

режимах его работы (1–2, 1–3, 2–3). Поскольку индуктивности рассеяния очень слабо зависят от магнитной проницаемости магнитопровода, коэффициенты магнитного состояния, рассчитанные с помощью метода конечных элементов с применением пакета ELCUT при существенно заниженных значениях магнитной проницаемости магнитопровода ($m=100\mu_0$ и $m=1000\mu_0$), практически не отличаются от значений, рассчитанных с использованием схемы замещения трехобмоточного трансформатора, которая соответствует магнитной проницаемости магнитопровода $m=\infty$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оборудование** для контактной сварки: Справочное пособие/Под ред. В.В. Смирнова. – СПб: Энергоатомиздат, 2000.
2. **Вольдек А.И.** Электрические машины. – Л: Энергия, 1978.
3. **Шакиров М.А., Варламов Ю.В., Дуань Лион.** Картины аномальных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях. – НТВ, 2010, 1(95).
4. **Шакиров М.А., Андрущук В.В., Дуань Лион.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании. – Электричество, 2010, №3.
5. **Шакиров М.А.** 2Т-образные схемы замещения трансформатора. – Электричество, 2010, №5.
6. **Сахно Л.И.** Исследование двухмостовых выпрямителей с крутопадающими внешними характеристиками. – Электричество, 2002, №2.
7. **Сахно Л.И.** К вопросу о схеме замещения трехобмоточного трансформатора. – Электричество, 2003, №8.
8. **Рыськова З.А., Федоров П.Д., Жимерова В.И.** Трансформаторы для электрической контактной сварки. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

[09.02.11]

Автор: Сахно Людмила Ивановна окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ) в 1974 г. В 2006 г. в СПбГПУ защитила докторскую диссертацию «Теория, разработка и исследование новых экономичных двухмостовых сварочных выпрямителей с многообмоточными трансформаторами». Профессор кафедры теоретических основ электротехники СПб ГПУ.

* * *

Аэродромные светосигнальные системы на постоянном токе

БЕРГ В.Р., МИРОШНИЧЕНКО А.В.

Дан аналитический обзор состояния отечественных аэродромных светосигнальных систем (АССС), систематизированы их недостатки и рассмотрены перспективы развития. Предлагаемая концепция модернизации АССС основана на использовании в цепях питания аэродромных огней напряжения постоянного тока вместо переменного и использовании достижений в силовой полупроводниковой технике. В качестве излучателей света рекомендованы сверхяркие светодиоды.

Ключевые слова: аэродромное светосигнальное оборудование, цепи питания, постоянный ток, сверхяркие светодиоды, коэффициент мощности, модернизация

Эксплуатируемые в стране аэродромные светосигнальные системы (АССС) сегодня морально устарели и не соответствуют уровню накопленного научно-технического потенциала. Актуальность рассмотрения и решения обозначенной проблемы не вызывает сомнений. В статье рассматриваются некоторые аспекты модернизации АССС, основанные на переходе к использованию в цепях питания аэродромных огней (АО) постоянного тока вместо переменного и использовании современных достижений в полупроводниковой технике.

An analytical review is given to the state of Russian airfield lighting systems (ALSs), their drawbacks are systematized, and prospects for future development of these systems are considered. A concept for modernizing them is proposed, the key principles of which are as follows: making a shift for using a DC voltage in the power supply circuits of ALSs instead of AC voltage and using the achievements in power semiconductors. High-brightness light-emitting diodes are recommended for use as light sources for airfield lights.

Key words: airfield lighting equipment, power supply circuits, direct current, power factor, high-brightness light-emitting diodes, modernization

Под АССС понимается совокупность светосигнальных приборов, электротехнического оборудования и аппаратуры управления, размещенных на взлетно-посадочной полосе (ВПП) и предназначенных для обеспечения заключительного этапа захода на посадку, посадки, руления или взлета воздушного судна при различных условиях видимости. В зависимости от длины аэродромные ВПП подразделяются на следующие классы [1]: I – при длине ВПП до 3500 м, II – до 2500 м, III – до 1800 м. Ясно, что число АО на ВПП разных классов раз-

лично, но общее размещение их относительно ВПП одинаковое и осуществляется по стандартным схемам согласно руководящим авиационным документам [1–3]. На аэродроме АО группируются по функциональной принадлежности и излучают свет определенного цвета и интенсивности. Причем интенсивность свечения групп определенным образом сбалансирована и соответствует метеорологической дальности видимости на ВПП. Световой баланс между группами достигается специальной конструкцией оптических систем АО и применением ламп разной мощности. Требуемая интенсивность свечения АО (как функция метеорологической дальности видимости) обеспечивается регулятором яркости (РЯ). Аэродромные огни одного функционального назначения соединяются в специальные цепи, называемые кабельными кольцами (КК), которые и являются нагрузкой для РЯ.

Таким образом, подсистема РЯ–КК является основным узлом АССС. В этой подсистеме обеспечивается ступенчатая стабилизация выходного тока при колебаниях напряжения сети или при изменениях полного сопротивления КК, а также такие обязательные сервисные функции, как измерение сопротивления изоляции КК, автоматическое отключение при обрыве КК и др. Система управления согласовывает работу КК на аэродроме. Принципы технической реализации подсистемы РЯ–КК описаны в [4, 5].

Для питания АО применяются последовательные или параллельные цепи. На некатегорированных аэродромах применяются оба способа. На категорированных аэродромах последовательное включение АО до сих пор считается единственно возможным ввиду жестких требований к равномерности их свечения. Особенности построения АССС категорированной посадки определяют специфические условия работы магистрального кабеля в КК, среди которых основное – высокое рабочее напряжение (5–6 кВ) при относительно небольшом токе (6–8 А). Например, в АССС «Луч-4 МС» производства ОАО «ГОКБ «Прожектор» применяется высоковольтный одножильный медный кабель типа КВОРЭН (сечением 6 мм на напряжение 5 кВ) или аналогичный импортный.

Значение тока в КК определяется типом используемого светоизлучателя (СИ). Сегодня в це-

лях безопасности в АО используются низковольтные лампы, например отечественные кварцевые галогенные лампы марки КГМ для тока 6,6 А мощностью 150,65 и 45 Вт или аналогичные импортные. Подключают АО к КК через изолирующие трансформаторы (ИТ) для гальванической развязки с высоковольтной магистралью. Таким образом, схема питания КК представляет собой совокупность отрезков кабелей, последовательно соединяющих ИТ, ко вторичным обмоткам которых подключены АО. Как уже отмечалось, на разных аэродромах конфигурация АССС различна, и, следовательно, нагрузка на сеть будет различная (на сегодня максимальная мощность КК около 30 кВт). Схема питания АО на напряжении переменного тока в КК последовательного типа представлена на рис. 1.

Применяемый сегодня РЯ – это, как правило, многоступенчатый стабилизатор переменного тока, реализующий принцип фазового управления. Силовая часть содержит однофазный силовой трансформатор с тиристорным ключом, подключенным к первичной обмотке. Мощность РЯ обычно составляет 5–30 кВА, и он должен обеспечивать стабилизацию тока в КК на максимальной (номинальной) ступени яркости с минимальной точностью 2% для любой нагрузки в диапазоне от 50 до 100% при наличии 30% ИН с незамкнутыми вторичными обмотками [6]. Высокие требования к стабильности тока в КК обусловлены техническими характеристиками применяемых ламп. В частности, если рабочий ток в галогенной лампе выше номинального на 5%, то срок службы лампы сокращается на 50%. С другой стороны, даже незначительное уменьшение силы тока приводит к существенному снижению интенсивности свечения АО, что недопустимо при обеспечении посадки воздушного судна в сложных метеоусловиях [7]. Итак, ИС в АО определяет технические требования к РЯ. Тиристорный РЯ прост в обслуживании, надежен, обеспечивает требуемый диапазон регулирования тока в КК и выполнение практически всех необходимых функций. Однако ему присущи недостатки, основные из которых: большие массогабаритные характеристики (10–12 кг/(кВА)), обусловленные наличием низкочастотного (50 Гц) силового трансформатора, и неудовлетворительная электромаг-

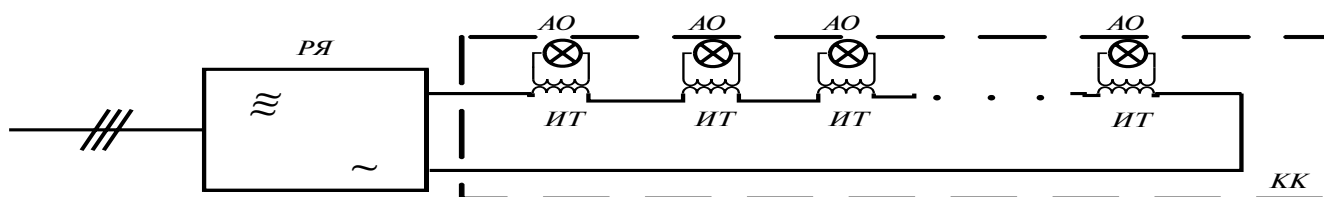


Рис. 1. Схема питания АО напряжением переменного тока в КК последовательного типа

нитная совместимость (ЭМС) из-за потребления тока с несинусоидальной формой кривой и низкого коэффициента мощности (0,6–0,7). Потребляемый из сети ток характеризуется коэффициентом гармоник или коэффициентом искажений [8], и с увеличением угла регулирования ключей преобразователя энергетические показатели РЯ резко ухудшаются (уменьшается значение коэффициента мощности, возрастает коэффициент формы), что приводит к росту доли высших гармоник как в токе КК, так и в потребляемом токе из сети. На рис. 2 приведены эпюры и спектрограммы выходного напряжения идеального тиристорного РЯ при двух значениях углов регулирования, полученные моделированием процесса с помощью программы OrCad. Коэффициент нелинейных искажений [9] для угла регулирования 18° равен 6%, а для угла регулирования 162° – 180%. При значениях до 10% коэффициент нелинейных искажений, рассчитываемый программой, близок к коэффициенту гармоник по ГОСТ 13109–97 [10]. Наличие высших гармоник приводит к увеличению потерь в изоляции кабеля, снижению КПД подсистемы РЯ–КК, уменьшению срока службы кабеля и увеличению потребления из сети реактивной мощности. Например, специалистами ОАО «ГОКБ «Прожектор» экспериментально было установлено, что при изменении тока в КК комплекса АССС «Луч-4МС» с

6,6 до 4 А значение входного $\cos \varphi$ РЯ меняется от близкого к 1,0 до 0,7. А с учетом допустимого [8] отклонения напряжения сети значение $\cos \varphi$ может снизиться до 0,65. В этом случае РЯ оказывает значительное негативное влияние на питающую сеть.

Кроме того, однофазная нагрузка может увеличивать несимметричность напряжений трехфазной сети, если не принимать соответствующие меры. Для обеспечения ЭМС требуются громоздкие дорогие фильтры или компенсаторы, что сводит на нет простоту данного типа РЯ [11]. Существуют и другие менее существенные недостатки, например высокий шум из-за потребления трансформаторами и дросселями РЯ тока с кривой несинусоидальной формы и пр.

Использование ИТ увеличивает потери в КК. При перегорании лампы амплитуда импульсов напряжения на обмотках ИТ увеличивается в несколько раз. При этом трансформатор перемагничивается по несимметричной петле гистерезиса и насыщается, при этом потери в стали и изоляции ИТ значительно возрастают.

Ужесточение требований к ЭМС побуждает разработчиков искать пути улучшения технико-экономических показателей АССС. В настоящее время ОАО «ГОКБ "Прожектор"» совместно с Московским энергетическим институтом (ТУ) [12–14] разрабатывает новые варианты построения РЯ для

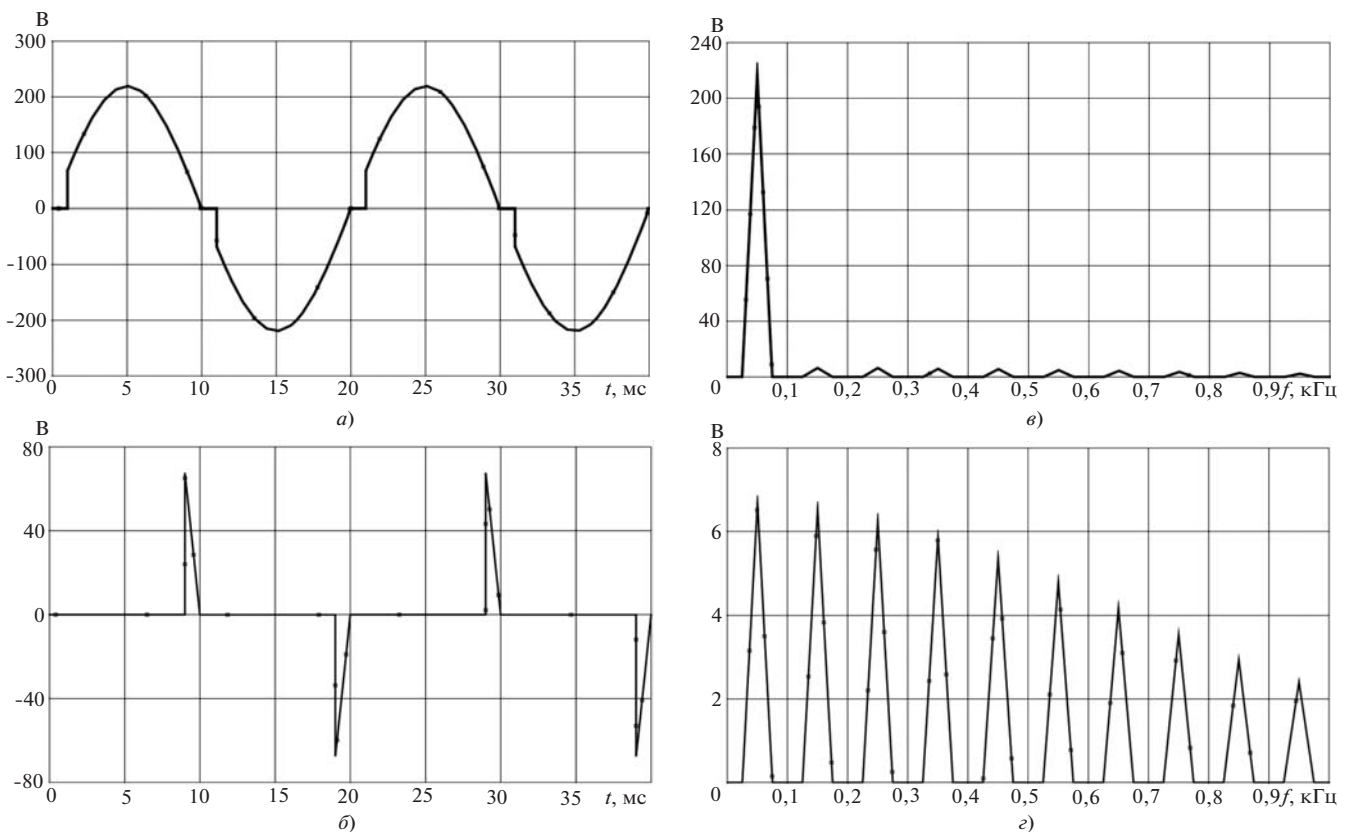


Рис. 2. Эпюры (а и б) и спектрограммы (в и з) выходного напряжения при угле регулирования 18° (а и в) и 162° (б и з)

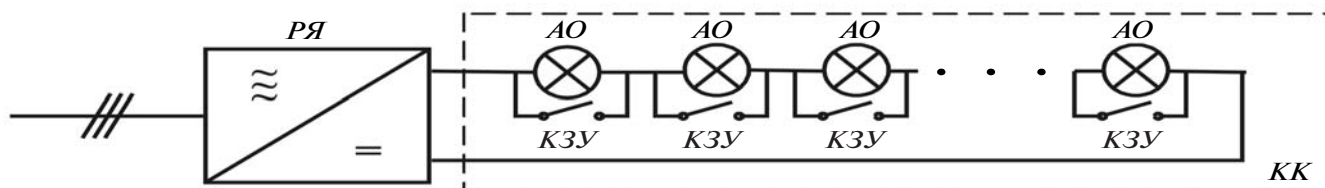


Рис. 3. Схема питания АО напряжением постоянного тока в КК последовательного типа

улучшения эксплуатационных и энергетических характеристик подсистемы РЯ–КК. Ключевой предпосылкой к кардинальной модернизации является появление СИ нового типа – сверхярких светодиодов (ССД), работающих на напряжении постоянного тока. Эта особенность СИ обуславливает переход на питание КК постоянным током и возможность применения в звене преобразования тока, регулирования и трансформации напряжения высокочастотного (ВЧ) преобразования. Внедрение данного варианта питания КК (рис. 3) удовлетворяет сразу двум важным направлениям совершенствования техники – ресурсосбережению и энергосбережению:

при снижении удельного массового показателя трансформатора с 10–12 кг/(кВ⋅А) при частоте преобразования 50 Гц до 0,3 – 0,4 кг/(кВ⋅А) при частоте преобразования 20–30 кГц;

снижении энергопотребления АССС (табл. 1);

исключении из схемы ИТ (они заменяются короткозамыкающим устройством (КЗУ);

уменьшении дополнительных потерь в КК, связанных с потерями в ИТ (потерь в выключенном КЗУ практически нет);

увеличении срока службы кабеля благодаря односторонней поляризации материала изоляции;

использовании более дешевого кабеля (допустимая напряженность электрического поля для кабелей постоянного тока в 5–6 раз выше, чем для кабелей переменного тока).

Таблица 1

Класс ВПП	Число огней в КК ВПП	Мощность КК, Вт	Мощность прототипа КК с ССД, Вт
III	28	1820	274,4
II	40	2600	392
I	51	3315	548,8

В роли КЗУ может выступать любое электронное ключевое устройство с пороговой характеристикой, срабатывающее после скачка напряжения в результате перегорания СИ в АО (рис. 4). Очевидно, что массогабаритные характеристики и стоимость КЗУ будут в разы меньше ИТ.

Таким образом, вариант построения АССС при питании АО постоянным током позволяет уstra-

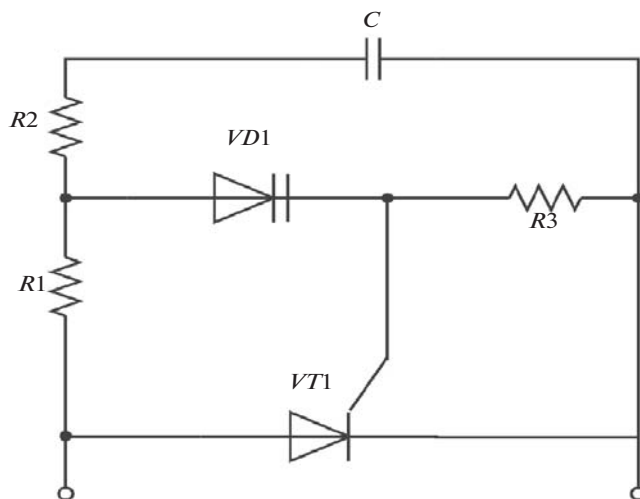


Рис. 4. Принципиальная схема КЗУ

нить недостатки традиционной подсистемы РЯ–КК.

Схемные решения такого РЯ несколько сложнее, так как используется двойное преобразование тока (с функцией регулирования) – преобразование трехфазного переменного напряжения в постоянное, а затем однофазное ВЧ инвертирование, трансформация и выпрямление. Тем не менее, технико-экономические характеристики подсистемы РЯ–КК в целом существенно улучшаются. Кроме того, из-за снижения уровня тока в КК со ССД толщина токонесущей жилы уменьшится и ее диаметр будет определяться уже не плотностью тока, а прочностными требованиями к кабелю. В табл. 2 представлены сравнительные энергетические характеристики АО при использовании ССД hue Jun YPB 8 и галогенной лампы КГМ-6,6-65. Принципы технической реализации источников вторичного электропитания достаточно широко описаны в [15–17].

Таблица 2

Вид светоизлучателя	Ступени яркости АО	Энергетические характеристики		
		Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт
КГМ-6,6-65	1	4,72	5,61	26,5
	2	5,89	8,75	51,5
	3	6,6	10,7	70,6
Hue Jun YPB 8	1	0,042	8,9	0,98
	2	0,28	12,9	3,59
	3	0,7	14	9,8

Таблица 3

Тип ИС	Начальная стоимость ИС, руб.	Мощность ИС, Вт	Срок службы ИС, ч	Расходы на оплату электроэнергии за 10 лет*, руб.	Расходы на покупку ламп за 10 лет, руб.	Суммарные расходы за 10 лет, руб.
Галогенная лампа КГ-6,6-65	300	65	1000	14634**	13140	27774
ССД Hue Jun HVB 8	3800	9,8	100000	2205**	2800	5005

* данные указаны для времени горения ламп по 12 ч в сутки; ** действующий тариф для учреждений на 2011 г. (5,14 руб./кВт⋅ч).

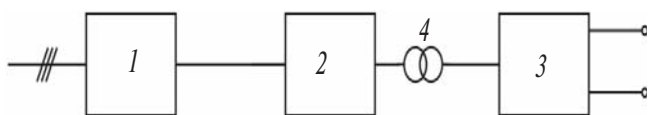


Рис. 5. Структурная схема РЯ постоянного тока

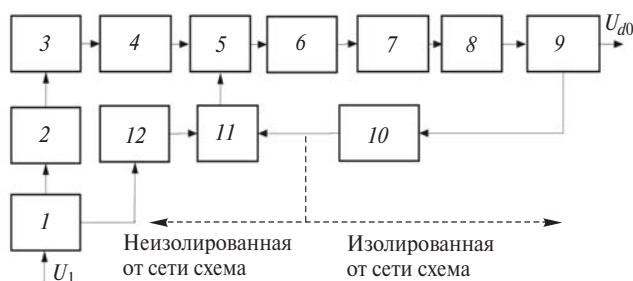


Рис. 6. Функциональная схема РЯ постоянного тока

Для построения регулятора-преобразователя может быть рекомендована типовая схема-модуль, показанная на рис. 5. Она содержит трехфазный неуправляемый выпрямительный мост 1, однофазный ВЧ инвертор напряжения 2, однофазный ВЧ трансформатор 4 и однофазный выпрямитель 3. Такая структура РЯ обеспечивает симметричную загрузку фаз трехфазной сети при приемлемом уровне радиопомех. Для дальнейшего улучшения ЭМС возможно применение корректора коэффициента мощности. При этом на входе трехфазного неуправляемого выпрямительного моста в каждой фазе устанавливаются дроссели.

Отметим, что при традиционном построении РЯ, содержащем входной силовой трехфазный трансформатор напряжения, перекос фаз, а в особенности нестабильность частоты сети, могут приводить к его подмагничиванию (вплоть до насыщения) и, как следствие, к возникновению аварийной ситуации. Поэтому обычно требуются дополнительные устройства пуска и симметрирования напряжения. Исключение силового трехфазного трансформатора напряжения и применение на входе РЯ (рис. 5) неуправляемого выпрямителя обеспечивают полную независимость системы питания

КК как от перекоса фаз, так и от колебания частоты сети.

Функциональная схема РЯ (рис. 6) включает входной сетевой фильтр 1, выключатель 2, неуправляемый выпрямитель 3, корректор коэффициента мощности 4, инвертор 5, ВЧ трансформатор 6, неуправляемый выпрямитель 7, выходной фильтр 8, датчики тока и напряжения 9, опторазвязку 10, блок управления и контроля индикации 11, дополнительный источник питания собственных нужд 12. Такой РЯ может быть классифицирован как одноканальный трехфазный двухзвенный регулируемый преобразователь постоянного напряжения с широтно-импульсным управлением [18]. Каждый из узлов РЯ может быть реализован на основе различных схемных решений, что в итоге и будет определять как эффективность устройств, так и его надежность. Несмотря на кажущееся усложнение, питание узлов РЯ от дополнительного источника повышает его надежность, поскольку схема управления будет работоспособна при аварийных ситуациях в нагрузке и корректоре коэффициента мощности.

По прогнозам производителей, срок службы ССД к 2012 г. превысит 100000 ч [19], в то время как для галогенной лампы он составляет 1000 ч и его увеличения не ожидается [20, 21]. Данный параметр делает особенно привлекательным применение ССД в АО, так как позволяет снизить эксплуатационные расходы. Данные об эксплуатационных расходах на один АО с разными типами источников света (ИС) представлены в табл. 3.

Из этих данных видно, что применение ССД экономически выгодно несмотря на высокую начальную стоимость.

Таким образом, построение подсистемы РЯ–КК на постоянном токе схематически сложнее, однако экономически выгоднее по сравнению с традиционным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Международные** стандарты и рекомендуемая практика. Аэродромы. Приложение № 14 к конвенции о международной гражданской авиации, т. 1. – ИКАО, 1999.

2. **Нормы** проектирования размещения стационарного светосигнального оборудования на аэродромах вооруженных сил, ВСН 66-92. – М.: Минобороны РФ, 1993.
3. **Нормы** проектирования размещения светосигнального и электрического оборудования систем посадки воздушных судов на аэродромах, ВСН 8-86. – М.: МГА, 1986.
4. **Фрид Ю.В., Величко Ю.К., Козлов В.Д. и др.** Электросветосигнальное оборудование аэродромов. – М.: Транспорт, 1988.
5. **Жуков В.В., Вольперт Б.А., Воеводинский В.А.** Электрическое и световое оборудование аэропортов. – М.: Транспорт, 1976.
6. **Авиационные** правила, ч. 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс. Т.2 «Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс». – МАК, 2003.
7. **Руководство** по проектированию аэродромов, ч. 5, Doc 9157-AN/901, изд. первое. – ИКАО, 1983.
8. **ГОСТ 13109-97.** Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
9. **Бологовский Ю.Б., Таназлы Г.И.** OrCad Моделирование «поваренная» книга. – М.: ООО «СОЛОН-Пресс», 2005.
10. **Хайнеман Р.** PSPICE Моделирование работы электронных схем. – М.: ДМК Пресс, 2005.
11. **Эраносян С., Ланцов В.** Пути развития и архитектура интегрированных силовых модулей для источников вторичного электропитания. – М.: Электрическое питание, 2005, № 3, 4.
12. **Патент РФ № 2364916.** Регулятор-стабилизатор переменного тока/А.В. Берг, А.В. Бериллов, В.А. Сергеев, А.В. Мирошниченко, Г.С. Мызык, 2009.
13. **Патент РФ № 99925.** Светосигнальная аэродромная система/А.В. Мирошниченко, А.В. Берг, О.В. Пацык, 2010.
14. **Мирошниченко А.В., Мызык Г.С.** К обоснованию целесообразности построения аэродромных светосигнальных систем на постоянном токе. – XVII Международ. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов 24–25 февраля 2011 г., т. 2. – М.: Издат. дом МЭИ, 2011.
15. **Эраносян С.А.** Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
16. **Hunter P.** Solve Switcher Problems with Power – Factor Correction. – Electronic Design, 1992, Febr.
17. **Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф.** Импульсные регуляторы и преобразователи постоянного напряжения. – М.: Изд-во МЭИ, 1998.
18. **Полищук А.** Высокоэффективные источники электропитания высокого напряжения для радиопередающих устройств СВЧ. – Силовая электроника, 2004, № 2.
19. **ГОСТ 23414-84.** Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Термины и определения.
20. **Давиденко Ю.** Высокоэффективные современные светодиоды. – Современная электроника, 2004, октябрь.
21. **Каталог** «Источники света». – Osram, 2008.
22. **Каталог** «Источники света». – Philips, 2005.

[28.04.11]

Авторы: Берг Виталий Рейнгольдович окончил в 1976 г. Московский автодорожный институт. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию «Создание аппаратуры управления, контроля и диагностики систем автономного электроснабжения подвижных грунтовых ракетных комплексов». Генеральный директор ОАО «ГОКБ «Прожектор».

Мирошниченко Александр Васильевич окончил в 1982 г. факультет авиационного радиоэлектронного оборудования Киевского ВВАИУ. Аспирант Московского энергетического института, начальник отделения ОАО «ГОКБ «Прожектор».

* * *