

Прокофьев Максим Александрович, курсант,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Prokofiev Maksim Aleksandrovich , Cadet,
Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy"

Али Исмаил, адъюнкт,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Ali Ismail , Adjunct,
Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy"

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ГЕНЕРАТОРОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАД ГЕНЕРАТОРАМИ ПОСТОЯННОГО
ТОКА В АЭРОДРОМНЫХ ПОДВИЖНЫХ АГРЕГАТАХ**
**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ADVANTAGES OF AC GENERATORS
OVER DC GENERATORS IN AIRPORT MOBILE UNIT EQUIPMENT**

Аннотация. Генераторы постоянного тока длительное время применялись в аэродромных подвижных электроагрегатах (АПА) первого и второго поколений. Но появились генераторы переменного тока, которые их полностью заменили. По отношению к генераторам постоянного тока они имеют меньшую массу, больший КПД и они проще в эксплуатации, а легкость трансформации переменного напряжения и простота его преобразования в постоянное с помощью статических выпрямителей вообще не оставляет шансов генераторам постоянного тока. В данной статье освещены преимущества и недостатки генераторов переменного тока над генераторами постоянного тока и перспективы их применения

Abstract. DC generators have been used for a long time in airfield mobile electric units (APAS) of the first and second generations. But there were alternators that completely replaced them. In relation to DC generators, they have a lower mass, higher efficiency and are easier to operate, and the ease of converting AC voltage and the ease of converting it to DC using static rectifiers leaves no chance for DC generators at all. This article highlights the advantages and disadvantages of alternating current generators over direct current generators and the prospects for their application.

Ключевые слова: Аэродромно подвижный агрегат, генератор постоянного тока, генератор переменного тока, напряжение.

Keywords: Airfield mobile unit, DC generator, AC generator, voltage.

На агрегатах АПА-5, АПА-35, АПА-50, выпускавшихся в 1950-1970-х годах, устанавливались генераторы постоянного тока. Они предназначены для преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного напряжения 28,5 В, используемую для питания бортовых приемников электрической энергией с целью их проверки и наземного запуска авиационных двигателей. Получение постоянного тока происходит с помощью коллекторно-щеточного узла. Ресурс щеточного аппарата составлял 800-1500 ч, что требовало замены каждые 200-300 ч наработки в условиях аэродрома.



Удельная мощность не превышала 1,2-1,8 кВт/кг при КПД 75-82 %. Искрообразование на коллекторе создавало помехи в диапазоне 0,15-30 МГц, нарушая работу радиосвязного оборудования наземных служб.

В 1980-1990-е годы начался переход на генераторы переменного тока средней частоты 400 Гц, который завершился к началу 2000-х. К настоящему времени генераторы постоянного тока полностью вытеснены из новых аэродромных агрегатов во всех странах НАТО и Российской Федерации.

Современные аэродромные подвижные агрегаты (АПА-80, АПА-100, АПА-5Д, АПА-100М, ТА-80, GPU-400) оснащаются трёхфазными синхронными генераторами переменного тока 115/200 В, 400 Гц. Возбуждение осуществляется бесщёточным способом через врачающийся выпрямитель или постоянными магнитами (PMG – Permanent Magnet Generator). КПД достигает 94-96 %, удельная мощность – 4,5-6,0 кВт/кг (в отдельных образцах до 7,2 кВт/кг), средняя наработка на отказ – 20 000-35 000 ч. Отсутствие скользящих контактов исключает искрение и повышает пожаробезопасность при заправке топливом вблизи ВС [1, с.54].

Конструкция ротора с постоянными магнитами (например, на базе сплава Sm₂Co₁₇ или NdFeB) позволила полностью отказаться от системы возбуждения с контактными кольцами и щётками даже для подпитки обмотки возбуждения. Это сократило массу генератора на 15-20 % по сравнению с бесщёточными машинами с врачающимся выпрямителем.

Передача энергии в системах переменного тока осуществляется через трансформаторно-выпрямительные блоки с КПД 97-98 %. Это позволяет подавать на борт самолёта как переменный ток 115 В, 400 Гц для систем авионики, так и постоянный 28,5 В для зарядки аккумуляторов – через один кабельный комплект. В агрегатах с DC-генераторами требовались два независимых контура: силовой 28,5 В и вспомогательный 115 В через мотор-генератор с КПД 78-85 % и массой до 0,5 кг/кВт.

Современные АПА оснащаются встроенным статическими преобразователями 115/200 В → 28,5 В мощностью 600-1200 А (до 35 кВт постоянного тока). Такие преобразователи выполнены на IGBT-транзисторах или SiC MOSFET, имеют массу 35-45 кг и КПД 97,5-98,5 %. Это позволило отказаться от тяжёлых низковольтных кабелей большого сечения (240-400 мм²), заменив их на один универсальный кабель переменного тока сечением 35-50 мм² [2, с. 12].

Тепловой режим генераторов переменного тока более устойчив при эксплуатации на открытом воздухе. Индукционные потери распределяются равномерно по статору, охлаждение принудительным воздухом или маслом обеспечивает ΔT < 80 К при температуре окружающей среды +50 °С. Коллекторные машины требовали усиленного обдува щёток, что повышало уровень шума до 95 дБ и увеличивало расход топлива на 12-15 %.

В современных генераторах применяется жидкостное охлаждение (масляное или на основе антифриза), что снижает акустический шум до 72-78 дБ на расстоянии 7 м. Это особенно важно при работе на перронах гражданских аэропортов, где введены жёсткие нормы по шуму (ICAO Annex 16).

Электромагнитная совместимость критична при одновременной работе нескольких АПА на перроне. Генераторы постоянного тока создают импульсные помехи до 110 дБмкВ, проникающие в системы наземного радиолокационного обеспечения. Переменный ток 400 Гц фильтруется пассивными LC-контурами с затуханием 50 дБ/октава, а экранированные кабели снижают излучение до -35 дБм.

Дополнительно в современных АПА применяются активные фильтры гармоник (AFC) и выходные синусоидальные фильтры, обеспечивающие коэффициент нелинейных искажений THD < 1,5 % (требование MIL-STD-704F и ГОСТ Р 54073-2010). Это делает возможной одновременную работу до 8-10 агрегатов на одном перроне без взаимных помех [3, с. 38].



За счёт отсутствия щёточного аппарата межрегламентный период современных генераторов составляет 10 000-15 000 ч, а полный назначенный ресурс – до 50 000 ч. Стоимость одного часа эксплуатации генератора переменного тока в 2,5-3 раза ниже, чем у DC-генераторов 1970-х годов выпуска (с учётом замены щёток, коллекторного обслуживания, повышенного расхода топлива).

В ближайшие 5-10 лет ожидаются следующие тенденции:

- Переход на генераторы с высокотемпературными постоянными магнитами и жидкостным охлаждением мощностью 140-180 кВА при массе менее 150 кг (удельная мощность > 8 кВт/кг).

- Интеграция силовой электроники непосредственно в корпус генератора (интегрированные стартер-генераторы для гибридных АПА).

- Применение карбид-кремниевых (SiC) и нитрид-галлиевых (GaN) преобразователей для получения 28,5 В с КПД > 99 % и массой < 20 кг.

- Разработка агрегатов мощностью 180–270 кВА для одновременного питания двух воздушных судов или одного широкофюзеляжного (A380, B777-300ER) без привлечения стационарных источников [4, с. 87].

Генераторы переменного тока в аэродромных подвижных агрегатах превосходят генераторы постоянного тока по удельной мощности, КПД, ресурсу, массогабаритным характеристикам, пожаробезопасности и электромагнитной совместимости. А отсутствие коллекторно-щеточного узла обеспечивает долговечность генераторов переменного тока. Поэтому их применение гарантирует электроснабжение современных воздушных судов при минимальных эксплуатационных затратах. В ближайшем будущем генераторы переменного тока будут иметь всё большую мощность для обслуживания современных воздушных судов или одновременно нескольких судов.

Список литературы:

1. Аполлонский С.М. Электрические машины авиационного оборудования // Вестник Военно-воздушной академии имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. 2018. № 3. С. 54-62.
2. Иванов А.А. Современные синхронные генераторы с постоянными магнитами для наземного электроснабжения воздушных судов // Электротехника. 2022. № 7. С. 12-19.
3. Козлов В.Н., Степанов А.В. Аэродромные подвижные электроагрегаты нового поколения // Авиационная техника и технологии. 2020. № 2. С. 38-45.
4. Сидоров О.П., Петров Д.Л. Сравнение характеристик генераторов постоянного и переменного тока в составе АПА // Военно-технический сборник. 2019. № 1. С. 87-94.

References:

1. Apollonsky S.M. Electric machines of aviation equipment // Bulletin of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy. 2018. No. 3. Pp. 54-62.
2. Ivanov A.A. Modern synchronous generators with permanent magnets for ground-based power supply of aircraft // Electrical Engineering. 2022. No. 7. Pp. 12-19.
3. Kozlov V.N., Stepanov A.V. Aerodrome mobile power units of the new generation // Aviation equipment and technologies. 2020. No. 2. Pp. 38-45.
4. Sidorov O.P., Petrov D.L. Comparison of the characteristics of DC and AC generators as part of the APA // Military-technical collection. 2019. No. 1. Pp. 87-94.

