

Особенности прочностных расчетов синхронного генератора для автономной малогабаритной системы генерирования постоянного тока

ИШУТИНОВ В.В., РУССКИХ А.Н.

Рассмотрены наиболее важные вопросы, возникающие при проектировании автономных малогабаритных систем генерирования постоянного тока, — анализ и численный расчет прочности конструкции. Одной из главных особенностей автономной малогабаритной системы генерирования постоянного тока являются высокие скорости вращающейся части генератора. В ходе проведенного исследования были рассмотрены основные возможные варианты концепций построения систем генерирования и соответствующих им конструкций генераторов. Определена связь прочностных характеристик генератора, зависящая от его конструкции в требуемых тепловых, скоростных режимах работы. Также были учтены собственные значения частоты колебаний генератора на предмет резонанса. Указаны главные цели прочностного расчета и рассмотрены расчеты на прочность, жесткость и вибрацию двух конструкций синхронных генераторов с внутренним и внешним роторами. Условия расчета задавались с учетом специфических особенностей данных конструкций. Моделирование проводилось методом конечных элементов с помощью специализированного пакета ANSYS.

Ключевые слова: автономная малогабаритная система генерирования постоянного тока, особенности проектирования, синхронный генератор, конструкция, прочностные расчеты, метод конечных элементов, высокие значения частоты вращения

Перед отечественным машиностроением стоит задача разработки электрооборудования автономных объектов с качественно новыми показателями. Это вызвано необходимостью масштабного обновления автономных объектов, а также обусловлено успехами в смежных областях — электромашиностроении, электронике, программном обеспечении.

При этом одна из актуальных задач — разработка автономных малогабаритных систем генерирования (АМСГ) постоянного тока с низкими пульсациями выходного напряжения. Главной особенностью АМСГ являются высокие и ультравысокие значения частоты вращения генератора, что требует углубленных прочностных расчетов, вносит определенные особенности в конструкцию, технологию изготовления и процесс проектирования генераторов.

В ходе разработки генератора необходимо выполнить ряд расчетов — электромагнитный, тепловой, прочностный, а также осуществить моделирование генератора с системой регулирования и стабилизации напряжения.

Главные цели прочностного расчета:

выбор оптимального по конструкции варианта генератора с точки зрения минимизации критических значений частоты вращения, концентраторов напряжений, резонансов и т.д. при функционировании в диапазоне рабочих значений частоты вращения;

выбор материала для изготовления несущей части ротора при работе на максимальной частоте вращения.

Были выбраны две конструкции генератора: с внутренним и внешним роторами.

Главная особенность генератора с внутренним ротором с точки зрения прочностного расчета заключается в том, что несущим элементом является вал, на котором установлены магнитопровод ротора и постоянные магниты [3]. Вал несет на себе массу всех вращающихся частей, через него передается вращающий момент со стороны приводного двигателя, при этом вращающиеся части имеют жесткую связь, а значит, отсутствуют элементы, компенсирующие динамические моменты при запуске и в переходных режимах (при набросе нагрузки). Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, и усилия от появления крутильных колебаний. При этом размер вала жестко ограничен по диаметру, что вызвано таким же жестким ограничением по наружному диаметру генератора. К валу предъявляются противоречивые требования. Таким образом, правильно сконструированный вал, в одной стороны, должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать действующие на него нагрузки без появления остаточных дефор-

маций, с другой стороны, должен быть легким, учитывая крайне жесткое ограничение по показателям массы.

Прочность и жёсткость деталей ротора целесообразно определять в среде трехмерного моделирования ANSYS, которая дает возможность проследить полную картину напряжений и поведение деталей ротора в процессе вращения исходя из реальной циклограммы его работы [4]. Аналитический расчет прочности является в крайней степени трудоемким, поскольку полученные результаты применимы только к конкретным точкам или сечениям и только к одному конкретному режиму работы. Целесообразно проводить расчет вала на жесткость аналитическим методом [2]. Для того чтобы убедиться в правильности результатов прочностного расчета, полученных математическим моделированием в САЕ, необходимо провести аналогичный расчет жесткостных параметров вала аналитическим методом.

На начальном этапе проектирования, когда нет хотя бы макетного образца, сходимость результатов аналитического расчета и компьютерного моделирования является показателем адекватности решения и максимальной приближенности к процессу возникновения напряжений на деталях ротора в реальных условиях работы. В случае удовлетворительного результата расчета изготавливается макет, результаты испытаний которого позволяют убедиться в правильности принятых конструктивных решений, а также оценить точность математического моделирования, которая позволит говорить о запасе прочности конструкции.

В качестве материала для изготовления вала при расчетах и моделировании варианта конструкции с внутренним ротором были выбраны сталь 30ХГСА и титан ВТ6.

Учитывая специфику конструкции генератора с внутренним ротором, были проведены:

аналитический расчет для определения относительного значения угла закручивания вала;

аналитический расчет для определения прогиба вала, вызванного тяжестью насаженных на него частей ротора, а также силами одностороннего магнитного притяжения;

аналитический расчет на соответствие критического значения частоты вращения вала критерию виброустойчивости.

Результаты аналитического расчета конструкции генератора с внутренним ротором:

1. Аналитический расчет для определения относительного значения угла закручивания вала θ показал, что для стального кольца $\theta_c = 0,2$ град/м, для титанового $\theta_T = 0,4$ град /м, т.е. $\theta < [\theta]$ (получен-

ное относительное значение угла закручивания больше допускаемого, которое для обоих материалов $[\theta] = 0,5$ град/м).

2. Аналитический расчет для определения прогиба вала показал, что суммарный прогиб f_δ меньше допустимого приблизительно в 10 раз для стального и титанового валов, что является запасом по жесткости для вала, при этом допустимое значение прогиба должно быть не более 10% значения воздушного зазора (0,04 мм).

3. Рабочая частота вращения ротора составляет 66000 об/мин. Принято считать вал гибким, если его рабочая частота вращения выше критической, и жестким в противном случае. Расчет показал, что для стального вала критерий виброустойчивости не выполняется, а для титанового выполняется. Критерий виброустойчивости для гибких валов требует исключения критических скоростей вращения, которые не удовлетворяют неравенству: $n_{1p} < 1,3n_{1кр}$.

Результаты расчетов в среде ANSYS генератора с внутренним ротором:

1. Относительное значение угла закручивания для стального вала $\theta_c = 0,16$ град/м, для титанового $\theta_T = 0,24$ град/м, т.е. $\theta < [\theta]$ (относительное значение угла закручивания больше допускаемого, которое для обоих материалов $[\theta] = 0,5$ град/м).

2. Суммарный прогиб f_δ меньше допустимого значения примерно в 10 раз для обоих валов.

В таблице систематизированы результаты аналитического и компьютерного расчетов.

Параметр	Материал		
	Титан	Сталь	Допустимое значение
Угол закручивания (аналитический расчет) θ , град/рад	0,4	0,2	0,5
Угол закручивания (компьютерный расчет) θ , град/рад	0,24	0,16	0,5
Прогиб вала (аналитический расчет) δ , м	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Прогиб вала (компьютерный расчет) δ , м	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$

Поскольку сходимость значений параметров жесткости, полученных аналитическим методом и методом моделирования, достаточно высока, справедливо утверждать, что начальные условия задачи, поставленной в среде ANSYS, заданы верно и картина напряжений ротора получается правдоподобной.

Исходя из этого были проведены следующие расчеты в среде ANSYS.

3. Расчет напряжения на деталях внутреннего ротора показал, что изначально предложенная конструкция не удовлетворяет критериям прочности, поскольку постоянные магниты не защищены от тангенциального сдвига и в случае разрушения могут попасть в воздушный зазор (рис. 1).

В конструкцию ротора были введены торцевые шайбы для предохранения магнитов от тангенциального сдвига. Расчет напряжений в новой конст-

В связи с этим была предложена конструкция генератора с внешним ротором, особенность которой – отсутствие необходимости удержания постоянных магнитов от действия центробежной силы, поскольку такую функцию выполняет сама конструкция ротора. Другая не менее важная особенность предлагаемой конструкции – отсутствие как такового вала, что повышает надежность конструкции и сокращает объем расчетов.

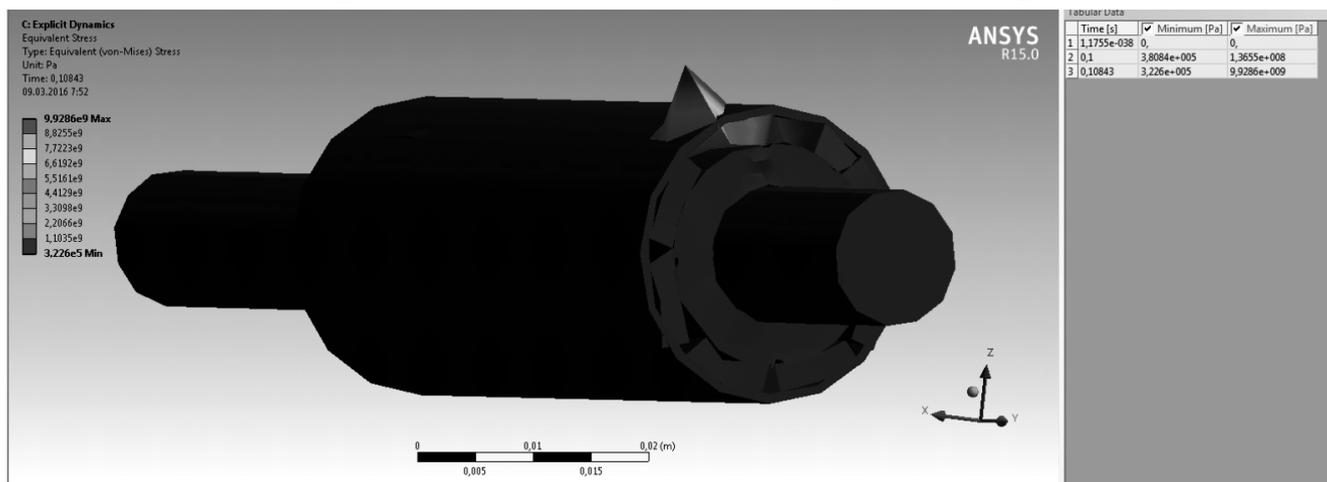


Рис. 1. Картина нарушения целостности втулки

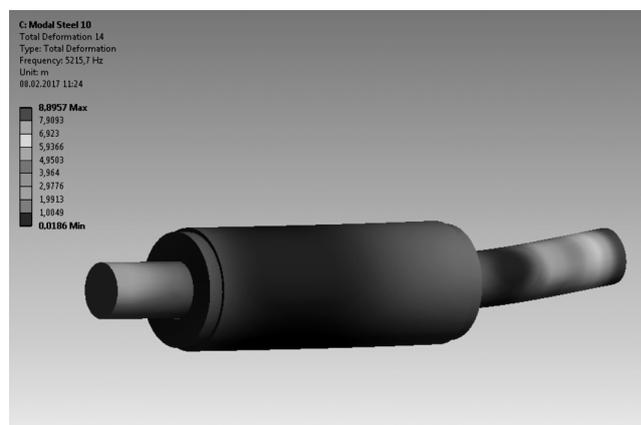
рукции показал, что значения напряжения на корпусе не превышают допустимых ввиду отсутствия концентратора напряжений, связанного со сдвигом магнитов.

4. Модальный расчет роторов со стальным и титановым валами подтвердил критические значения их частот вращения. На рис. 2, а и б представлены результаты расчетов одной из собственных значений частот колебаний.

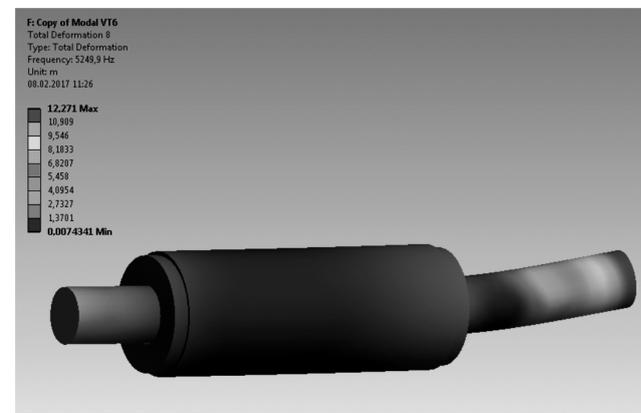
Расчетом также установлено, что ни один из материалов вала, а также выбранная конструкция не удовлетворяют условию виброустойчивости, поскольку соответствующая частота вращения примерно 50000 об/мин является критической и недопустимой, так как критерий виброустойчивости для гибких валов требует исключения критических значений частоты вращения, которые не удовлетворяют неравенству: $n_{1p} < 1,3n_{1кр}$.

Экспериментальные результаты критических значений частоты вращения ротора полностью подтвердили данные аналитических расчетов и моделирования в среде ANSYS с высокой степенью сходимости.

Таким образом, установлено, что конструкция с внутренним ротором не удовлетворяет критериям прочности и виброустойчивости, а следовательно, не может быть использована на последующих этапах разработки, даже несмотря на удовлетворительные показатели электромагнитного расчета.



а)



б)

Рис. 2. Картина деформаций ротора: а – со стальным валом при частоте колебаний 5215,7 Гц; б – с титановым валом при частоте колебаний 5249,9 Гц

Результаты расчетов в среде ANSYS генератора с внешним ротором:

1. Расчет показал, что напряжения на роторе не превышают допустимых $\sigma=1,7 \cdot 10^7$ Па, что на порядок больше предела текучести материала (рис. 3); магниты испытывают малую деформацию против направления вращения $\varepsilon=2,2 \cdot 10^{-7}$ (рис. 4).

2. Для приближенного расчета значения критической частоты вращения была взята математическая модель в виде цилиндра, при этом его масса была рассчитана с условием плотности и объема соответствующих материалов – магнитов, установленных на роторе, и непосредственно ротора. Критическая частота вращения модели $n \approx 600000$ об/мин, что значительно больше рабочей частоты враще-

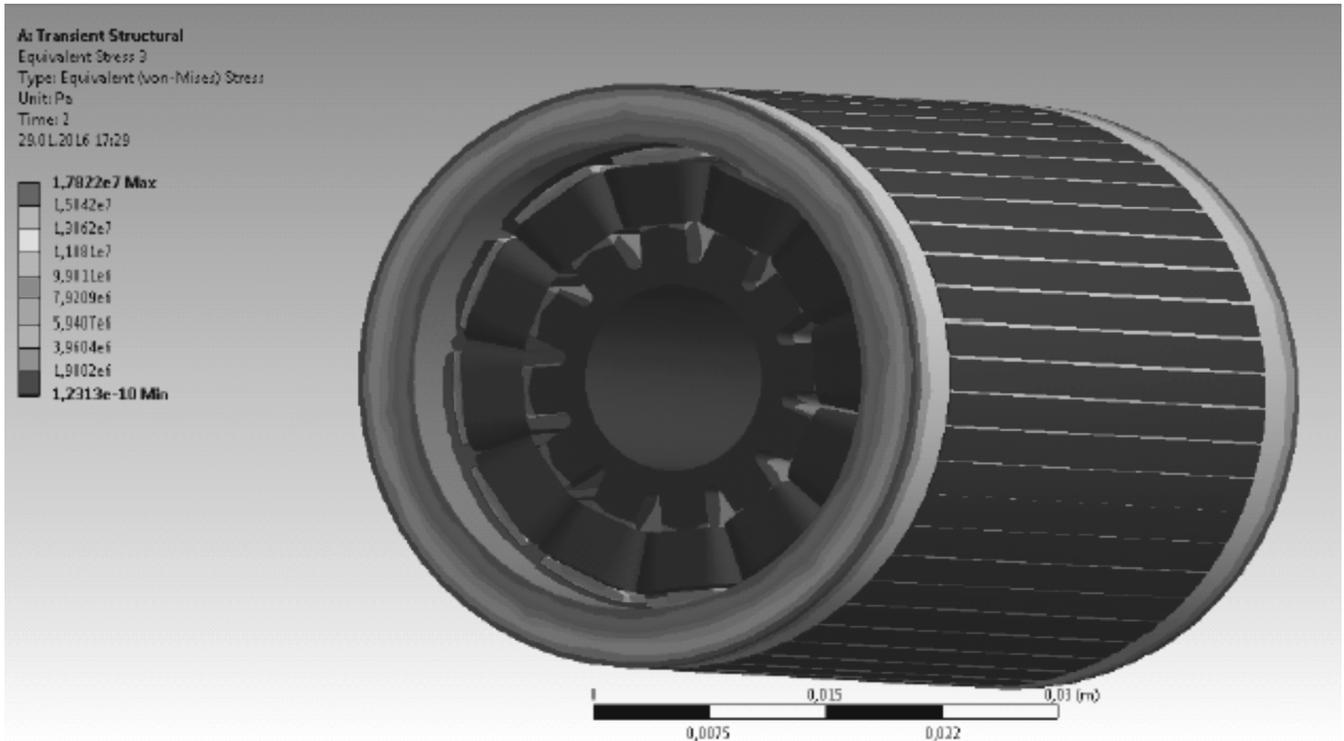


Рис. 3. Картина напряжений внешнего ротора

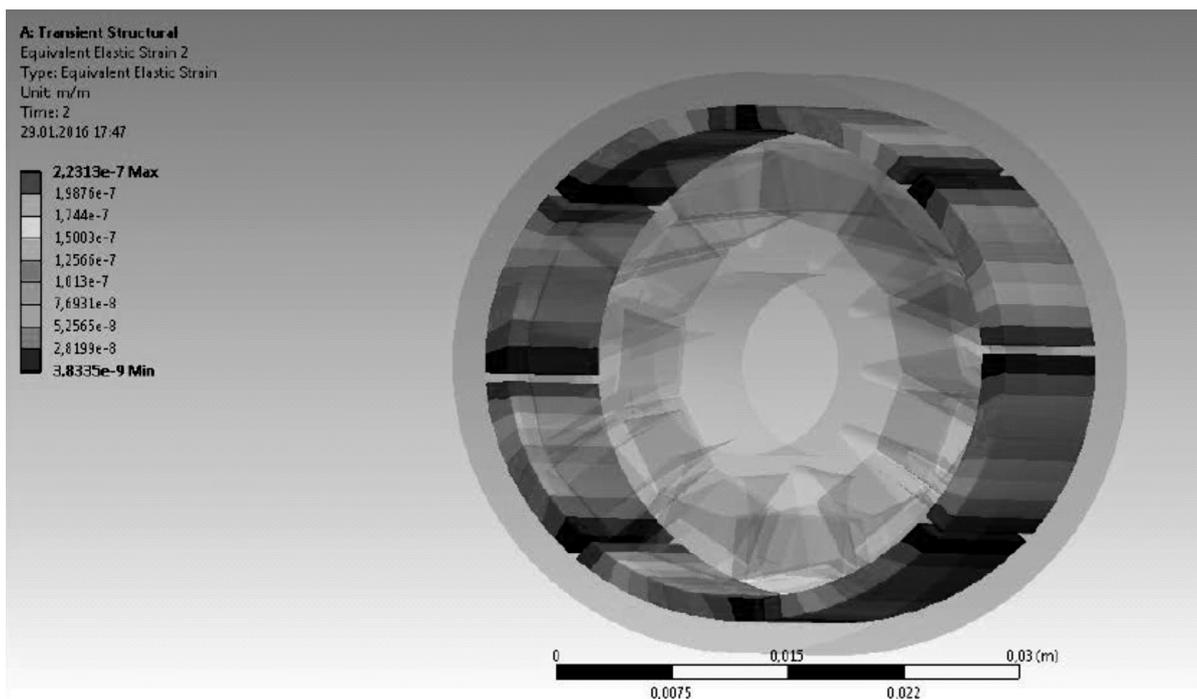


Рис. 4. Картина деформаций магнитов внешнего ротора

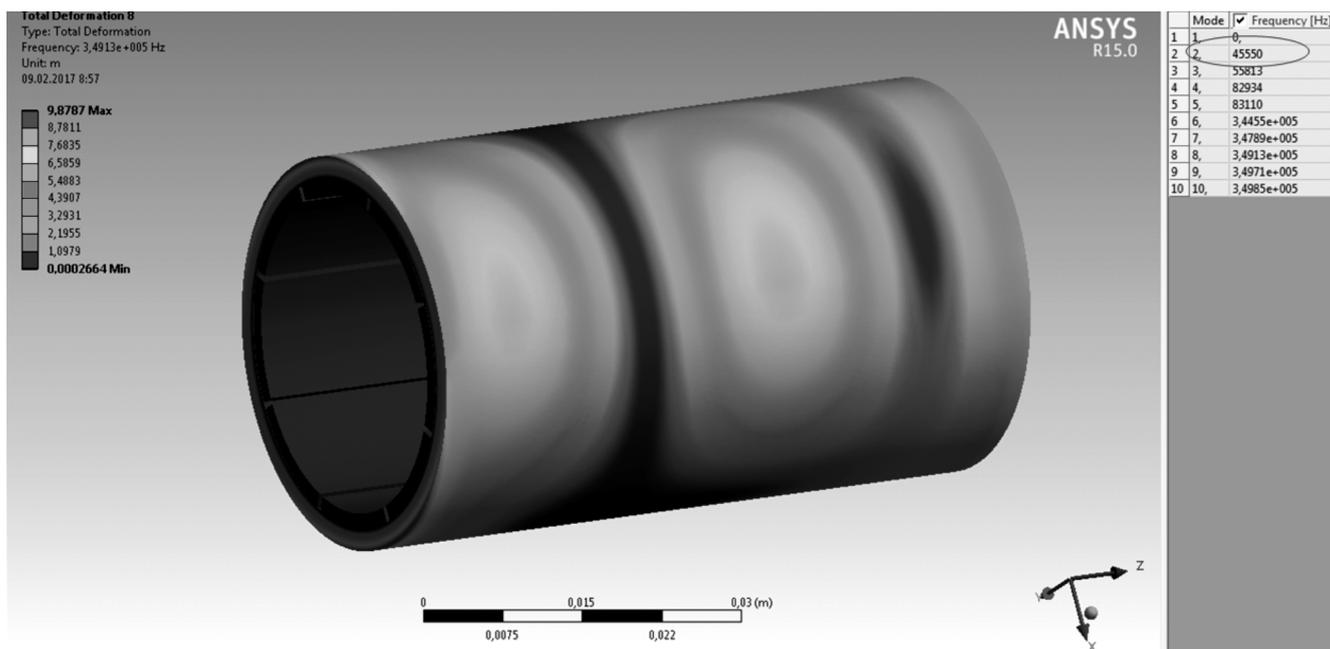


Рис. 5. Результаты модального анализа внешнего ротора

ния, т.е. модель считается жесткой, а приближение к опасному значению частоты вращения недостижимо и ограничено требованиями технического задания.

3. Модальный расчет ротора в ANSYS подтверждает отсутствие в диапазоне $\pm 30\%$ рабочей частоты вращения ее критических значений. Как показано на рис. 5, низшее ненулевое значение частоты 45550 Гц, это означает, что частота вращения модели составляет 434983,3 об/мин (максимальная рабочая частота вращения равна 70000 об/мин).

Результаты исследований показали, что конструкция генератора с внешним ротором имеет меньше «слабых мест», чем конструкция генератора с внутренним ротором, является более прочной, а значит обеспечивает большую надежность во всех режимах работы генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М., Токарев А.Б., Тыричев П.А. Электрооборудование летательных аппаратов, т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. М.: Издательство МЭИ, 2005, 568 с.

2. Беляев Н.М. Сборник задач по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1968, 352 с.

3. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. М.: ФГУП Издательство «Высшая школа», 2002, 757 с.

4. Любимов А.К., Берендеев Н.Н., Втюрин М.Ю., Жидков А.В., Леонтьев Н.В., Шабаров В.В. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2006, 227 с.

[28.03.2018]

А в т о р ы: Ишутин В. Вячеслав Владимирович окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) в 2009 г. по специальности «Электромеханика». В 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ и оптимизация вентильного электродвигателя для высокочастотного электропривода». Доцент кафедры электрических машин и аппаратов ВятГУ, руководитель проекта АО «ЛЕПСЕ».

Русских Анна Николаевна – инженер-конструктор АО «ЛЕПСЕ», окончила ННГУ имени Н.И. Лобачевского в 2013 г. по специальности «Механика», магистрант ВятГУ.

Specific Features of Strength Design Analyses of a Synchronous Generator for a Self-Contained Compact DC Power Generation System

ISHUTINOV Vyacheslav V. (JSC «LEPSE»; Vyatka State University, Kirov, Russia) – Head of the Project; Associate Professor of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

RUSSKIKH Anna N. (*JSC «LEPSE»; Vyatka State University, Kirov, Russia*) – *Engineer-designer, Student of the master's program*

Structural strength analysis and numerical calculation, which are the most important issues arising in designing self-contained compact DC power generating systems, are considered. High speed of the generator rotating part is one of the main specific features pertinent to a self-contained compact DC power generating system. An investigation was carried out, in the course of which basic possible conceptual versions of such generating systems and relevant generator designs were considered. A correlation between the generator strength characteristics, which depends on its design in the required thermal and speed operation modes, has been determined. The generator natural vibration frequencies were also taken into account for checking the possibility of resonance to occur. The strength design main objectives are pointed out, and the strength, stiffness, and vibration analyses of two synchronous generator designs with inner and external rotors are considered. The analysis conditions were specified with due regard to the specific features of these designs. The system was modeled using the finite element method by means of the dedicated ANSYS software package.

Key words: *self-contained compact DC power generation system, specific features of designing, synchronous generator, design, strength analyses, finite element method, high rotation frequency values*

REFERENCES

1. **Gruzkov S.A., Ostanin S. Yu., Sugrobov A.M., Tokarev A.B., Tyrchev P.A.** *Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov. Tom 1. Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* (Electrical equipment of aircraft. Vol. 1. Aircraft power supply systems). Moscow, Publ. of MEI, 2005, 568 p.
2. **Belyayev N.M.** *Sbornik zadach po soprotivleniyu materialov* (Collection of tasks for the resistance of materials). Moscow, Nauka, 1968, 352 p.
3. **Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F.** *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of electric machines). Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 757 p.
4. **Lyubimov A.K., Berendeyev N.N., Vtyurin M.Yu., Zhidkov A.V., Leont'yev N.V., Shabarov V.V.** *Primeneniye sistemy ANSYS k resheniyu zadach mekhaniki sploshnoi sredy* (Application of the ANSYS System for Solving Problems of Continuum Mechanics). Nizhnii Novgorod, Publ. of N. Novgorod State University, 2006, 227 p.

[28.03.2018]