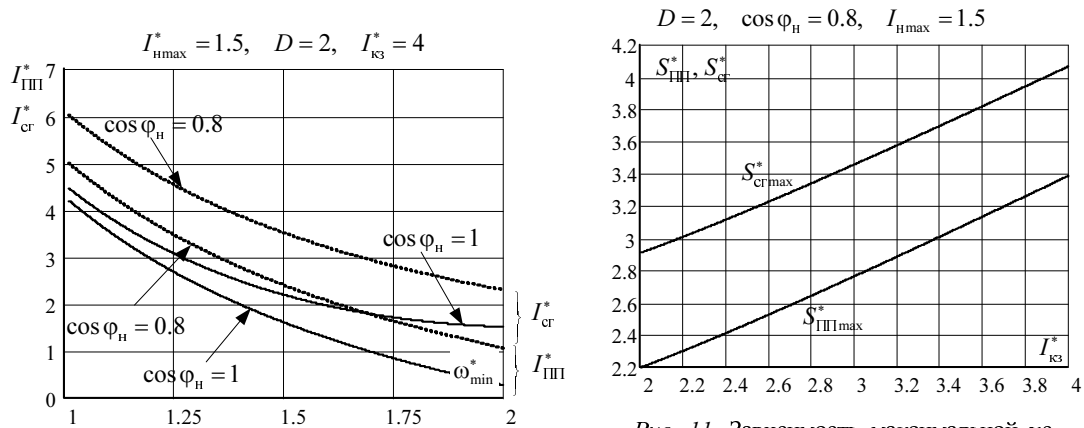


Рис. 10. Зависимость тока ПП и СГ от частоты

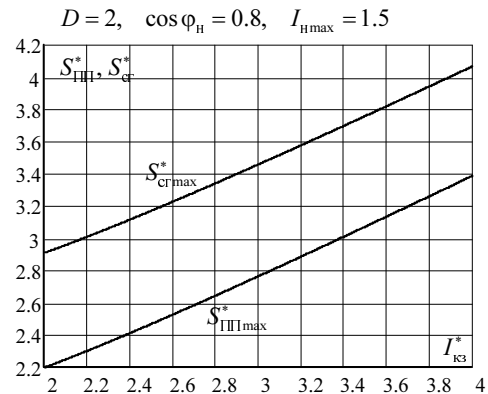


Рис. 11. Зависимость максимальной установленной мощности СГ и ПП от тока короткого замыкания

Рис. 12 показывает зависимость диапазона частот от величины тока короткого замыкания, в котором величина тока ПП не превышает номинального значения тока нагрузки.

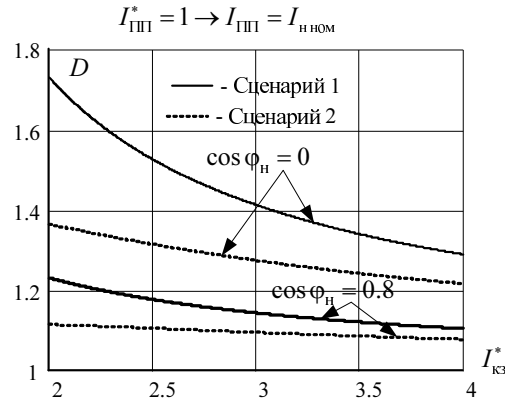


Рис. 12. Зависимость диапазона частот от величины тока короткого замыкания, в котором ток ПП не превышает номинального значения тока нагрузки

Как следует из рис. 12, для $D \leq 1.15$ в случае первого варианта и для $D \leq 1.1$ во втором варианте, ток преобразователя не превышает величины $I_{н ном}$ при условии, что $I_{н max} = I_{н ном}$. В том случае, если $I_{н max} = 1.5I_{н ном}$, ток ПП не превышает величины $1.5I_{н ном}$ для $D \leq 1.24$ в обоих вариантах.

Вариант 3

Исходя из принципа работы системы, в данном варианте максимальное значение тока преобразователя следует искать на краях частотного диапазона, то есть при $\omega = \omega_{min}$ и $\omega = \omega_{max}$:

$$\begin{cases} I_{ПП}^*(\omega_{min}^*) = \frac{I_{кз}^*}{E_{0min}^*} + I_H^* \sin \varphi_H - \sqrt{(I_{кз}^*)^2 - (I_H^* \cos \varphi_H)^2}, \\ I_{ПП}^*(\omega_{max}^*) = \sqrt{(I_{кз}^*)^2 - (I_H^* \cos \varphi_H)^2} - \frac{I_{кз}^*}{E_{0min}^* D} - I_H^* \sin \varphi_H. \end{cases} \quad (8)$$

Как следует из векторной диаграммы рис. 3, максимальное значение тока ПП при $\omega = \omega_{min}$ будет иметь место при $I_H = I_{н max}$ и $\cos \varphi_H < 1$ (обозначим его как I_{max+}^*); максимальное значение тока ПП при $\omega = \omega_{max}$ будет наблюдаться в режиме холостого хода (обозначим его как I_{max-}^*). Тогда, с учетом (8), получим

$$\begin{cases} I_{max+}^* = \frac{I_{кз}^*}{E_{0min}^*} + I_{н max}^* \sin \varphi_H - \sqrt{(I_{кз}^*)^2 - (I_{н max}^* \cos \varphi_H)^2}, \\ I_{max-}^* = I_{кз}^* \left(1 - \frac{1}{E_{0min}^* D} \right). \end{cases} \quad (9)$$

Так как емкостной ($I_{\max+}^*$) и индуктивный ($I_{\max-}^*$) токи формируются одним преобразователем, логично в качестве критерия проектирования принять равенство

$$I_{\max+}^* = I_{\max-}^* = I_{\text{ПП}\max}^* . \quad (10)$$

Отсюда получим выражение для определения $E_{0\min}^*$

$$E_{0\min}^* = \frac{1+D}{D} \left[1 - \frac{I_{\text{н}\max}^*}{I_{\text{кз}}^*} \sin \varphi_{\text{н}} + \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{н}\max}^*}{I_{\text{кз}}^*} \cos \varphi_{\text{н}} \right)^2} \right]^{-1} . \quad (11)$$

На рис. 13 представлена зависимость $E_{0\min}^*(I_{\text{н}\max})$ для различных значений $\cos \varphi_{\text{н}}$, данный график показывает, какую величину ЭДС генератора необходимо выбрать при $\omega = \omega_{\min}$, чтобы для $I_{\text{н}}^* = I_{\text{н}\max}^*$ обеспечивалось равенство $U_{\text{н}} = U_{\text{нном}}$ при условии $I_{\max+}^* = I_{\max-}^*$.

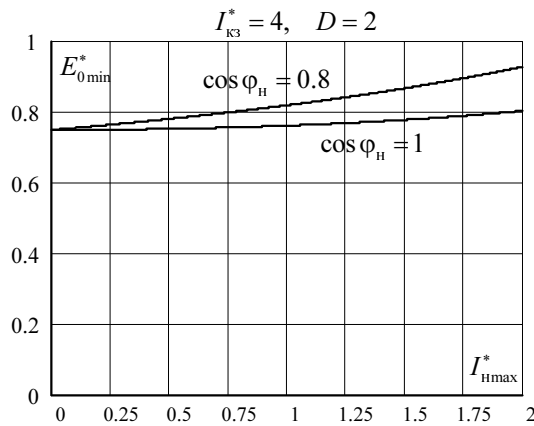


Рис. 13. Зависимость минимального значения ЭДС СГ от максимального тока нагрузки

Из (9)–(11) получим выражение для максимального тока ПП:

$$I_{\text{ПП}\max}^* = I_{\text{кз}}^* \left[\frac{D}{1+D} + \frac{1}{1+D} \frac{I_{\text{н}\max}^*}{I_{\text{кз}}^*} \sin \varphi_{\text{н}} - \frac{1}{1+D} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{н}\max}^*}{I_{\text{кз}}^*} \cos \varphi_{\text{н}} \right)^2} \right] . \quad (12)$$

Зависимость тока $I_{\text{ПП}\max}^*$ от величины диапазона (D) и тока короткого замыкания ($I_{\text{кз}}^*$) приведена на рис. 14. Характер зависимостей достаточно очевиден, важными являются численные оценки, проведенные с помощью соотношения (12). Так можно сделать вывод, что при $I_{\text{кз}}^* \approx 3$ в диапазоне $D < 2$ максимальный ток ПП примерно ограничен величиной тока нагрузки $I_{\text{н}\max}^*$, а при $D \leq 1.4$ выполняется неравенство $I_{\text{ПП}\max}^* < 1$, т. е. максимальный ток преобразователя не превышает номинальный ток нагрузки.

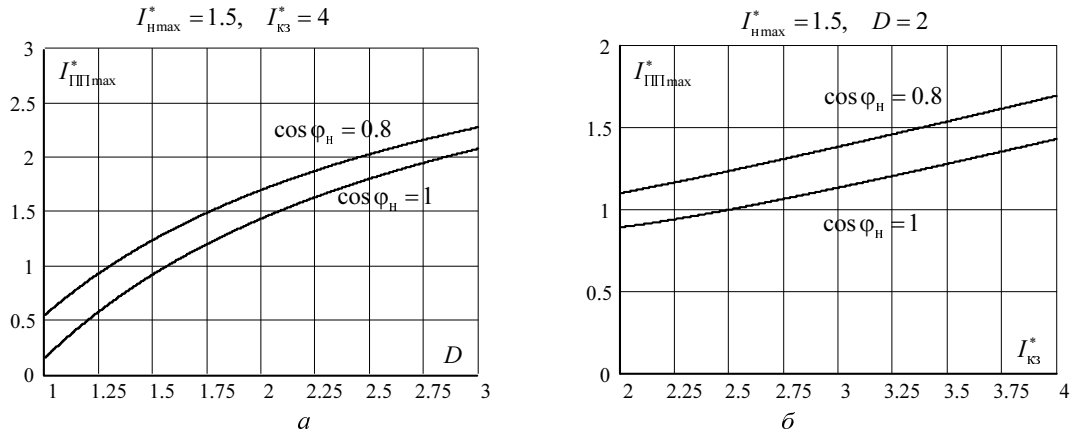


Рис. 14. Зависимость тока ПП от величины диапазона частот и тока короткого замыкания

Частота (ω_0^*) , при которой ток ПП становится равным нулю, определяется из соотношения

$$\omega_0^* = \frac{D}{1+D} \left\{ 1 + \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \cos \varphi_H \right)^2} - \frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \sin \varphi_H \right]^{-1} \right\}. \quad (13)$$

При проектировании ПП полезным является знание диапазонов частот $\Delta\omega_{\min}^* = \omega_0^* - \omega_{\min}^*$ и $\Delta\omega_{\max}^* = \omega_{\max}^* - \omega_0^*$, так как время нахождения в том или ином диапазоне определяют ресурс и тепловой режим элементов полупроводникового преобразователя.

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\omega_{\min}^* &= \frac{1}{1+D} \left\{ D \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \cos \varphi_H \right)^2} - \frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \sin \varphi_H \right]^{-1} - 1 \right\}, \\ \Delta\omega_{\max}^* &= \frac{D}{1+D} \left\{ D - \left[\sqrt{1 - \left(\frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \cos \varphi_H \right)^2} - \frac{I_{n\max}^*}{I_{kz}^*} \sin \varphi_H \right]^{-1} \right\}. \end{aligned} \right.$$

Далее для случая $I_{\max+}^* = I_{\max-}^* = I_{\max}^*$ приводятся графики зависимостей искомых электрических величин от режимов работы системы.

На рис. 15 приведены зависимости частоты ω_0^* (рис. 16, а) и диапазонов частот $\Delta\omega_{\min}^*$ и $\Delta\omega_{\max}^*$ (рис. 16, б) от величины тока в нагрузке для двух значений $\cos \varphi_H$. Как следует из этих графиков, с увеличением тока нагрузки и уменьшением $\cos \varphi_H$ происходит расширение частотного диапазона, в котором ПП работает в качестве источника емкостного тока. В диапазоне токов нагрузки $I_{н\text{ном}} < I_H \leq I_{н\text{max}}$ значение частоты ω_0^* близко к центру диапазона D , т. е. происходит примерное выравнивание диапазонов частот $\Delta\omega_{\min}^*$ и $\Delta\omega_{\max}^*$.

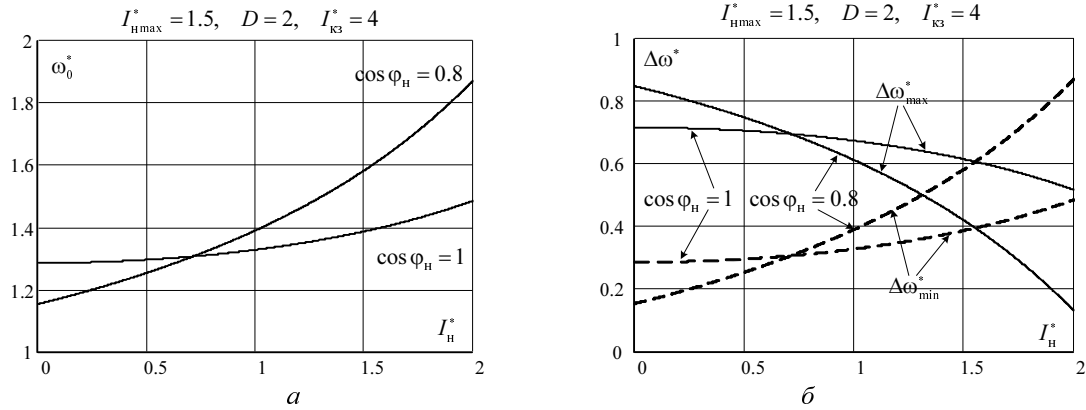


Рис. 15. Зависимость частоты ω_0^* и диапазонов частот $\Delta\omega_{\min}^*$ и $\Delta\omega_{\max}^*$ от тока нагрузки

Зависимость токов ПП и СГ для двух значений $\cos \varphi_n$ от частоты ω^* приведена на рис. 16. Как следует из рис. 16, б, максимальный ток генератора ($I_{CГ\max}^*$) имеет место при $\omega^* = \omega_{\min}^*$ и $\cos \varphi_n = 1$. Расчеты и рис. 16, б показывают, что при $I_{K3}^* \approx 4$ $D = 2$ максимальный ток генератора при параллельно работающем ПП не превышает $1.37 I_{H\max}^*$, а при $D < 1.2$ выполняется неравенство $I_{CГ\max}^* \leq I_{H\max}^*$.

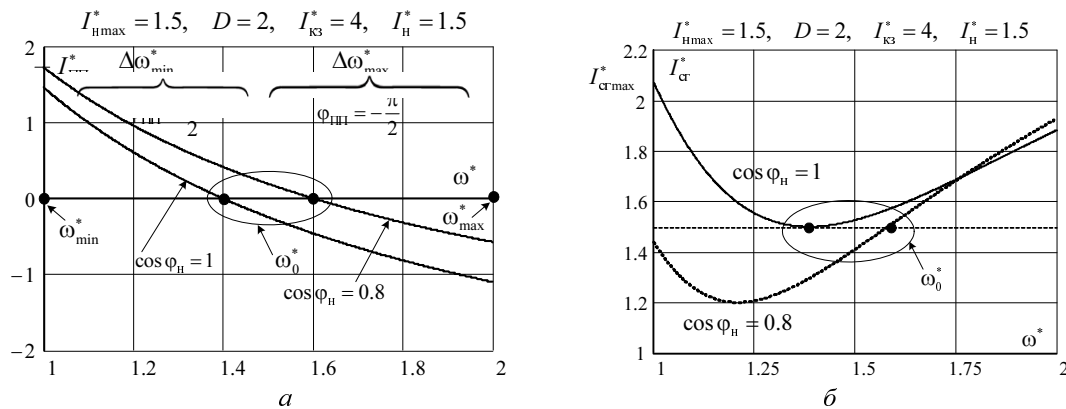


Рис. 16. Зависимость токов ПП и СГ от частоты ω^*

На рис. 17 представлена зависимость $S_{CГ\max}^*$, $S_{ПП\max}^*$ от величины тока короткого замыкания и диапазона частот D . Как следует из этих графиков, а также результатов расчетов для тока $I_{K3}^* = 4$ и $D = 2$, установленные мощности будут иметь значение $S_{CГ\max}^* = 1.38$, $S_{ПП\max}^* = 1.13$, а при $D = 1.2$ будем иметь $S_{CГ\max}^* = 1.053$, $S_{ПП\max}^* = 0.57$.

Таким образом, СГЭЭ с параллельным вариантом включения преобразователя с целью стабилизации напряжения СГ с постоянными магнитами при переменной частоте вращения вала имеет относительно низкую установленную мощность полупроводникового преобразователя.

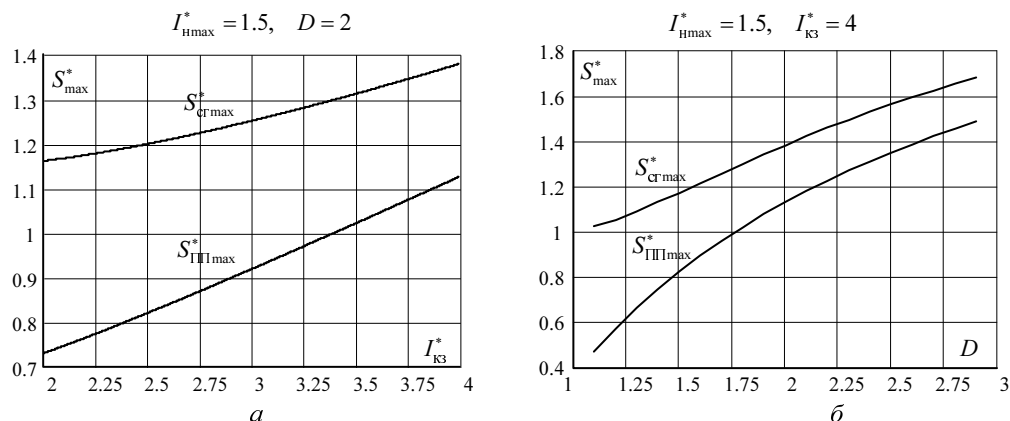


Рис. 17. Зависимость максимальной установленной мощности СГ и ПП от величины тока короткого замыкания и диапазона частот

Универсальной схемой полупроводникового преобразователя для рассматриваемого типа СГЭЭ, обеспечивающей все варианты проектирования и способы управления является схема инвертора напряжения (ИН) [3, 4], работающая с высокочастотной ШИМ в обратном режиме (рис. 18). Для обеспечения емкостного характера тока $I_{ПТ}$ напряжение на конденсаторах C_{ϕ} должно быть больше величины $1.17U_n$, а в случае индуктивного характера этого тока напряжение должно быть соответственно меньше этой величины. Такая зависимость напряжения от варианта работы обеспечивается алгоритмом управления преобразователем.

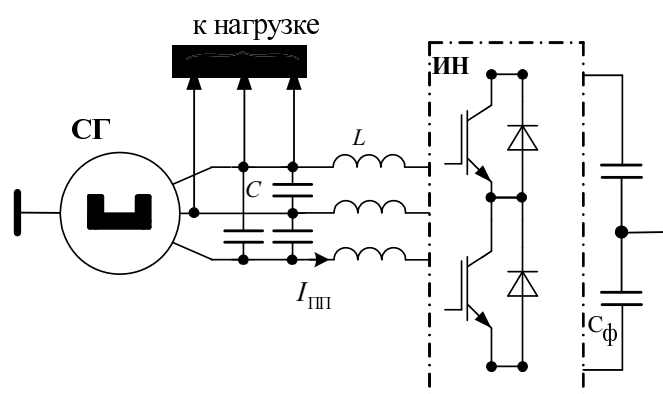


Рис. 18. Схема универсального полупроводникового преобразователя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках принятых допущений аналитически показана возможность стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменных частоте и величине нагрузки за счет использования параллельного подключения полупроводникового преобразователя. Стабилизация осуществляется за счет управляемых перетоков реактивной мощности между генератором и преобразователем.

2. Предложено три различных варианта проектирования и управления системой генерирования электрической энергии с переменной частотой и постоянной величиной выходного напряжения. Варианты значительно отличаются выбором исходных параметров генератора и преобразователя. Однако схемная реализация полупроводникового преобразователя для всех вариантов построения может быть идентичной на базе инвертора напряжения с высокочастотной ШИМ.

3. Проведен анализ электромагнитных процессов в системе генерирования для каждого из предложенных вариантов. Показано, что третий вариант позволяет реализовать в полной мере преимущества системы. При его реализации в СГЭЭ с двойным диапазоном изменения частоты вращения вала максимальная установленная мощность генератора и преобразователя по отношению к максимальной мощности нагрузки определяются соотношениями $S_{\text{СГ max}}/S_{\text{H max}} = 1.38$, $S_{\text{ПП max}}/S_{\text{H max}} = 1.13$. Эти цифры подтверждают преимущество данной схемы СГЭЭ перед вариантом построения с последовательным включением преобразователя.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 13 G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лёвин А.В. Электрический самолёт: от идеи до реализации: монография / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
- [2] Трешев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И.И. Трешев. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с.
- [3] Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография / С.А. Харитонов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с. (Серия «Монографии НГТУ»).
- [4] Пат. 81609 РФ, МПК Н 02Р D/00. Система генерирования стабильного напряжения переменного тока / Юхнин М.М., Левин А.В., Лившиц Э.Я., Пузанов В.Г., Харитонов С.А. – № 2008147984; заявл. 05.12.08; опубл. 20.03.09, Бюл. № 8. – 3 с.

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники НГТУ. Основное направление научных исследований: силовая электроника, теория преобразования электрической энергии, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Член-корреспондент АЭН РФ. Имеет более 230 публикаций, в том числе три монографии и 4 учебных пособия. E-mail: kharit1@yandex.ru

Коробков Дмитрий Владиславович, ассистент кафедры электроники и электротехники НГТУ. Основное направление научных исследований: силовая электроника, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Имеет более 20 публикаций. E-mail: kpe@ngs.ru

Макаров Денис Владимирович, аспирант кафедры электроники и электротехники НГТУ. Основное направление научных исследований: силовая электроника, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов, микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники. Имеет более 10 публикаций. E-mail: rcreal2002@ngs.ru

Левин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, зам. генерального директора ОАО АКБ «Якорь», г. Москва. Основное направление научных исследований: системы генерирования электрической энергии для летательных аппаратов. Академик АЭН РФ. Имеет более 100 публикаций, в том числе монографию. E-mail: akb.yakor@ru.net

Коняхин Сергей Федорович, кандидат технических наук, главный конструктор ОАО АКБ «Якорь», г. Москва. Основное направление научных исследований – системы электропитания для летательных аппаратов. Имеет более 100 публикаций. E-mail: flat84@mail.ru

Юхнин Марк Миронович, кандидат технических наук, ведущий конструктор ОАО АКБ «Якорь», г. Москва. Основное направление научных исследований – системы генерирования электрической энергии для летательных аппаратов. Имеет более 100 публикаций. E-mail: akb.yakor@ru.net

Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V., Levin A.V., Konyhin S.F., Uhnin M.M.

System generating electricity for aircraft

Examines three options for the development of energy systems with unstable frequency for aircraft on the basis of a synchronous generator with permanent magnets and semiconductor converters connected in parallel with a variable power factor. The possibility of stabilizing the voltage of the synchronous generator, the basic energies and their dependence on the system identified.

Key words: synchronous generator, permanent magnets, variable frequency, voltage regulation, solid converter, power factor.