

Анализ параметров синхронного генератора со сверхпроводящими обмотками для автономной электроустановки

КОВАЛЕВ К.Л., ПЕНКИН В.Т., СЕМЕНИХИН В.С., ТУЛИНОВА Е.Е., ЛАРИОНОВ А.Е.

Рассматриваются возможность использования синхронных генераторов со сверхпроводящими обмотками на статоре и роторе, охлаждаемых жидким азотом, в автономных электроэнергетических установках напряжением до 1000 В. Показана эффективность таких генераторов и приведены основные соотношения для оценки их основных параметров.

Из полученных соотношений следует, что при заданных геометрических размерах и обмоточных данных ротора и статора выходная мощность СПСГ, пропорциональная частоте вращения ротора, определяется:

*геометрическими размерами индуктора и квадратом значения МДС обмотки возбуждения;
размером воздушного зазора, объем которого должен быть пропорционален мощности генератора;*

допустимой токовой нагрузкой якоря, значение которой позволит реализовать расчетную мощность при заданном напряжении.

Выполнение этих требований является необходимым условием для создания синхронного генератора заданной мощности со сверхпроводящими обмотками на статоре и роторе для систем автономной энергетики.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *сверхпроводящий синхронный генератор, автономная установка, максимальная (расчетная) мощность, ток короткого замыкания якоря, размер воздушного зазора*

Относительно низкое допустимое значение плотности тока медных проводов является существенным препятствием для повышения линейной нагрузки якоря и МДС обмотки возбуждения и, в конечном итоге, ограничивает возможность создания электрических машин с улучшенными массогабаритными показателями.

Альтернативой медным проводам при создании различных электротехнических устройств могут стать современные ленты на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов (ВТСП ленты), допускающие большие токовые нагрузки, чем медные. Применение ВТСП лент позволит уже в ближайшее время создавать мощные синхронные генераторы с малой удельной массой напряжением до 1000 В [1–6].

Использование ВТСП лент, которые при охлаждении жидким азотом могут проводить как постоянный, так и переменный ток при плотности несколько тысяч ампер на квадратный миллиметр и выше, открывает широкие перспективы создания высокоэффективных сверхпроводниковых синхронных генераторов (СПСГ) с высокой удельной мощностью для автономных электроустановок (АЭУ) различного назначения.

Сравнительные внешние характеристики при равных значениях ЭДС холостого хода, а также зависимости выходной мощности от тока якоря СПСГ и синхронного генератора с медными обмотками приведены на рис. 1. Из них следует, что при одном и том же значении ЭДС холостого хода за счет высокой линейной нагрузки сверхпроводящего якоря максимальная мощность СПСГ

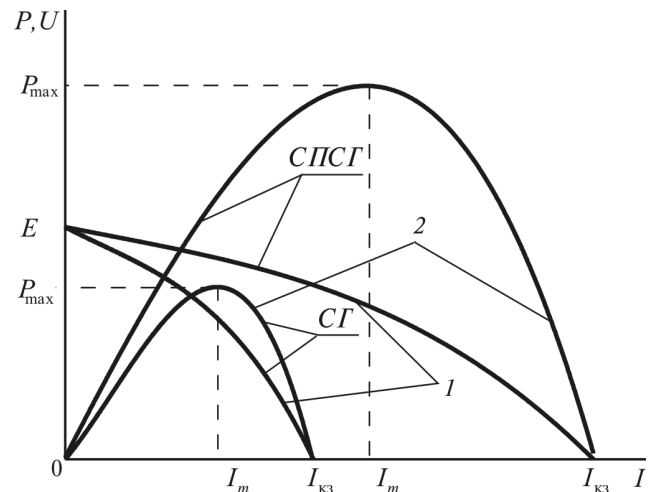


Рис. 1. Сравнительные внешние характеристики (1) и зависимости выходной мощности от тока якоря (2) синхронного генератора с медными и сверхпроводящими обмотками

может быть значительно больше, чем у синхронного генератора с медными обмотками якоря.

В этой связи представляет интерес анализ возможностей и параметров синхронных генераторов с обмотками якоря и индуктора на основе современных сверхпроводников. Несмотря на то, что конструктивные особенности сверхпроводниковых электрических машин в ряде случаев требуют специфического подхода к их расчету и проектированию, для анализа их основных параметров может быть также использована теория обычных электрических машин. При этом следует иметь в виду, что необходимость охлаждения сверхпроводящих обмоток якоря и индуктора криогенными жидкостями или газами усложняет конструкцию электрической машины и может повлечь за собой увеличение воздушного зазора между якорем и индуктором.

Основные характеристики синхронного генератора определяются ЭДС холостого хода E и индуктивным сопротивлением якорной обмотки генератора (активным сопротивлением сверхпроводниковых обмоток якоря и индуктора обычно пренебрегается). Зависимости E и X_c от основных параметров для синхронного генератора могут быть представлены известными формулами [7]:

$$E = \frac{\sqrt{2}\mu_0 f D_f l w_a k_a w_f i_f}{p^2 \delta'}; \quad (1)$$

$$X_c = \frac{2\mu_0 m f w_a^2 k_a^2 D_a l_s}{p^2 \delta'}$$

где E – действующее значение ЭДС якорной обмотки; D_f , D_a – наружный диаметр индуктора и внутренний диаметр расточки якоря; l – активная длина обмоток; p – число пар полюсов; m – число фаз статорной обмотки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; частота генерируемого тока $f = np/60$ (n – частота вращения, мин⁻¹); w_f – полное число витков индуктора; w_a , k_a – число витков фазы якорной обмотки и ее обмоточный коэффициент; $\delta' = k_a k_\mu \delta$ – расчетное значение воздушного зазора с учетом влияния пазов и возможного насыщения сердечника магнитопровода; $\delta = (D_a - D_f)/2$ – значение воздушного зазора между статором и ротором без учета влияния пазов.

В формуле для ЭДС холостого хода принято, что значение зазора δ' достаточно велико и повышение МДС обмотки возбуждения не вызывает насыщения магнитопровода.

Пренебрегая активным сопротивлением сверхпроводящих проводов, из (1) получаем выражение для действующего значения тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора [8]:

$$I_{кз} = \frac{E}{X_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{w_f i_f D_f}{m k_a w_a D_a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k_{fa} w_f i_f}{m k_a w_a}, \quad (2)$$

где $k_{fa} = D_f / D_a < 1$ – коэффициент, учитывающий уменьшение индукции магнитного поля на наружной поверхности зазора из-за увеличения площади полюсного деления якоря.

Из (2) следует, что ток короткого замыкания генератора пропорционален МДС обмотки возбуждения, отношению диаметров индуктора и якоря и обратно пропорционален числу витков обмотки якоря. Значение тока короткого замыкания весьма существенно для выходных параметров синхронного генератора и, как будет показано ниже, фактически определяет его мощность. Повысить мощность генератора возможно лишь при увеличении МДС обмотки возбуждения. Уменьшение числа витков якорной обмотки, хотя и увеличивает ток короткого замыкания, однако приводит к уменьшению ЭДС якоря, и мощность генератора не меняется. Таким образом, число витков якорной обмотки не влияет на мощность генератора, а лишь определяет значение его выходного напряжения.

Очевидно, выходное напряжение автономной электроустановки на базе сверхпроводникового синхронного генератора должно соответствовать напряжению потребителей электроэнергии. Автономные электроустановки, как правило, низковольтные, эксплуатирующиеся при напряжении, не превышающем примерно 700 В. В этом случае сверхпроводниковый генератор также должен быть низковольтным и его якорная обмотка с системой криогенного охлаждения, расположенная в пазах сердечника якоря, должна иметь относительно небольшое число витков.

Значение тока «медных» обмоток якоря синхронного генератора ограничивается относительно низким допустимым значением плотности тока якоря. В сверхпроводящих обмотках плотность тока может быть значительно повышена (по крайней мере, на порядок), что позволит также при заданных габаритах существенно увеличить значения тока и выходной мощности синхронной машины.

Зависимость напряжения синхронного генератора от тока нагрузки следует из векторной диаграммы (рис. 2) и может быть представлена в виде [7]:

$$U = -I_a X_c \sin \varphi + \sqrt{E^2 - I_a^2 X_c^2 \cos^2 \varphi}, \quad (3)$$

где U , I_a – напряжение и ток якоря синхронного генератора; E , X_c – ЭДС и индуктивное сопротивление обмотки якоря, зависящие от конструктивных и обмоточных параметров генератора; φ – угол между векторами тока и напряжения.

Полная и активная мощности m -фазного синхронного генератора как функции тока (рассматривается только активно-индуктивная нагрузка):

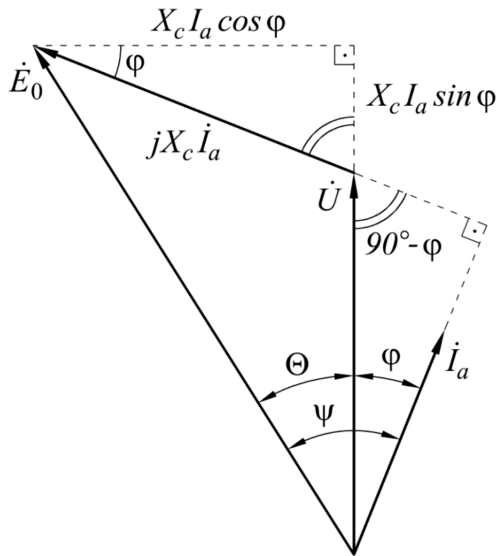


Рис. 2. Векторная диаграмма СПСГ

$$\begin{aligned}
 S &= mUI_a = m(-I_a^2 X_c \sin \varphi + \\
 &+ I_a \sqrt{E^2 - I_a^2 X_c^2 \cos^2 \varphi}); \\
 P &= S \cos \varphi = mUI_a \cos \varphi.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Эти функции равны нулю при $I_a=0$ и $I_a=I_{кз}$ и имеют максимум при токе I_{mp} . При проектировании синхронного генератора за расчетную мощность обычно принимается его максимальная мощность, которая превышает номинальную на 15–20% [8].

Приравняв производную по току от функции мощности синхронного генератора нулю и решив уравнение $S'(I)=0$, получим значение тока якоря для активно-индуктивной нагрузки, при котором выходная мощность генератора максимальна:

$$I_{mp} = \frac{E}{X_c} \frac{1}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}} = \frac{I_{кз}}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}.
 \tag{5}$$

При $\sin \varphi=1$ реактивная мощность будет максимальной при токе

$$I_{mp} = E / 2 X_c = I_{кз} / 2;
 \tag{6}$$

при $\cos \varphi=1$ активная мощность будет максимальной при токе

$$I_{mp} = E / \sqrt{2} X_c = I_{кз} / \sqrt{2}.
 \tag{7}$$

Таким образом, при изменении угла нагрузки от 0 до 90° ток якоря, соответствующий максимальному значению расчетной мощности генератора, от половины значения тока короткого замыкания увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

Напряжение генератора, соответствующее максимальной мощности,

$$U_{mp} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}.
 \tag{8}$$

Номинальные значения тока I_H и напряжения U_H генератора будут меньше максимальных и будут определяться с учетом необходимого диапазона регулирования нагрузки генератора.

При напряжении генератора, соответствующем максимальной мощности, по (8) определяется необходимое значение ЭДС холостого хода генератора. Подставив значения тока I_{mp} в (4), получим выражения для максимальной (расчетной) полной S и активной P мощности m -фазного синхронного генератора в зависимости от его ЭДС и индуктивного сопротивления якорной обмотки:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{mE^2}{2X_c(1 + \sin \varphi)}; \\
 P &= \frac{mE^2 \cos \varphi}{2X_c(1 + \sin \varphi)}; \\
 Q &= \frac{mE^2 \sin \varphi}{2X_c(1 + \sin \varphi)},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

при $\sin \varphi=1$ реактивная мощность $Q = \frac{mE^2}{4X_c} = \frac{mEI_{кз}}{4}$,

при $\cos \varphi=1$ активная мощность $P = \frac{mE^2}{2X_c} = \frac{mEI_{кз}}{2}$.

Таким образом, максимальная активная мощность синхронного генератора равна половине значения ЭДС холостого хода в квадрате, умноженного на число фаз и деленного на индуктивное сопротивление якорной обмотки.

Зависимость максимальной (расчетной) активной мощности генератора от геометрических размеров индуктора, воздушного зазора, частоты вращения ротора и МДС обмотки возбуждения можно получить, подставив значения ЭДС и из (1) в (9) и приняв $\cos \varphi=1$:

$$P = \frac{\mu_0 f k_{fa} D_f l (w_f I_f)^2}{2\delta' p^2} = \mu_0 f k_{fa} D_f l \frac{w_f^2 I_f^2}{2\delta' p^2}.
 \tag{10}$$

Учитывая, что среднее значение основной гармоники индукции магнитного поля индуктора

$$B_\delta = \frac{\mu_0 w_f I_f}{\pi \delta' p},
 \tag{11}$$

то, подставив (11) в (10), получим выражение для мощности синхронного генератора

$$P = k_{fa} \pi^2 f D_f l \delta' B_\delta^2 / 2\mu_0,
 \tag{12}$$

из которого следует, что при заданной магнитной индукции в зазоре, не превышающей значения ин-

дукции насыщения магнитопровода, мощность синхронного генератора пропорциональна значению воздушного зазора. Или, учитывая, что объем воздушного зазора $V_\delta = \pi l \delta' D_a$

$$P = k_{fa} \pi f V_\delta B_\delta^2 / 2 \mu_0, \quad (13)$$

т.е. мощность синхронного генератора пропорциональна частоте вращения, квадрату магнитной индукции и объему воздушного зазора.

Формула (13) позволяет по заданной мощности синхронного генератора определить необходимое значение его воздушного зазора:

$$\delta' = \frac{\mu_0 P}{\pi f l D_a B_\delta^2}. \quad (14)$$

Таким образом, размер воздушного зазора, как и МДС обмотки возбуждения, определяют мощность, которую способен реализовать генератор.

На рис. 3 представлены кривые намагничивания магнитной системы генератора для различных значений воздушного зазора. Зависимости показывают, что при увеличении воздушного зазора постоянное значение магнитной индукции в нем можно поддерживать соответствующим увеличением МДС обмотки возбуждения. Например, при зазоре δ_1 и МДС обмотки возбуждения $I_1 w$ индукция в зазоре составляет B_δ (кривая 1, рис. 3). При зазоре $\delta_2 > \delta_1$, чтобы получить такую же индукцию, как в зазоре δ_1 , потребуется уже большее значение МДС $w I_2$ (кривая 2) и т.д. Мощность генератора согласно (10) при этом также увеличивается пропорционально квадрату МДС обмотки возбуждения.

Если воздушный зазор генератора будет слишком большим (кривая 4) и значения МДС индуктора недостаточно для поддержания индукции на

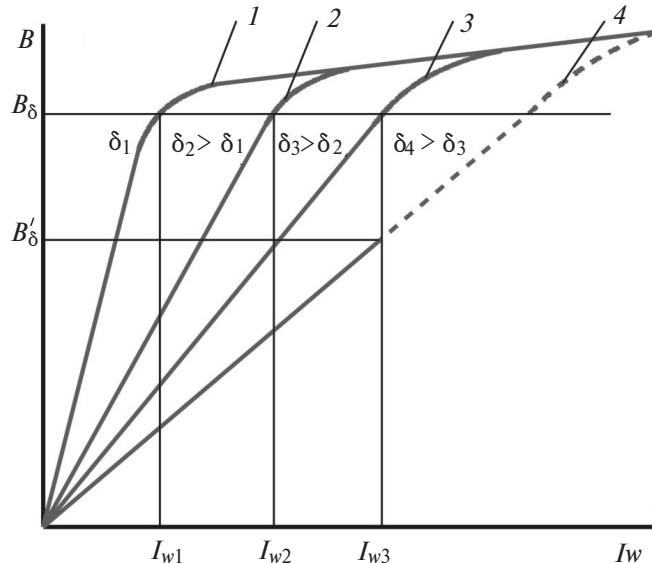


Рис. 3. Зависимость магнитной индукции от МДС обмотки возбуждения при различных значениях величины зазора

уровне B_δ ($Iw < w I_3$), то индукция в зазоре уменьшится, например, до значения B'_δ . При этом максимальная мощность генератора также уменьшится пропорционально квадрату индукции в зазоре, генератор будет недоиспользован.

Таким образом, чрезмерное увеличение воздушного зазора между статором и ротором при невозможности соответственного увеличения МДС обмотки возбуждения приведет к уменьшению магнитного потока и выходной мощности генератора. Для того чтобы при увеличенном зазоре индукция в нем не уменьшилась и мощность генератора не изменилась, необходимо увеличивать МДС обмотки возбуждения.

При допустимом значении тока обмотки якоря $I_{a2} = I_{mp}$, соответствующем максимальной выходной мощности, генератор будет использован максимально, а его мощность будет наибольшей (рис. 4).

В случае, если ток нагрузки превышает ток, соответствующий максимальной мощности $I_{a3} > I_{mp}$, устойчивый режим работы генератора ограничивается максимальной мощностью, и якорная обмотка генератора при этом будет недоиспользована. Если допустимый ток якорной обмотки меньше тока, соответствующего максимальной мощности $I_{a1} < I_{mp}$, максимально возможная мощность, которую может развить генератор, также не будет использована в полной мере. Работа генератора при максимальной мощности возможна только при допустимом значении тока якоря I_{mp} .

На основании (2) для режима короткого замыкания якорной обмотки синхронного генератора можно записать

$$w_f I_f = \sqrt{2} m k_a w_a I_{акз} / k_{fa}, \quad (15)$$

где $I_{акз}$ – действующее значение фазного тока при коротком замыкании.

Так как ток якоря, при котором активная мощность генератора максимальна, $I_{ам} = I_{акз} / \sqrt{2}$ со-

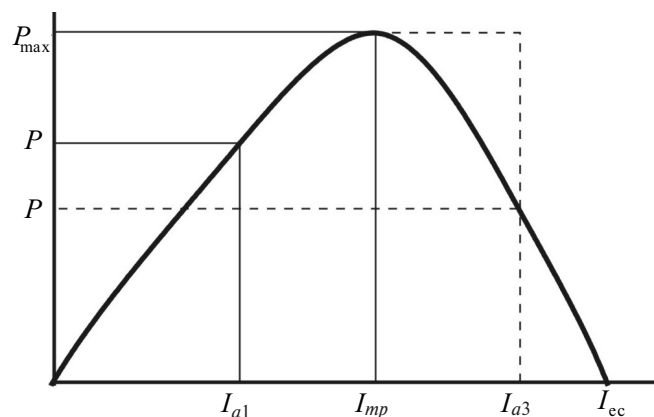


Рис. 4. Использование якорной обмотки СП генератора

гласно (7), то после подстановки этого значения в (15) оно примет вид:

$$w_f I_f = 2mk_a w_a I_{am} / k_{fa}. \quad (16)$$

Из (16) следует зависимость тока якоря, при котором мощность максимальна, от обмоточных данных якоря и индуктора:

$$I_{am} = \frac{k_{fa} w_f I_f}{2mk_a w_a}. \quad (17)$$

Подставляя (11) и (16) в (10) и принимая во внимание формулу линейной нагрузки якоря

$$A_m = \frac{2mw_a I_{am}}{\pi D_a}, \quad (18)$$

получаем известную зависимость мощности синхронного генератора от геометрических размеров, электромагнитных нагрузок и частоты вращения [9]:

$$P = K_p (D^2 l) (A_m B_\delta) n, \quad (19)$$

где K_p – коэффициент пропорциональности.

Формула (19) связывает мощность синхронной машины с ее основными размерами – линейной нагрузкой якоря, индукцией магнитного поля в зазоре и частотой вращения, т.е. параметрами машины, которые могут быть заданы на этапе проектирования. Однако следует иметь в виду, что линейная нагрузка якоря (18) не является независимой переменной, а определяется значением тока I_{am} , пропорционального току короткого замыкания. Таким образом, повысить линейную нагрузку якоря возможно только при увеличении МДС обмотки возбуждения.

При применении современных сверхпроводящих проводов МДС обмотки возбуждения и линейная нагрузка якоря синхронного генератора могут быть повышены в несколько раз, что позволит существенно увеличить мощность генератора.

Исследование, представленное в статье, выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта №17-20-05143.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Токонесущие** ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников/Под ред. А. Гояла; ред. пер. А.Р. Кауль. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009, 320 с.
2. **Cesar A. Luongo, Philippe J. Masson, Taewoo Nam, Dimitri Mavris, Huan D. Kim, Gerald V. Brown, Mark Waters, and David Hall.** Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, vol. 19, No.3.
3. **Paul N. Barnes, Michael D. Sumption, Gregory L. Rhoads.** Review of high power density superconducting generators: Present

state and prospects for incorporating YBCO windings. – Cryogenics 45 (2005).

4. **Kozub S., Bog-danov I., Dezhin D., Kashtanov E., Shuvalov V., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov P., Tkachenko L.** HTS racetrack coils for electrical machines Proceedings of Cryogenics 2014, Prague, April 2014.

5. **Kovalev K., Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Verzhbitsky L.** Synchronous motor with HTS-2G wires. – 11th European Conference in Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 507 (2014) 032011 doi: 10.1088/1742-6596/507/3/032011.

6. **Verzhbitsky L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubensky A.A.** Brushless Superconducting Syn-chronous Generator With Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3.

7. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980, 928 с.

8. **Бертинов А.И., Алиевский Б.Л., Илюшин К.В., Ковалев Л.К., Семенихин В.С.** Сверхпроводниковые электрические машины и магнитные системы/Под ред. Б.Л. Алиевского. – М.: Изд-во МАИ, 1993, 341 с.

9. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Энергия, 1974, 840 с.

[10.01.2018]

Авторы: Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» Московского инженерно-физического института. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (МАИ).

Пенкин Владимир Тимофеевич окончил МАИ в 1983 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1991 г. Профессор, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Семенихин Валерий Сергеевич окончил Московский энергетический институт в 1965 г. Кандидатскую диссертацию «Разработка метода расчета и исследование нестационарных электромагнитных процессов в сверхпроводниковом синхронном генераторе с экранирующей системой индуктора» защитил в 1980 г. Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Тулинова Екатерина Евгеньевна окончила МАИ в 2011 г. Младший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, аспирант.

Ларионов Анатолий Евгеньевич окончил МАИ в 1974 г. В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Analyzing the Parameters of a Synchronous Generator with Superconducting Windings for a Self-Contained Electric Power Unit

KOVALEV Konstantin L. (*Moscow Aviation Institute – MAI, Moscow, Russia*) – Head of the Department, Dr. Sci (Eng.)

PENKIN Vladimir T. (*MAI, Moscow, Russia*) – Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

SEMENIKHIN Valery S. (*MAI, Moscow, Russia*) – Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

TULINOVA Yekaterina Ye. (*MAI, Moscow, Russia*) – Younger Scientist, Ph.D. Student

LARIONOV Anatoly Ye. (*MAI, Moscow, Russia*) – Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

The article considers the possibility of using synchronous generators with liquid nitrogen cooled superconducting windings on the stator and rotor in self-contained electric power units with a voltage level up to 1000 V. High efficiency of such generators is demonstrated, and the basic correlations for estimating their main parameters are given.

It follows from the obtained correlations that with the specified geometrical sizes and the rotor and stator winding data, the superconducting synchronous generator output power proportional to the rotor rotation frequency is determined by the following parameters:

- (i) the inductor geometrical sizes and the square of the excitation winding MMF;*
- (ii) the air gap width, the volume of which must be proportional to the generator power capacity; and*
- (iii) the permissible armature current load, the value of which will make it possible to obtain the design power output at the specified voltage level.*

Fulfilling of these requirements is the necessary condition for developing a synchronous generator with the specified power with superconducting windings on the stator and rotor for self-contained power installations.

Key words: *superconducting synchronous generator, self-contained installation, maximal (design) power, armature short-circuit current, air gap width*

REFERENCES

1. **Tokonesushchiye lenty vtorogo pokoleniya na osnove vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov** (Second-Generation Current-Carrying Tapes on the Basis of High-temperature Superconductors)/Edit. by A.Goyal; translate A.R. Kaul'. Moscow, Publ. LKI, 2009, 320 p.
2. **Cesar A. Luongo, Philippe J. Masson, Taewoo Nam, Dimitri Mavris, Hyan D. Kim, Gerald V. Brown, Mark Waters, and David Hall.** Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. – IEEE Transactions on applied superconductivity, 2009, vol. 19, No.3.
3. **Paul N. Barnes, Michael D. Sumption, Gregory L. Rhoads.** Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. – Cryogenics 45 (2005).
4. **Kozub S., Bog-danov I., Dezhin D., Kashtanov E., Shuvalov V., Smirnov V., Sytnik V., Shcherbakov P., Tkachenko L.** HTS racetrack coils for electrical machines Proceedings of Cryogenics 2014, Prague, April 2014.

5. **Kovalev K., Dezhin D., Ilyasov R., Kozub S., Verzhbitsky L.** Synchronous motor with HTS-2G wires. – 11th European Conference in Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 507 (2014) 032011 doi: 10.1088/1742-6596/507/3/032011.
6. **Verzhbitsky L.G., Kozub S.S., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubensky A.A.** Brushless Superconducting Syn-chronous Generator With Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, No. 3.
7. **Ivanov-Smolenskii.** *Elektriskiy mashiny* (Electrical Machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 928 p.
8. **Bertinov A.I., Aliyevskii B.L., Ilyushin K.V., Kovalev L.K., Semenikhin V.S.** *Sverkhprovodnikovye elektricheskiye mashiny i magnitnye sistemy* (Superconducting electrical machines and Magnetic Systems)/Edit. by B.L. Aliyevskii. Moscow, Publ. MAI, 1993, 341 p.
9. **Vol'dek A.I.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical Machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 840 p.

[10.01.2018]