

## Разработка авиационного синхронного генератора мощностью 250 кВ·А с переменной частотой вращения

ДЕЖИН Д.С., ЧИКУЧИНОВ Е.М.

*Для удовлетворения увеличивающейся потребности в электрической энергии на борту летательных аппаратов возникает необходимость в создании мощных генераторов с малой массой и высокими энергетическими показателями и прочностью. Ожидается, что повышение электрификации самолета предоставит многочисленные преимущества, среди которых снижение затрат на его эксплуатацию и обслуживание. Наиболее перспективный способ достичь этого — использование синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Однако при их создании возникают серьезные трудности, связанные с отсутствием устоявшихся подходов к расчету синхронных генераторов «плавающей» частоты вращения мощностью выше 250 кВА. В статье описан подход к созданию комплексной методики разработки авиационных синхронных генераторов повышенной мощности, учитывающей как прочность конструкции, так и электромагнитные и тепловые процессы. Также приводятся результаты моделирования конструктивной схемы неявнополюсного синхронного генератора с уменьшенным числом зубцов индуктора. Такой генератор обеспечивает номинальную мощность 250 кВА во всем диапазоне частот вращения 7200–16000 мин<sup>-1</sup>.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: авиационный синхронный генератор, генератор с электромагнитным возбуждением, схема индуктора, моделирование магнитных полей, расчет генератора*

Современный этап развития авиационной техники характеризуется постепенным увеличением энерговооруженности летательных аппаратов. Так, общая мощность энергетических установок в зарубежных Airbus A-380 уже достигла 600 кВА, а в Boeing 787 Dreamliner — 1000 кВА (без учета вспомогательной силовой установки и резервных источников питания) [1–4]. Такой уровень вырабатываемой электроэнергии вызван применением на современных летательных аппаратах (ЛА) электронных систем управления, связи и навигации, а также постепенной реализацией концепции «полностью электрифицированного самолета» [5]. Электротехнические устройства постепенно заменяют системы, которые традиционно использовали для своего функционирования пневматическую и гидравлическую энергию — это, например, системы запуска авиадвигателя, управления аэродинамическими поверхностями и взлетно-посадочным оборудованием, кондиционирования воздуха и др. [3–6].

Для того чтобы удовлетворить потребности в электрической энергии на борту современного ЛА, необходимо создать генераторы повышенной мощности и малой массы с целью увеличения энергетических показателей энергоустановки.

Перспективными системами электроснабжения повышенной мощности являются системы пере-

менного тока «плавающей» частоты 360–800 Гц удвоенного напряжения 240/416 В и системы постоянного тока повышенного напряжения 270 В [2, 7].

В системах электроснабжения повышенной мощности рационально использовать синхронные генераторы (СГ) с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением с непосредственным приводом от авиадвигателей. Особенность такой системы электроснабжения самолета — отсутствие сложной и дорогостоящей интегральной привод-генераторной установки, которая при невысоких ресурсе и КПД имеет низкий уровень ремонтпригодности, сложную конструкцию и другие недостатки.

Отсутствие привода постоянных оборотов — достоинство системы переменного тока переменной частоты, так как повышается надежность системы благодаря уменьшению числа составных компонентов [3, 8, 9]. Однако отношение максимальной частоты вращения авиадвигателя и генератора к минимальной отличается примерно в два раза (например, 7200 и 16000 мин<sup>-1</sup>). При этом генератор должен обеспечивать номинальную мощность и перегрузку при минимальных оборотах, а на максимальных оборотах конструкция генератора должна обладать необходимой механической прочностью. В то же время необходимо помнить, что генераторы с минимальной массой следует проекти-

ровать на максимально допустимые электромагнитные и тепловые нагрузки и частоты вращения, учитывая возможности подшипниковых опор [10].

Преимущества генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами (СГПМ) в сравнении с генераторами с электромагнитным возбуждением состоят в следующем:

имеют более простую конструкцию ротора;

обладают более высокой механической прочностью;

не требуют затрат мощности на возбуждение и при небольших потерях в роторе имеют более простую систему его охлаждения;

для размещения магнитов требуется в несколько раз меньше места, чем для размещения ферромагнитных полюсов с обмотками возбуждения [11].

Однако у таких генераторов есть серьезные недостатки, которые отсутствуют у синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением:

трудность изменения магнитного потока и регулирования выходного напряжения;

сложность снятия возбуждения при внутренних коротких замыканиях и повышенные потери в стали при максимальных оборотах;

невысокие рабочие температуры постоянных магнитов.

К преимуществам генераторов с электромагнитным возбуждением при непосредственном приводе от авиадвигателей также следует отнести то, что они способны вырабатывать электроэнергию с необходимыми параметрами без использования дополнительных преобразователей и отвечают основным требованиям, предъявляемым к авиационным синхронным генераторам (автономность, бесконтактность, возможность регулирования выходного напряжения в необходимом диапазоне) [2, 12, 16]. Ротор такого генератора может выполняться как с явно выраженными, так и с неявно выраженными полюсами. Однако его создание вызывает серьезные трудности при отсутствии устоявшихся подходов к расчету синхронных генераторов «плавающей» частоты вращения мощностью выше 250 кВА.

Решение проблемы – разработка методики расчета СГ «плавающей» частоты вращения, основанной на общепринятых методах проектирования электрических машин с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Такая методика может включать следующие этапы:

1. Выполнение аналитического электромагнитного расчета на минимальную частоту вращения для обеспечения необходимого значения ЭДС [13]. При этом необходимо учитывать максимально допустимую окружную скорость ротора и строить характеристики генератора;

2. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов МКЭ и расчеты на прочность в различных режимах работы с последующей доработкой конструктивной схемы на основании полученных результатов. На этом этапе аналитический расчет не проводится;

3. Сопоставление результатов доработанной конструктивной схемы генератора, полученных МКЭ, и результатов аналитического расчета.

Для получения наилучшего результата МКЭ становится неотъемлемой частью разработки электрических машин, так как позволяет анализировать предложенную конструкцию преобразователей достаточно подробно, причем время проектирования преобразователя значительно сокращается [14, 15].

**Конструктивная схема синхронного генератора.** Синхронная шестиполюсная машина номинальной мощностью 250 кВА и напряжением 240 В рассчитана на авиационную частоту 360–800 Гц и значения частоты вращения ротора в диапазоне 7200–16000 мин<sup>-1</sup>.

Электромагнитный аналитический расчет явнополюсного СГ выполнялся по методикам [16, 17], однако многие параметры определялись с использованием иных подходов. Ниже описаны некоторые из них:

1. При определении диаметра расточки статора  $D_p$  учитывалась максимально допустимая окружная скорость и не использовался рекомендуемый конструктивный коэффициент [16, 17];

2. Был выбран увеличенный размер воздушного зазора с целью уменьшения влияния реакции якоря (особенно в режимах перегрузки по току), а не минимально возможный для уменьшения индуктивного сопротивления;

3. Значение индукции в воздушном зазоре было принято равным  $B_\delta = 0,85$  Тл, а не близким к единице, с целью снижения плотности тока в обмотке возбуждения.

Анализ результатов моделирования МКЭ, проведенный после аналитического расчета явнополюсного и неявнополюсного генератора традиционного исполнения, показал, что в индукторе такого преобразователя присутствуют области сильного насыщения стали. В результате была доработана конструктивная схема неявнополюсного синхронного генератора с уменьшенным числом дополнительных зубцов на роторе и увеличенным до 70 мм диаметром вала (для генератора с явно выраженными полюсами 66 мм). Изменения были выполнены с учетом предельного насыщения используемой электротехнической стали.

На рис. 1,а представлен поперечный разрез СГ неявнополюсной конструкции традиционного ис-

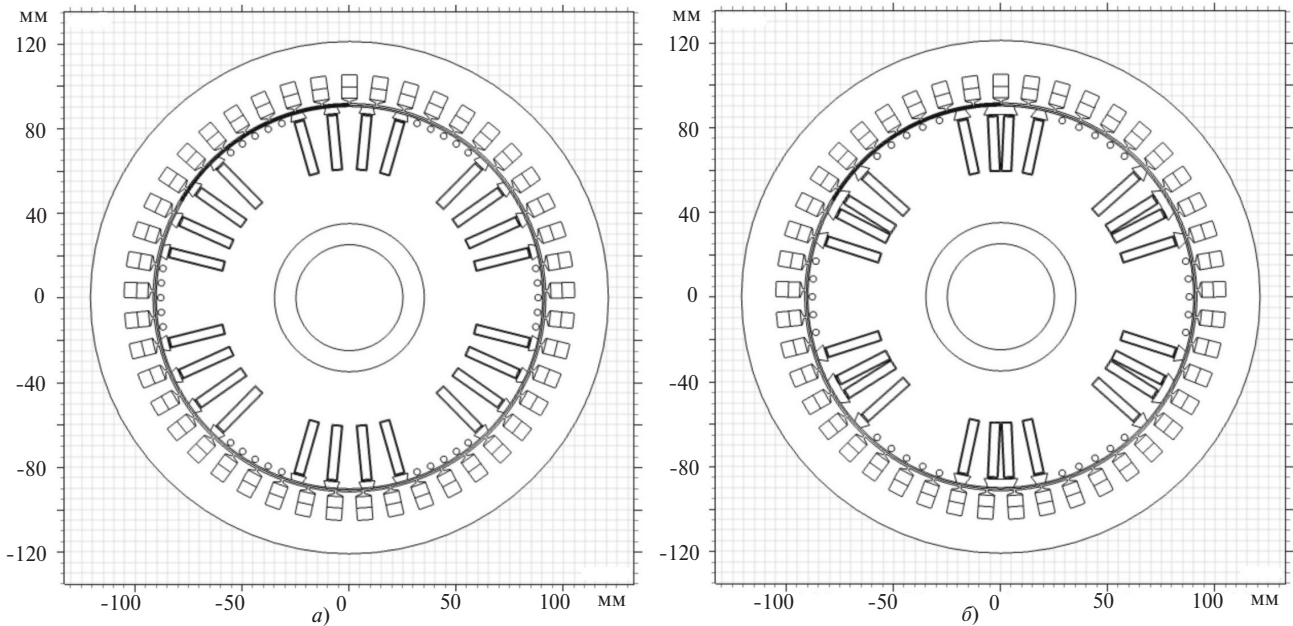


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны синхронного генератора: *a* – традиционное исполнение; *б* – с уменьшенным числом зубцов в индукторе

полнения, а на рис. 1, *б* – СГ с уменьшенным числом дополнительных зубцов. Обмотка возбуждения (ОВ) и трехфазная обмотка якоря (ОЯ) не показаны для упрощения. Источником магнитного поля является распределенная ОВ постоянного тока, расположенная на роторе в пазах, закрытых титановыми клиньями. Весь магнитопровод электрической машины изготовлен из листов электротехнической стали марки 49К2ФА.

Как видно из рис. 1, *б*, число дополнительных зубцов на роторе неявнополюсной машины уменьшено, а половина витков обмотки возбуждения соседних катушек расположена в одном пазу. Такая конструктивная схема ротора позволяет:

- увеличить ширину основного полюса на ширину дополнительного зубца, что, в свою очередь, позволяет снизить насыщение участков в магнитопроводе индуктора;

- увеличить диаметр вала;

- приблизить к синусоидальной форму индукции в воздушном зазоре за счет распределения обмотки возбуждения по пазам;

- улучшить отвод тепла из центральной зоны ротора генератора за счет рассредоточения ОВ в нескольких пазах [18].

**Результаты моделирования магнитных полей методом конечных элементов.** Проектирование авиационного генератора на предельно допустимые электромагнитные нагрузки выполнялось на основе компьютерных технологий конечно-элементного анализа в программном продукте COMSOL Multiphysics.

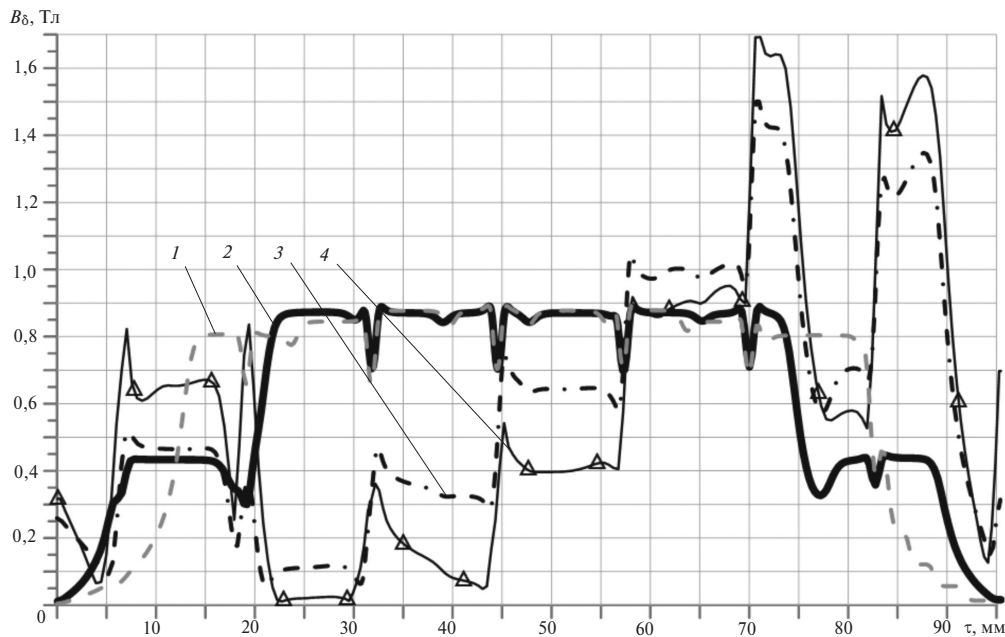
Для расчета плотности магнитного потока в воздушном зазоре  $B_\delta$  и разработки наиболее рацио-

нальной конструктивной схемы электрической машины был сделан численный расчет магнитных полей в двумерной постановке неявнополюсного доработанного синхронного генератора в режиме холостого хода (х.х.), номинальной нагрузки и двойной перегрузки по току. При расчете не были учтены потери на вихревые токи, скос пазов якоря и процессы в лобовых частях ОЯ.

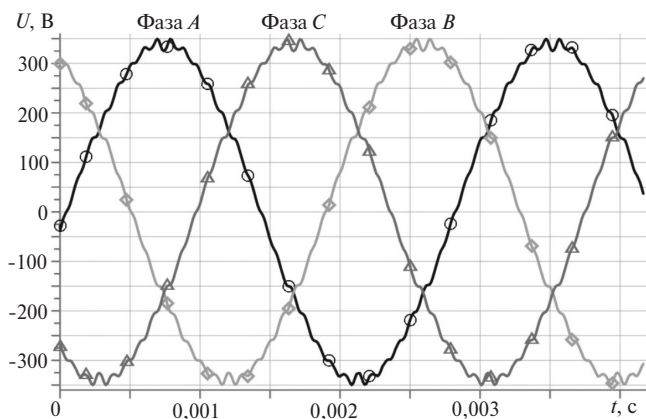
На рис. 2 представлен график распределения нормальной компоненты индукции в воздушном зазоре на полюсном делении  $\tau$  для явнополюсного и неявнополюсного генераторов доработанной конструкции.

Из рис. 2 видно, что изменение индукции в воздушном зазоре для явнополюсного генератора имеет форму, близкую к прямоугольнику. Для приведения ее к синусоиде необходимо увеличивать воздушный зазор на краях полюсного наконечника, что негативно скажется на насыщении стали в центральной части полюса. Неявнополюсный СГ с уменьшенным числом дополнительных зубцов имеет форму, сопоставимую с трапецией, что более предпочтительно. Это обусловлено тем, что ОВ распределена по пазам, а не сосредоточена.

Для оценки влияния реакции якоря на форму напряжения на рис. 2 представлены также графики изменения индукции в рабочем зазоре в режиме номинальной нагрузки и двукратной перегрузки по току. Видно, что под одним из краев полюса значение индукции магнитного поля больше, чем под другим. Это приведет к искажению формы выходного напряжения, в результате чего она будет отличаться от идеальной синусоиды (см. рис. 5).



**Рис. 2.** Изменение индукции в рабочем зазоре для рассчитанных явнополюсного и неявнополюсного СГ с уменьшенным числом дополнительных зубцов в различных режимах работы: 1 – рассчитанного явнополюсного СГ в режиме х.х.; 2 – неявнополюсного доработанного СГ в режиме х.х.; 3 – неявнополюсного доработанного СГ в режиме номинальной нагрузки; 4 – неявнополюсного доработанного СГ в режиме двойной перегрузки

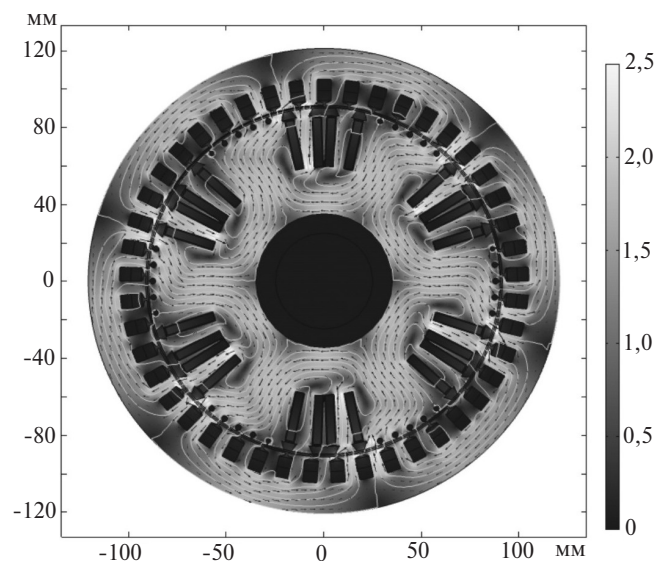


**Рис. 3.** Индуцированное значение ЭДС в обмотке якоря в режиме х.х. при  $n=7200 \text{ мин}^{-1}$

Для сравнения наведенной ЭДС в ОЯ с расчетным значением и оценки ее формы на рис. 3 был построен график индуцированной ЭДС в режиме х.х.

Из графика видно, что изменение во времени ЭДС, наведенной в ОЯ, имеет синусоидальный характер. Отклонения от синусоиды в амплитуде (провалы) вызваны тем, что в двумерной постановке не учитывался скос пазов якоря [19, 20].

На рис. 4 показано распределение магнитного поля при номинальной нагрузке в активной зоне генератора в установившемся режиме работы (в момент времени  $t=0,25 \text{ с}$ ), которое позволяет дать качественную оценку влияния реакции якоря на форму выходного напряжения. Распределение поля показывает, как при нагрузке искажается магнитный поток через ферромагнитный полюс и зубцы.



**Рис. 4.** Распределение магнитного поля в режиме номинальной нагрузки в установившемся режиме работы СГ

За счет распределения ОВ по пазам и увеличения ширины основного полюса магнитопровод индуктора менее насыщен по сравнению с явнополюсным ротором с сосредоточенными обмотками.

Несмотря на использование электротехнической стали с насыщением на уровне 2,1–2,2 Тл, отдельные области полюсов ротора и зубцов предельно насыщены. Ферромагнитные участки на роторе, по которым замыкается магнитный поток, имеют индукцию не более 1,9 Тл, что, в свою очередь, позволит в дальнейшем при необходимости увеличить диаметр вала электрической машины.

Подобная конструкция ротора обеспечивает необходимое значение МДС возбуждения генератора. Основные рассчитанные параметры генератора, подтвержденные численным расчетом МКЭ:

выходная мощность $S_H$ , кВА	250
номинальное напряжение $U_{НОМ}$ , В	240
электрическая частота $f$ , Гц	360÷800
число пар полюсов $p$	3
диаметр рашотки $D_p$ , мм	183
воздушный зазор $\delta$ , мм	1,5
активная длина $l_\delta$ , мм	226
индукция в рабочем зазоре $B_\delta$ , Тл	0,85
линейная нагрузка якоря $A$ , А/см	543
МДС об $F$ , А	2600
КПД $\eta$ , %	92

Получены графики индуцированных токов и напряжений в ОЯ для установившегося режима работы с учетом рабочей температуры и собственной индуктивности ОЯ. Расчет был выполнен для режима номинальной симметричной нагрузки при частотах вращения 7200 и 16000 мин<sup>-1</sup> (рис. 5).

Отклонения формы индуцированного напряжения и тока от синусоидальной вызваны влиянием реакции якоря. Действующие значения напряжения  $u = U_m / \sqrt{2} = 241$  В и тока  $i = I_m / \sqrt{2} = 349$  А полностью соответствуют значениям, полученным при аналитическом расчете.

Для оценки эксплуатационных характеристик генератора по результатам моделирования МКЭ

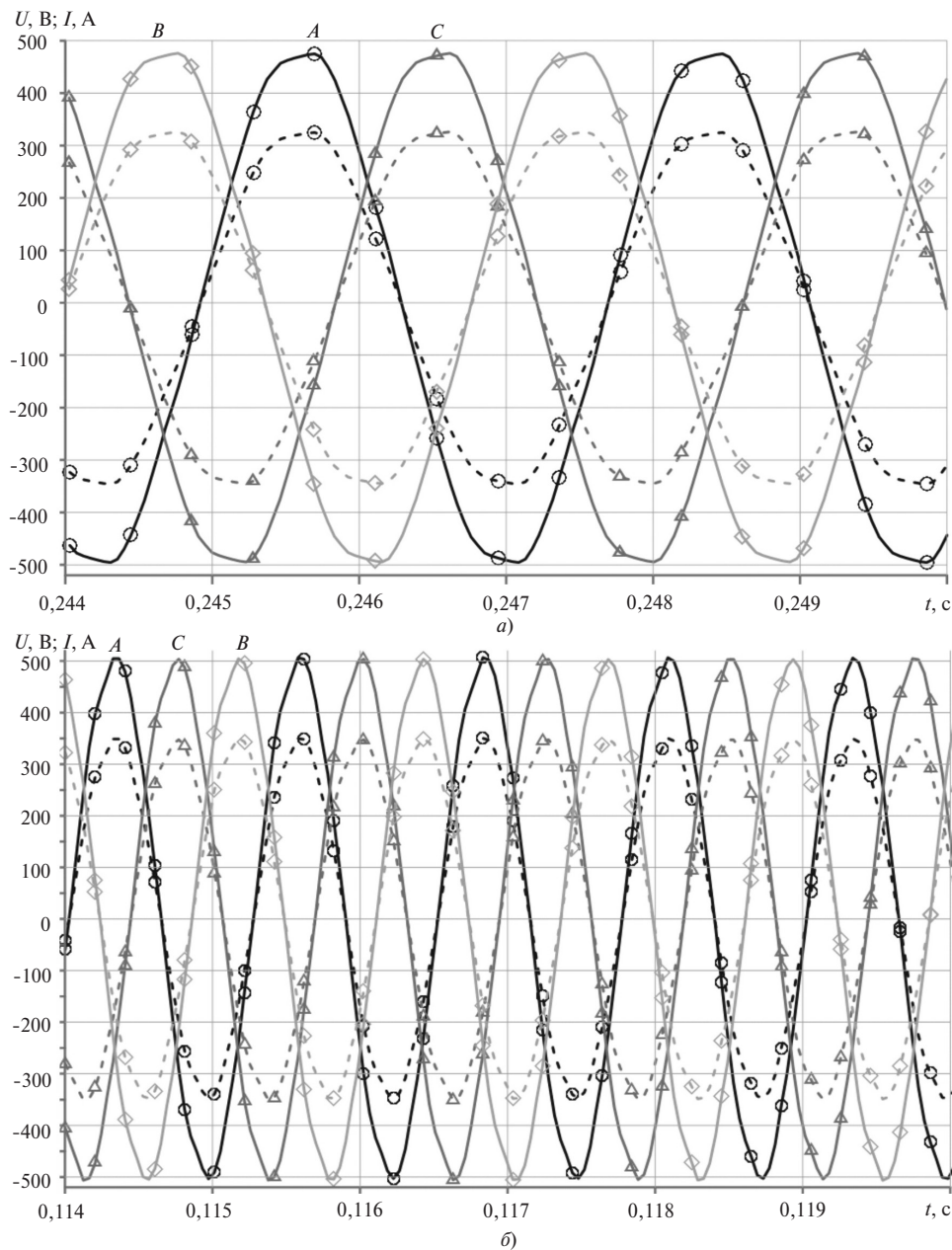
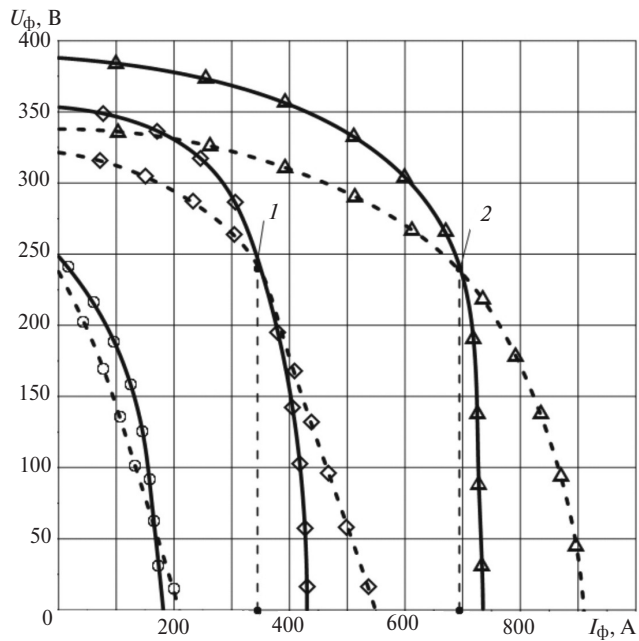


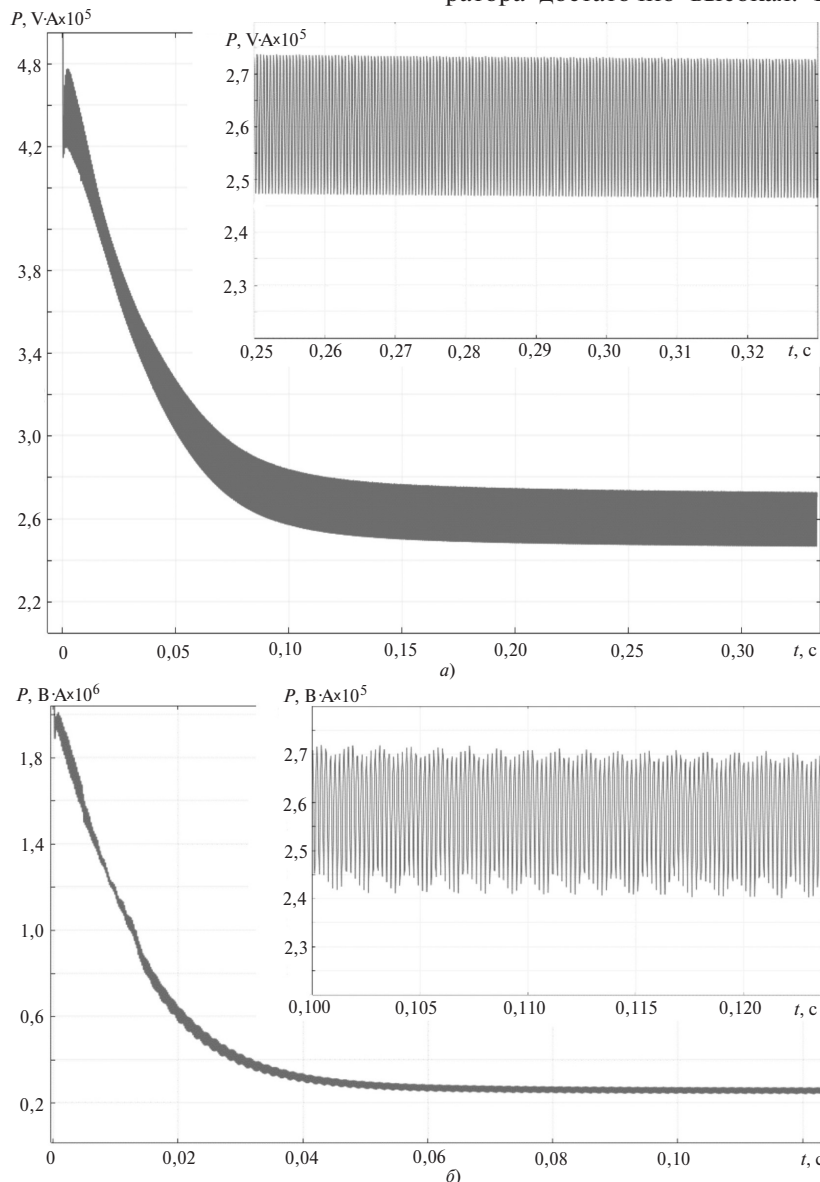
Рис. 5. Графики тока и напряжения генератора в установившемся режиме работы при активной нагрузке: а – при частоте вращения 7200 мин<sup>-1</sup>; б – при частоте вращения 16000 мин<sup>-1</sup>; — — индуцированный ток в обмотке якоря; ---- — индуцированное напряжение в обмотке якоря



**Рис. 6.** Внешние характеристики генератора: 1 – номинальный режим; 2 – режим двойной перегрузки по току; — — — характеристика, построенная по результатам численного расчета; - - - - характеристика, построенная по результатам аналитического расчета; ○ – ток возбуждения х.х.; ◇ – ток возбуждения в номинальном режиме; △ – ток возбуждения в режиме двойной перегрузки по току

были построены внешние характеристики (рис. 6) при различных нагрузках и токах возбуждения (х.х. номинальной нагрузки, режима двойной перегрузки по току) для частоты вращения  $7200 \text{ мин}^{-1}$  и рабочей температуры  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученные кривые наложены на график внешних характеристик, рассчитанных аналитически для явнополюсного генератора.

Как видно из рисунка, сходимость результатов аналитического расчета и численного моделирования после доработки конструктивной схемы генератора достаточно высокая. Наибольшее совпаде-



**Рис. 7.** Полная мощность генератора: а – при частоте вращения  $7200 \text{ мин}^{-1}$ ; б – при частоте вращения  $16000 \text{ мин}^{-1}$

ние наблюдается для режимов работы при номинальной нагрузке и двойной перегрузке по току. В этих случаях выходная мощность генератора соответствует расчетным значениям (рис. 7). Исходя из этого можно сделать следующие выводы:

принятый подход к расчету и моделированию магнитных полей для различных режимов работы АСГ верен;

доработка конструктивной схемы генератора при сохранении геометрии статора не влияет на выходную мощность для номинальных режимов работы.

Необходимо отметить, что при построении внешних характеристик были сделаны некоторые допущения:

характеристика, полученная с помощью аналитического расчета, была построена по осредненным значениям напряженности магнитного поля без учета глубокого насыщения некоторых участков магнитопровода статора при нагрузке. В связи с этим можно наблюдать рассогласование результатов аналитического и численного расчетов (рис. 6);

моделирование МКЭ выполнялось при активной нагрузке (а не активно-индуктивной) с целью сокращения времени расчета и качественной предварительной оценке характеристик генератора с измененным ротором.

В дальнейшем при численном моделировании динамических процессов СГ для более точного определения необходимого тока возбуждения при различных нагрузках планируется ввести контур регулирования. Его задача – путем изменения тока в ОБ поддерживать заданное значение выходного напряжения. Это позволит существенно повысить точность численных расчетов и сократить их длительность, особенно при моделировании магнитных полей для активно-индуктивной нагрузки.

**Выводы.** 1. Для систем генерирования переменного тока «плавающей» частоты вращения наиболее подходят трехкаскадные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением, так как они вырабатывают электроэнергию с необходимыми параметрами без использования дополнительных преобразователей и отвечают основным требованиям, предъявляемым к авиационным СГ (автономность, бесконтактность, возможность регулирования выходного напряжения в необходимом диапазоне).

2. Представленный в статье синхронный неявнополюсный генератор с уменьшенным числом зубцов индуктора обеспечивает номинальную мощность 250 кВА во всем диапазоне частот вращения от 7200 до 16000 мин<sup>-1</sup> (рис. 7). Особенность ротора предложенной конструкции – наличие пазов

различной ширины. Это уменьшает насыщение магнитопровода ротора в режимах, когда ток возбуждения максимален.

3. Расчет магнитных полей МКЭ показал, что при необходимости диаметр вала можно увеличить, что положительно скажется на прочности конструкции ротора генератора.

4. Предложенная методика расчета авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением повышенной мощности позволяет проектировать генераторы мощностью 250 кВА. При этом применение МКЭ существенно сокращает время проектирования преобразователя и повышает точность результатов расчета. Численный расчет также позволяет быстро оценивать выходные характеристики и параметры генератора с учетом насыщения стальных участков магнитопровода в различных режимах работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **787 Propulsion system** [Электрон. ресурс] [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q3/2/](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q3/2/) (дата обращения 14.01.2020).
2. **Электрооборудование** летательных аппаратов. Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов/Под. ред. С.А. Грузкова. М.: Изд-во МЭИ, 2005, 568 с.
3. **Abdel-Hafez Ahmed.** Power Generation and Distribution System for a More Electric Aircraft. In book: Recent Advances in Aircraft Technology. DOI: 10.5772/37290.
4. **Madonna V., Giangrande P., Galea M.** Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities. – IEEE Transactions on Transportation Electrification. DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142.
5. **Калий В.А., Щупаков А.С.** Совмещенная численная модель основного генератора и возбуждателя авиационного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением. – Вестник УГАТУ, 2016, № 4 (74), с. 80–83.
6. **Rosero J.A., Ortega J.A., Aldabas E., Romeral L.** Moving Towards a More Electric Aircraft. – IEEE A&E Systems Magazine, March 2007, pp. 3–9.
7. **Ситин Д.А., Левин Д.В., Мисютин Р.Ю., Зечихин Б.С.** Авиационные генераторы повышенной мощности. – Вестник МАИ, т. 18. № 6, с. 39–46.
8. **Morioka Noriko, Takeuchi Michiya, Oyori Hitoshi.** Moving to an All-Electric Aircraft System. – IHI Engineering Review, 2014, vol. 47 No. 1, pp 33–39.
9. **Lucjan Setlak, Member, Iaeng, Rafai Kowalik.** Advanced Technological Solutions of Key Components of Variable Frequency of Power Supply System ASE of Modern Aircraft in Accordance with the Concept of a More Electric Aircraft MEA. – Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2017 Vol I WCECS 2017, October 25–27, 2017, San Francisco, USA.
10. **Кузьмичев Р.В., Зечихин Б.С.** Генератор системы электроснабжения полностью электрифицированного самолета. – Тезисы докладов XVI Международ. научно-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2010, т. 2.
11. **Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Мисютин Р.Ю.** Авиационные генераторы с постоянными магнитами. – Электричество, 2018, № 6, с. 49–59.
12. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1990, 416 с.

13. Dezhin D.S., Ilyasov R.I., Kovalev K.L., Shevtsov D.A., Shishov D.M., Zechikhin B.S. 12-phases magneto-electric direct drive turbo generator. – 2019 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949936.

14. Stanislav Kocman, Pavel Pečínka, Tomáš Hrubý. Induction Motor Modeling Using COMSOL Multiphysics. – 17th Intern. Scientific Conf. on Electric Power Engineering (EPE). DOI: 10.1109/EPE.2016.7521727.

15. Stefano Nuzzo, Michael Galea, Chris Gerada, Neil Brown. Analysis, Modelling and Design Considerations for the Excitation Systems of Synchronous Generators. – IEEE Transactions on Industrial Electronics PP(99). September 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2756592.

16. Журавлев С.В., Зечихин Б.С. Автоматизированный расчет авиационного синхронного генератора: Учебное. пос. к курсовому и дипломному проектированию. М.: Изд-во МАИ, 2011, 59 с.

17. Зечихин Б.С., Радько М.С., Старовойтова Н.П., Цыбакова О.Ю. Автоматизированный расчет авиационного синхронного генератора: Методические разработки по курсовому и дипломному проектированию/Под ред. Б.С. Зечихина. М.: Изд-во МАИ, 1989, 64 с.

18. Mingda Liu, Yingjie Li, Hao Ding, Bulent Sarlioglu. Thermal Management and Cooling of Windings in Electrical Machines for Electric Vehicle and Traction Application. – 2017 IEEE Transportation Electrification Conf. and Expo (ITEC). DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993349.

19. Stefano Nuzzo, Michael Galea, Chris Gerada, Neil Brown. A Fast method for Modelling Skew and its Effects in Salient-Pole Synchronous Generators. – IEEE Transactions on Industrial Electronics PP(99): April 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2694378.

20. Lucjan Setlak, Rafał Kowalik. Comparative Analysis and Simulation of Selected Components of Modern on-board Autonomous Power Systems (ASE) of Modern Aircraft in line with the Concept of MEA/ AEA. – Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2016, October 19–21, 2016, San Francisco, USA.

[27.02.2020]

*А в т о р ы:* Дежин Дмитрий Сергеевич – кандидат техн. наук, доцент НИУ «Московский авиационный институт», диссертацию защитил в 2008 г.

Чикучинов Евгений Михайлович – студент магистратуры НИУ «Московский авиационный институт».

*Electrichestvo*, 2020, No. 5, pp. 45–53

DOI:10.24160/0013-5380-2020-5-45-53

## Development of a 250 kV·A Aircraft Synchronous Generator with a Variable Rotation Frequency

DEZHIN Lmitry S. (National Research University «Moscow Aviation Institute» – NRU «MAI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

CHIKUCHINOV Yeugene M. (NRU «MAI», Moscow, Russia) – magistrant

*To meet the growing demand for electric power on board of an aircraft, a need arises to construct powerful generators that have low mass, high power performance characteristics and mechanical strength. It is expected that by furnishing an aircraft with more electricity it will be possible to obtain numerous advantages, including lower costs for aircraft operation and maintenance [3]. The most promising way of achieving this is to use synchronous generators with electromagnetic excitation. However, the development of such machines involves serious difficulties stemming from lack of well-matured methods for analyzing synchronous generators with a floating rotation frequency for capacities above 250 kVA. The article describes an approach to elaborating a comprehensive technique for designing high-capacity aircraft synchronous generators that takes into account both structural strength matters and electromagnetic and thermal processes. The results from modeling the structural arrangement of a nonsalient-pole synchronous generator with a reduced number of inductor teeth are also given. Such generator provides the nominal power output equal to 250 kVA in the entire range of its rotation frequencies from 7200 to 16000 min<sup>-1</sup>.*

*К е у в о р д s:* aircraft synchronous generator, generator with electromagnetic excitation, inductor scheme, magnetic field modeling, generator numerical analysis

### REFERENCES

1. 787 Propulsion system [Electron. Resource] [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q3/2/](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q3/2/) (Data of apple 14.01.2020).

2. Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov. T. 1. Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov/Pod. red. S.A. Gruzskova (Electrical equipment of aircraft. Vol. 1. Power supply systems for aircraft /Under. ed. S.A. Gruzskov), Moscow, Publ. of Izd-vo MEI, 2005, 568 p.

3. Abdel-Hafez Ahmed. Power Generation and Distribution System for a More Electric Aircraft. In book: Recent Advances in Aircraft Technology. DOI: 10.5772/37290.

4. Madonna V., Giangrande P., Galea M. Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities. – IEEE Transactions on Transportation Electrification. DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142.

5. Kaliy V.A., Shchupakov A.S. Vestnik UGATU – in Russ. (Bulletin of Ural State Aviation Technical University), 2016, No. 4 (74), pp. 80–83.

6. Rosero J.A., Ortega J.A., Aldabas E., Romeral L. Moving Towards a More Electric Aircraft. – IEEE A&E Systems Magazine, March 2007, pp. 3–9.



7. **Sitin D.A., Levin D.V., Misyutin R.Yu., Zechikhin B.S.** *Vestnik MAI – in Russ. (Bulletin of Moscow Aviation Institute)*, vol. 18, No. 6, pp. 39–46.
8. **Morioka Noriko, Takeuchi Michiya, Oyori Hitoshi.** Moving to an All-Electric Aircraft System. – *IHI Engineering Review*, 2014, vol. 47 No. 1, pp 33–39.
9. **Lucjan Setlak, Member, Iaeng, Rafal Kowalik.** Advanced Technological Solutions of Key Components of Variable Frequency of Power Supply System ASE of Modern Aircraft in Accordance with the Concept of a More Electric Aircraft MEA. – *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2017 Vol I WCECS 2017*, October 25–27, 2017, San Francisco, USA.
10. **Kuz'michev R.V., Zechikhin B.S.** *Generator sistemy elektrosnabzheniya polnost'yu elektrifitsirovannogo samoleta. – Tezisy dokladov XVI Mezhdunarod. nauchno-tekhn. konf. studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotehnika i energetika»* (Power generator of a fully electrified aircraft. Abstracts of reports XVI International scientific and technical conf. students and graduate students «Radioelectronics, Electrical Engineering and Energy»). Moscow, Publ. of MEI, 2010, vol. 2.
11. **Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Misyutin R.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 6, pp. 49–59.
12. **But D.A.** *Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny* (Contactless electric machines). Moscow, Vysshaya shkola 1990, 416 c.
13. **Dezhin D.S., Ilyasov R.I., Kovalev K.L., Shevtsov D.A., Shishov D.M., Zechikhin B.S.** 12-phases magneto-electric direct drive turbo generator. – 2019 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949936.
14. **Stanislav Kocman, Pavel Pečinka, Tomáš Hrubý.** Induction Motor Modeling Using COMSOL Multiphysics. – 2016 17th Intern. Scientific Conf. on Electric Power Engineering (EPE). DOI: 10.1109/EPE.2016.7521727.
15. **Stefano Nuzzo, Michael Galea, Chris Gerada, Neil Brown.** Analysis, Modelling and Design Considerations for the Excitation Systems of Synchronous Generators. – *IEEE Transactions on Industrial Electronics* PP(99). September 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2756592.
16. **Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S.** *Avtomatizirovannyi raschet aviatsionnogo sinkhronnogo generatora: Uchebnoye. pos. k kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu* (Automated calculation of an aircraft synchronous generator: Training. pos. to term and diploma design). M.: Izd-vo MAI, 2011, 59 p.
17. **Zechikhin B.S., Rad'ko M.S., Starovoytova N.P., Tsybakova O.Yu.** *Avtomatizirovannyi raschet aviatsionnogo sinkhronnogo generatora: Metodicheskiye razrabotki po kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu/Pod red. B.S. Zechikhina* (Automated Calculation of Aircraft Synchronous Generator: Methodological Developments in Course and Diploma Design/Ed. B.S. Zechikhin). Moscow, Publ. of MAI, 1989, 64 p.
18. **Mingda Liu, Yingjie Li, Hao Ding, Bulent Sarlioglu.** Thermal Management and Cooling of Windings in Electrical Machines for Electric Vehicle and Traction Application. – 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). DOI: 10.1109/ITEC.2017.7993349.
19. **Stefano Nuzzo, Michael Galea, Chris Gerada, Neil Brown.** A Fast method for Modelling Skew and its Effects in Salient-Pole Synchronous Generators. – *IEEE Transactions on Industrial Electronics* PP(99): April 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2694378.
20. **Lucjan Setlak, Rafal Kowalik.** Comparative Analysis and Simulation of Selected Components of Modern on-board Autonomous Power Systems (ASE) of Modern Aircraft in line with the Concept of MEA/ AEA. – *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2016*, October 19–21, 2016, San Francisco, USA.

[27.02.2020]