

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТАХ АПА–5Д И АПА–100

Н.А. Пеньков¹, М.А. Прокофьев²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия, myth_np_nikit@mail.ru

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия, maks.prokofev04@mail.ru

Аннотация. Передвижные электроагрегаты (АПА) являются важным элементом наземного обеспечения авиационной техники, обеспечивая электростартерный запуск двигателей и питание бортовых систем. АПА–5Д и АПА–100, построенные на шасси Урал–4320, представляют собой примеры советской и российской инженерной школы. Важное различие между ними заключается в системах автоматического регулирования напряжения переменного тока (АСР ПТ): АПА–5Д использует магнитные усилители, характерные для технологий 1960–1970-х годов, тогда как АПА–100 оснащена более современной импульсной системой на базе триггера Шмитта. В данной статье мы сравним принципы работы этих систем, их преимущества и недостатки, а также оценим перспективы их развития в контексте современных требований к надежности, эффективности и интеграции с цифровыми технологиями.

Ключевые слова: Передвижные электроагрегаты, система автоматического регулирования, магнитные усилители, широтно-импульсная модуляция.

COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOMATIC AC REGULATION SYSTEMS IN MOBILE ELECTRICAL UNIT APA–5D AND APA–100

N.A. Penkov¹, M.A. Prokofiev²

¹ Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia, myth_np_nikit@mail.ru

² Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia, maks.prokofev04@mail.ru

Abstract. Mobile power units (MPUs) are an important element of ground support for aviation equipment, providing electric starting of engines and power supply for onboard systems. MPUs–5D and MPUs–100, built on the Ural–4320 chassis, are examples of the Soviet and Russian engineering school. An important difference between them lies in the AC voltage automatic control systems (ACVCS): the APA–5D uses magnetic amplifiers, which are typical of the technologies of the 1960s and 1970s, while the APA–100 is equipped with a more modern pulse system based on the Schmitt trigger. In this article, we will compare the principles of operation of these systems, their advantages and disadvantages, and assess their development prospects in the context of modern requirements for reliability, efficiency, and integration with digital technologies.

Keywords: mobile power units, automatic control system, magnetic amplifiers, pulse-width modulation.

Рассмотрим принципы работы систем автоматического регулирования напряжения постоянного тока (АСР ПТ). Система на магнитных усилителях (АПА–5Д).

Магнитный усилитель (МУ) — это электромагнитное устройство, использующее нелинейные свойства ферромагнитных материалов для усиления или преобразования электрических сигналов. В АПА–5Д магнитный усилитель интегрирован в цепь возбуждения синхронного генератора ГТ40ПЧ6, обеспечивая стабилизацию напряжения 115/200 В при частоте 400 Гц и мощности выдаваемого тока до 40 кВА. Управляющий сигнал от датчика напряжения изменяет магнитное насыщение сердечника, что модулирует ток в обмотках. Регулирование осуществляется за счет изменения полного сопротивления переменному току без использования электронных компонентов. Основные элементы системы включают трехфазный магнитный усилитель в релейном режиме, фильтры и обратную связь по напряжению. Основные характеристики представленной системы: стабилизация напряжения в пределах $\pm 2\text{--}3\%$ от номинального значения при нагрузке от 0 до 100% до значения, заявленного в паспорте на рассматриваемый электроагрегат, время реакции составляет 0.1–0.5 с [1].

Импульсная система регулирования в АПА–100 использует электронику для широтно–импульсной модуляции (ШИМ) в цепи возбуждения генератора мощностью до 100 кВт. Центральным элементом является триггер Шмитта — электронная схема, которая преобразует изменяющийся аналоговый сигнал в стабильный цифровой сигнал (прямоугольные импульсы) за счет использования явления гистерезиса, то есть разных порогов переключения для нарастающих и спадающих сигналов. Датчик напряжения сравнивается с опорным сигналом, а триггер Шмитта генерирует импульсы, управляющие тиристорами или транзисторами для регулировки средней мощности. Система включает триггер на базе операционных усилителей или логических микросхем (например, К155ЛА3), фильтры для сглаживания и, в модернизированных версиях, микроконтроллеры для реализации логических операций. Характеристики такого электроагрегата: стабилизация напряжения $\pm 1\%$ от номинального значения, время реакции составляет порядка 10–50 мс, обеспечение корректной работы потребителей, при величине нагрузок, достигающей до 100 кВт [2]. Сравнение параметров систем АСР ПТ АПА–5Д и АПА–100 представлены в таблице 1.

Таблица 1 Сравнение параметров систем АСР ПТ АПА–5Д и АПА–100
Table 1. Comparison of APA–5D and APA–100 AVR System Parameters

Параметр	АПА–5Д	АПА–100
Мощность переменного тока	До 40 кВА	До 100 кВт
Точность регулирования	$\pm 2\text{--}3\%$	$\pm 1\%$
Время реакции	0,1–0,5 с	10–50 мс
Размер и вес	Большие, тяжелые	Компактные
Энергоэффективность	70–80% (потери на нагрев)	90–95% (минимальные потери)
Надежность в экстремальных условиях	Высокая (устойчивость к вибрациям и электромагнитным помехам)	Средняя (чувствительность к ЕМІ).
Стоимость производства	Низкая (простая конструкция)	Средняя (сложная электроника)
Интеграция с цифровыми системами	Ограниченная	Высокая (легко интегрируется с микроконтроллерами).

Для проведения качественного сравнительного анализа перспективы модернизации представленных электроагрегатов рассмотрим их преимущества и недостатки в совокупности. магнитных усилителей (АПА–5Д) [3].

Преимущества использования конструкции на базе МУ:

- отсутствие подвижных частей и полупроводников обеспечивает высокую надежность (срок службы более 20 лет);
- устойчивость к перегрузкам и радиации, что делает систему идеальной для военных и аэродромных условий.
- простота конструкции: минимальное обслуживание и низкая стоимость производства.

Недостатки:

- низкая скорость и точность регулирования, что ограничивает применение при динамичных нагрузках;
- значительные габариты и вес (до 10 тонн для АПА–5Д), усложняющие транспортировку;
- низкая энергоэффективность из-за потерь на гистерезис и нагрев.

Достоинства и недостатки использования импульсных систем с триггером Шмитта (АПА–100).

Преимущества:

- быстрое реагирование на изменения нагрузки, поддержка больших мощностей;
- снижение веса агрегата и упрощение монтажа;
- возможность модернизации для цифрового управления.

Недостатки:

- триггер Шмитта чувствителен к электромагнитным помехам. Он подавляет шумы, но требует экранирования;
- большое количество электронных компонентов увеличивает риск отказов от перегрева или вибраций;
- полупроводники быстро устаревают, требуя замены.

Технология магнитных усилителей достигла своего пика в 1970–1980-х годах и сегодня считается устаревшей для большинства применений. Однако, преимущество их использования неоспоримо. Этому свидетельствуют следующие достоинства:

- добавление современных датчиков и цифровых фильтров (как в АПА–5ДМ–120) может повысить точность регулирования;
- магнитные усилители сохраняют актуальность в условиях сильных электромагнитных помех или высоких температур (например, в атомной энергетике или космосе). Исследования наноферритовых материалов открывают возможности для миниатюризации;
- низкое энергопотребление в режиме ожидания делает их привлекательными для энергоэффективных систем.

Тем не менее, всё указывает на постепенное замещение магнитных усилителей цифровыми решениями.

Импульсные системы на базе триггера Шмитта представляют собой основу современной электроники с большим потенциалом развития [4]:

интеграция с микроконтроллерами (например, Arduino, STM32) позволяет внедрять предиктивную диагностику и удаленный мониторинг. В АПА–100–СА уже используются двигатели ЯМЗ–536 с электронным управлением.

Переход на транзисторы из нитрида галлия (GaN) может повысить КПД до 98% и обеспечить мощность до 200 кВт и выше для питания электросамолетов. Триггер Шмитта может служить базовым элементом для адаптивных алгоритмов, прогнозирующих отказы и оптимизирующих работу под нагрузку.

АПА–5Д с магнитными усилителями остается надежным решением для экстремальных условий, но его перспективы ограничены из-за устаревания технологии. АПА–100 с импульсными системами на базе триггера Шмитта демонстрирует более высокую динамику, точность и потенциал для интеграции с цифровыми решениями, что делает его предпочтительным в условиях цифровой трансформации [5]. Будущее передвижных электроагрегатов связано с гибридными системами, сочетающими надежность магнитных усилителей с высокой скоростью и адаптивностью электроники. В авиационной отрасли это означает переход к «умным» аэродромным передвижным электроагрегатам с элементами искусственного интеллекта, где импульсные системы будут доминировать. Рекомендуется модернизация существующего парка АПА для повышения энергоэффективности, что позволит соответствовать современным требованиям и продлить срок службы техники. Потенциала в этом направлении, как было показано выше, у автомобиля АПА-100У значительно больше [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков, А.А. Электронные устройства автоматизации. М.: Наука, 1978. – 208 с.
2. Веников, В.А. Теория магнитных усилителей. М.: Энергия, 1970. – 240 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
4. Розенблат, М.А. Магнитные усилители с самонасыщением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 123 с. с черт. («Библиотека по автоматике», выпуск 75).
5. Средства электроснабжения воздушных судов: учебник/Скребов Н.Н., Тюнин А.Б., Шуклин И.К. – Воронеж: Вунц ВВС «ВВА», 2021. – 393 с.
6. Чижено, И.М. Автоматизация систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 1987. – 336 с.

REFERENCES

1. Bulgakov, A.A. Electronic Automation Devices. Moscow: Nauka, 1978. – 208 p.
2. Venikov, V.A. Theory of Magnetic Amplifiers. Moscow: Energiya, 1970. – 240 p.
3. Klyuchev, V.I. Theory of Electric Drive: Textbook for Universities. Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 560 p.
4. Rosenblat, M.A. Magnetic amplifiers with self-saturation. M.—L., Gosenergoizdat, 1963, 123 p. with drawings. («Automation Library», issue 75).
5. Means of aircraft power supply: textbook/Skrebotov N.N., Tyunin A.B., Shuklin I.K. – Voronezh: Vunts VVS «VVA», 2021. – 393 p.
6. Chizhenko I.M. Automation of Power Supply Systems. Moscow: Vysshaya Shkola, 1987. – 336 p.