

ГЛАВА 1
ВВЕДЕНИЕ В СИЛОВУЮ ЭЛЕКТРОНИКУ

Составитель:
к.т.н., доцент кафедры РЛ1
Родин М.В.

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

1.1 Введение	3
1.2 Из истории силовой электроники	8
1.3 Силовая электроника в наши дни и тенденции ее развития	28
1.4 Электропитание радиоэлектронной аппаратуры	33
1.4.1 Общие сведения.....	–
1.4.2 Портативная аппаратура	40
1.4.3 Стационарная аппаратура	42
1.4.4 Радиолокационные системы	47
1.5 Системы электроснабжения летательных аппаратов	52
Контрольные вопросы и задачи	72
Список литературы	73

1.1 Введение

"Вся жизнь есть энергия / Энергия – вечный восторг!". Так английский поэт Уильям Блейк оценил роль энергии в жизни человека.

Энергия окружает нас повсюду, об энергии говорят, в энергии нуждаются. В наше время обладание источниками энергии является надёжным инструментом влияния на геополитические реальности.

Само слово "энергия" заимствовано из греческого языка и означает "действие". Чуть сложнее определение "энергии", принятое в науке: "это мера перехода движения материи из одних форм в другие". Есть и более простое определение, известное нам ещё из школы: "это способность тела совершать работу".

Энергия может проявляться в разных формах. Так, энергия, которая возникает при движении предмета, одушевлённого или неодушевлённого, называется механической. А энергия, которая освобождается при распаде атомов, называется ядерной. Есть и другие виды энергии – электрическая, гравитационная, солнечная и т. д.

Вода, ветер, Солнце обладают огромными запасами энергии, но все эти запасы не были бы использованы, если бы человек не превратил их в полезную энергию. Так, например, энергию ветра можно трансформировать в электрическую энергию. На велосипедах, снабжённых генераторами постоянного тока, движение педалей, то есть кинетическая энергия, преобразуется в электрическую, зажигается лампочка – и нам предоставляется световая энергия. Телевизор преобразует электрическую энергию в световую и звуковую и т. д. Энергия не исчезает и не появляется вновь, а только переходит из одной формы в другую.

Возможности энергии безграничны. Недаром учёные когда-то называли её "живой силой". Однако энергия – основа жизни не только человека, а вернее, не только живого мира, но и многочисленных технических средств, которые нас окружают. Так, автомобилю требуется бензин, паровозу нужен уголь, атом-

ной станции – уран, а мобильным телефонам и ноутбукам нужен аккумулятор и зарядное устройство.

Во второй половине XX-го века все области техники, прежде всего транспортная, информационная и вычислительная, развивались настолько быстро, что прежнее аграрно-промышленное общество превратилось в общество информационное. Энергопотребление человека в таком обществе возросло ещё больше и составляет в наши дни до 1500 МДж в сутки. Если условно считать потреблением энергии и питание, то из названного количества энергии пища составляет всего 4%, бытовые нужды – 27%, промышленность и сельское хозяйство – 40% и транспорт – 27%.

Сегодня большинство окружающих нас технических средств – будь то бытовая техника, промышленное оборудование, вооружение или специальная техника – не может существовать без электрической энергии, поскольку в каждое из них входит устройство, потребляющее электроэнергию.

Согласно ряду экспертных оценок, на долю электроэнергии в мире приходится 40% от общего мирового потребления энергии. Мы не можем и дня прожить без использования электроэнергии, и спрос на электроэнергию только растет – в течение следующих 10 лет ожидается повышение спроса на 20%.

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) включают в себя, как правило, две сильно отличающиеся электронные составляющие: информационную и энергетическую (силовую). Последняя включает в себя устройства, обеспечивающие электрической энергией все остальные составляющие РЭС.

Таким образом, *электроника* как наука, занимающаяся созданием и практическим использованием различных устройств, работа которых основана на изменении концентрации и перемещении заряженных частиц (электронов) в вакууме, газе или твердых кристаллических телах, в настоящее время имеет два основных научно-технических направления – информационное и силовое.

Информационная электроника – научно-техническое направление, связанное с созданием информации в виде электрических сигналов, обработкой,

передачей, хранением и использованием этой информации. Частным случаем информационной электроники является *радиоэлектроника*, занимающаяся в том числе разработкой и производством устройств для систем генерирования, обработки, передачи и использования информационных сигналов с помощью радиоволн.

Силовая электроника – научно-техническое направление, которое решает проблемы создания силовых электронных приборов и устройств, а также преобразования параметров электроэнергии посредством этих электронных устройств и приборов.

Термин "силовая электроника" появился в начале 1970-х гг. Ранее эта область науки и техники включалась в промышленную электронику. Силовая электроника является одним из направлений электротехники – науки, связанной с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии (электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века.)

Как научно-техническое направление силовая электроника охватывает методы и средства управления потоками электрической энергии с помощью силовых электронных приборов. Это широкая междотраслевая дисциплина, включающая в себя электронные приборы, устройства преобразования параметров (тока, напряжения, частоты) электрической энергии, коммутаторы электрических цепей, сложные электротехнические и электромеханические системы (системы бесперебойного электропитания, электроприводы и т. д.). Современная силовая электроника тесно взаимодействует с физикой полупроводников, цифровой техникой, теорией управления, наукой об электромагнетизме, схемотехникой, техникой преобразования параметров электроэнергии и т. д. (рисунок 1.1).

Без преувеличения можно сказать, что силовая электроника является мускулами XXI века, дополняя информационную электронику – интеллект XXI века.

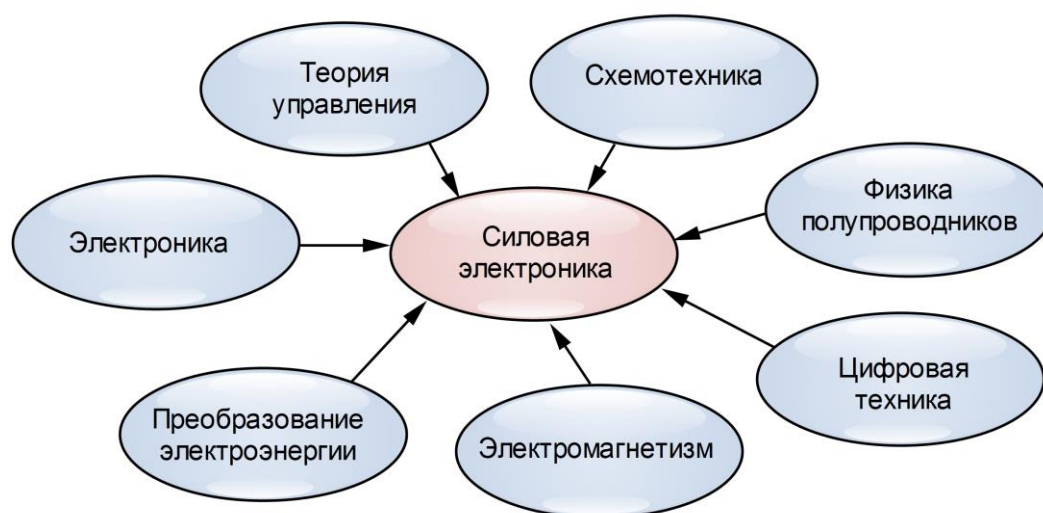


Рисунок 1.1 – Взаимодействие силовой электроники с другими разделами науки и техники

Наиболее распространёнными типовыми устройствами силовой электроники являются:

- бесконтактные переключающие устройства переменного и постоянного тока (прерыватели), предназначенные для включения или выключения нагрузки в цепи переменного или постоянного тока и, иногда, для регулирования мощности нагрузки (используются в кондиционерах, холодильниках и т. д.);

- выпрямители, преобразующие переменное напряжение в напряжение одной полярности (например, зарядные устройства мобильных телефонов, телевизоры, компьютеры и т. д.);

- инверторы, преобразующие постоянное напряжение в переменное (например, для электропитания потребителей переменного тока от автомобильного аккумулятора);

- преобразователи частоты, преобразующие переменное напряжение одной частоты в переменное напряжение другой частоты (применяют для плавного регулирования скорости асинхронного или синхронного электродвигателя за счёт создания на выходе преобразователя электрического напряжения заданной частоты; например, в насосах и вентиляторах: поскольку потребляемая

мощность пропорциональна кубу скорости вращения, то использование преобразователя частоты позволяет сэкономить энергопотребление до 60%; к примеру, годовое использование частотного преобразователя окупает все затраты на его приобретение);

- преобразователи постоянного напряжения (конверторы), преобразующие постоянное напряжение одной величины в постоянное напряжение другой величины (находят применение, например, в компьютерах, мобильных телефонах и т. д.);

- преобразователи числа фаз, преобразующие переменное напряжение с одним числом фаз в переменное напряжение с другим числом фаз (обычно однофазное напряжение преобразуется в трёхфазное или трёхфазное – в однофазное);

- компенсаторы (корректоры коэффициента мощности), предназначенные для компенсации реактивной мощности в питающей сети переменного напряжения и для компенсации искажений формы тока и напряжения.

Так как устройства силовой электроники выполняют преобразование электрической энергии, то очень часто их называют *электропреобразовательными*.

Устройства силовой электроники используют практически во всех РЭС, в том числе в:

- радиолокационных и радионавигационных системах (РЛС и РНС);
- системах радиопередачи информации;
- системах радиоуправления и т. д.

1.2 Из истории силовой электроники

Силовая электроника, несмотря на то, что появилась как направление электротехники сравнительно недавно, имеет глубокие корни, упирающиеся, прежде всего, в первые опыты с электричеством и открытие источников тока.

В 1791 г. итальянский анатом Луиджи Гальвани обнаружил, что при соприкосновении двух разнородных металлов с телом препарированной лягушки появляется электричество. Л. Гальвани ошибочно объяснил это явление наличием особого "животного электричества".

Справедливости ради надо отметить, что Л. Гальвани был не так уж далек от истины: как это установили позднее, жизненные процессы в любом организме сопровождаются возникновением электричества, которое с полным основанием может быть названо животным, однако, с электричеством, открытым самим Л. Гальвани, оно не имеет ничего общего.

Вскоре другой итальянский учёный, Алессандро Вольта, дал этим опытам иное объяснение. Он доказал, что электрические явления, которые наблюдал Л. Гальвани, объясняются только тем, что определённая пара разнородных металлов, разделённая слоем специальной электропроводящей жидкости, служит источником электрического тока, протекающего по замкнутым проводникам внешней цепи. Эта теория, разработанная А. Вольтой в 1794 г., позволила ему в 1799 г. получить первый в мире источник электрического тока, который назывался Вольтов столб.

Он представлял собой набор пластин из двух металлов, меди и цинка, разделённых прокладками из войлока, смоченного в соляном растворе или щелочи (рисунок 1.2). Таким образом, А. Вольта создал прибор, способный за счёт химической энергии поддерживать в проводнике движение зарядов, то есть электрический ток. Скромный А. Вольта назвал своё изобретение в честь Л. Гальвани "гальваническим элементом", а электрический ток, получающийся от этого элемента – "гальваническим током". Вскоре сам Наполеон пригласил А. Вольта в Париж, лично присутствовал на демонстрации опыта, осыпал наградами и почестями.

Впоследствии стали набирать целые "столбы" из медных и цинковых колец, переложённых матерчатыми прокладками, смоченными серной кислотой. Столбы эти, названные "вольтовыми", давали достаточно большое напряжение –

с их помощью были проведены первые основополагающие опыты по электротехнике. После А. Вольта многие учёные создали свои собственные гальванические элементы, более практичные и эффективные.

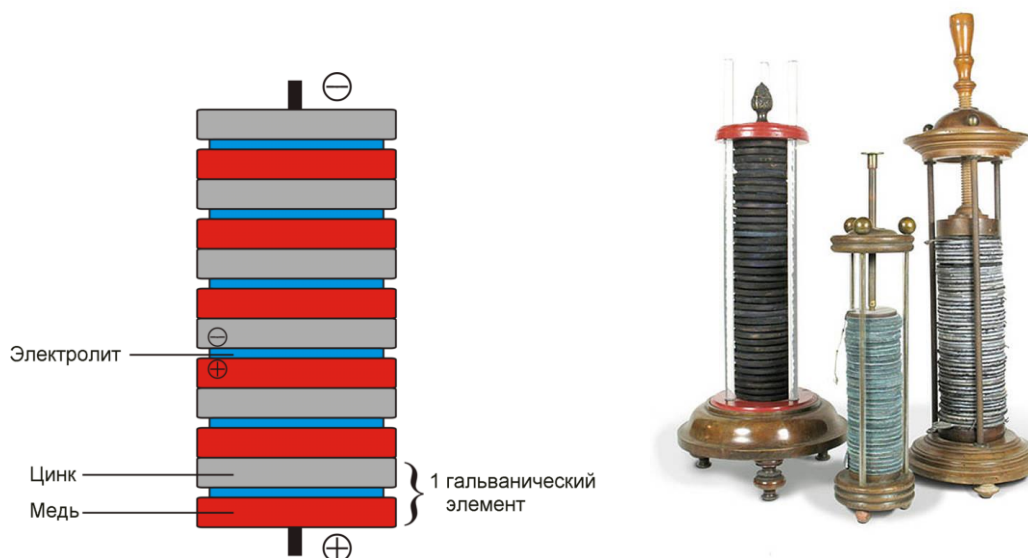


Рисунок 1.2 – Вольтов столб

Примечательно, что, возможно, А. Вольта был далеко не первым "изобретателем" гальванического элемента. В 1936 г. на территории Ирака археолог Кенинг нашёл терракотовый сосуд со вставленными в него медным цилиндром и железным стержнем, укреплённым по центру с помощью пробки. Было высказано предположение, что это ни что иное, как гальванический элемент, принадлежавший древним шумерам (жили около 5000 лет назад!). Возможно, такой источник тока был нужен для гальванического нанесения золота на серебряные украшения.

В начале XIX в. профессор Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров внёс значительные усовершенствования в конструкцию вольтова столба. Новый столб состоял из 4200 медных и цинковых кружков диаметром 3,5 см. Если бы их можно было положить друг на друга, то высота батареи превзошла бы 12 метров. В.В. Петров заметил, что даже при двухстах пластинок в таком столбе электролит (он применял нашатырь, которым пропитывал бумажные прокладки) выжимался из бумажных дисков,

находящихся в его нижней части, и действие батареи ослабевало. Поэтому он расположил свою батарею горизонтально в специальном ящике из красного дерева. Кружки были поставлены на ребро и уложены в четыре соединенных последовательно ряда. Внутренняя поверхность ящика была покрыта изоляцией – сургучным лаком. Все это делало столб довольно мощным, долговечным и удобным для использования. После В.В. Петрова многие учёные стали создавать горизонтальные вольтовые батареи. По современным оценкам батарея В.В. Петрова давала напряжение около 1500 В.

Экспериментировал В.В. Петров с энтузиазмом и был на редкость изобретателен при разработке методики исследования. Не забудем, что в те времена приборов было немного: ни амперметров, ни вольтметров не было. Качество работы батареи В.В. Петров узнавал по своеобразному ощущению, которое вызывал электрический ток в его пальцах, когда он касался ими столба. Чтобы сделать пальцы более чувствительными, он срезал с их кончиков верхний слой кожи – тогда ему удавалось выявить даже очень слабый ток!

Примерно в 1859-1860 гг. в лаборатории Александра Беккереля работал в качестве ассистента Гастон Планте. Молодой человек решил заняться улучшением гальванических батарей, чтобы сделать их надёжными источниками тока для телеграфии. После многочисленных экспериментов и поисков он перешёл к двум тонким свинцовым пластинкам. Он их проложил суконкой и навил этот сэндвич на деревянную палочку, чтобы он влезал в круглую стеклянную банку с электролитом. Далее подключил обе пластины к батарее. Через некоторое время полученная им система зарядилась и сама оказалась способной давать достаточно ощутимый постоянный ток. Так случилось рождение накопителя электрической энергии – аккумулятора.

Чуть ранее, в 1831 г., профессор Лондонского Королевского института Майкл Фарадей изготовил первый магнитоэлектрический генератор. Он состоял из подковообразного постоянного магнита и медного диска, вращающегося между магнитными полюсами.

Уже в 1873 г. начинают изготавливать получившие широкое применение электрические машины с вращающимся ротором. Появляется переменный ток, которым впервые воспользовался работающий в Париже русский электротехник П.Н. Яблочков для освещения городских улиц при помощи изготавливаемых им дуговых ламп переменного тока – свечей Яблочкова (первые необходимые для этого генераторы создал парижский изобретатель и промышленник Зеноб Теофиль Грамм). Он же в 1876 г. получает первый в мире патент на трансформатор.

С началом массового производства ламп накаливания в 1879 г. переменный ток на некоторое время потерял своё значение, но снова обрёл актуальность в связи с ростом дальности передачи электроэнергии в середине 1880-х гг. В 1888-1890 гг. эмигрировавший в США сербский электротехник Никола Тесла и эмигрировавший в Германию русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский разработали трёхфазную систему переменного тока. Последний изобрёл и первый трёхфазный трансформатор и построил первый трёхфазный двигатель – и в 1891 г. осуществил передачу электрической энергии на расстояние 1975 км.

В своем докладе на Первом всероссийском электротехническом съезде М.О. Доливо-Добровольский отметил, что "электротехническая выставка 1891 г. во Франкфурте была тем важна в истории электротехники, что на ней в первый раз публично выступил так называемый трехфазный ток. Несмотря на то, что вращающееся магнитное поле было открыто Феррарисом за 5-6 лет до этого, и имело предшественников (Депре, Бейля и др.), несмотря на то, что опыты Н. Теслы и мои существовали уже года за два до этой выставки, должно считать годом рождения трехфазного тока 1891 г."

Действительно, с 1891 г. все ведущие электротехнические фирмы мира перешли на создание генераторов, двигателей и систем передачи трехфазного тока. По инициативе последователя и поклонника идей М.О. Доливо-Добровольского, также русского электротехника с мировым именем Михаила

Андреевича Шателена, трехфазная система построения региональных и местных сетей была положена в основу плана ГОЭЛРО и последующих программ электрификации нашей страны.

В 1884 г. Тесла прибыл из Европы в Нью-Йорк без гроша в кармане и прямиком отправился в контору Эдисона, тогда уже успешного предпринимателя и короля изобретений. Эдисон без раздумий принял талантливого юношу на работу, правда, на позицию инженера по ремонту электродвигателей и генераторов постоянного тока.

С первых дней между работником и работодателем начались разногласия, которые касались не только методов работы, но и видения и понимания физических процессов.

Эдисон был прежде всего бизнесменом и умелым управленцем, который работал только над экономически выгодными проектами; Тесла смотрел на несколько шагов вперед и посвящал себя фундаментальной науке, даже если это не приносило сиюминутной прибыли. Наконец, Тесла верил в практическую значимость переменного тока, а у Эдисона идеи Теслы не находили никакой поддержки.

Эдисон и Тесла терпели друг друга около года, пока между ними не произошел окончательный разрыв всяких отношений.

К 1890 г. в Соединенных Штатах работало более сотни эдисоновских электростанций постоянного тока. Каждая электростанция приносила Эдисону хорошую прибыль, даже если принадлежала не ему. От получал патентные отчисления. К 1900 г. Эдисон собирался покрыть сеть своих электростанций всю страну от Аляски до Флориды.

Тесла был уверен, что Эдисон не понимает преимуществ переменного тока перед постоянным из-за своей ограниченности, из-за недостатка знаний. Вестингауз же считал иначе. "Все он понимает, – говорил Вестингауз, – только доходы терять не хочет. Постоянный ток приносит больше денег, чем переменный". Переменный ток имеет два главных преимущества перед постоянным:

возможность передавать электрическую энергию на большие расстояния с минимальными потерями, а также простоту и надежность машин – генераторов и двигателей. Для постоянного тока нужно было строить гораздо больше электростанций, чем для переменного, потому что на большие расстояния постоянный ток передавать невозможно. С каждой электростанции Эдисон получал отчисления. Кроме того, оборудование часто нуждалось в ремонте, которым и занималась компания Эдисона.

Для преобразования переменного тока в постоянный в первой половине XX века было создано большое количество выпрямительных устройств, поражающих оригинальностью и своеобразием. Среди них электромеханические, электролитические, ртутные и купроксные

Электромеханические выпрямители были широко распространены в 1920-1930-х гг. и в нашей стране, и за рубежом. И применялись, в основном, для заряда аккумуляторов. В 1930-х гг. большое количество таких выпрямителей, рассчитанных на напряжения переменного тока до 400 В и силу тока от 2 до 500 А, закупалось в Германии. Много их стало трофеями Красной Армии во время Великой Отечественной войны.

Однако наибольшее распространение в первой половине XX века получили ртутные выпрямители. Первые работы о вентильных свойствах ртутной дуги относятся к 1882 г. (в этом году немецкий исследователь Л. Аронс изобрёл ртутную лампу – игнитрон – которая была запатентована в 1902 г. американцем С. Хьюитом). В 1908 г. Л. Хьюитом был изобретён низковольтный ртутный выпрямитель (рисунок 1.3).

В России одним из пионеров создания ртутных выпрямителей, предназначенных для электропитания анодов электронных ламп радиотелефонных передатчиков, стал В.П. Вологдин.

Электротехническая промышленность СССР, в частности завод "Светлана", производили целую гамму ртутных выпрямителей на напряжение от 110 В

до нескольких киловольт и ток от 6 до 2000 А. Особенно эффективными были трехфазные выпрямители.

Ртутные вентили применялись в мощных выпрямительных устройствах, электроприводах, электросварочных устройствах, тяговых и выпрямительных подстанциях и т. д. В настоящее время они так же находят применение (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 – Советский ртутный выпрямитель СЗРВ (середина 1950-х гг.)



Рисунок 1.4 – Современные ртутные выпрямители (игнитроны)

В 1906 г. английский учёный Д. Флеминг разработал первый электронный прибор – двухэлектродную лампу (диод) с односторонней проводимостью (вентильными свойствами), которая была применена в выпрямителях. В дальнейшем появились газоразрядные вентили с накаливаемым катодом (газотроны и тиратроны).

Много ценного внесли русские учёные в теорию и расчёт выпрямителей. Это, например, работа А.Л. Гершуна (1901 г.) и докторская диссертация Н.Д. Папалекси (1912 г.), в которой рассмотрено действие индуктивностей в анодной и катодной цепях вентилей.

В 1901 г. В.Ф. Миткевич предложил схему трёхфазного выпрямителя со средней точкой во вторичной обмотке трансформатора. В 1906 г. П. Павловский получил первый патент на полупроводниковый (сульфидный) диод. В 1921 г. (патент от 1924 г.) В.П. Вологдин предложил каскадную схему выпрямления, известную под названием "схема Вологодина".

Выпрямление трёхфазного напряжения – один из наиболее широко распространённых на практике видов преобразования параметров электроэнергии. Наиболее известное и часто используемое техническое решение этой задачи – трёхфазная мостовая схема выпрямления, предложенная в 1923 г. А.Н. Ларионовым.

Б.П. Асеев (1930 г.) и Г.С. Цыкин (1936 г.) создали общий метод инженерного расчёта кенотронного выпрямителя, работающего на нагрузку с ёмкостной реакцией. Его усовершенствовали Б.П. Терентьев, А.М. Утевский, К.Б. Мазель. Фундаментальные работы по инженерному расчёту селеновых выпрямителей выполнил В.Г. Комар.

До конца 1920-х гг. кенотроны были основными приборами силовой электроники (рисунок 1.5). В 1930-х гг. они были заменены более эффективными ртутными лампами. Однако эти лампы имели ряд недостатков. Во-первых, они сильно нагревались и передавали тепло другим приборам. Во-вторых, име-

ли ограниченную надёжность (время наработки на отказ несколько тысяч часов). В-третьих, они занимали много места.



Рисунок 1.5 – Кенотрон 2Ц2С (1946 г.)

Преодоление всех недостатков вакуумных ламп стало возможным благодаря появлению полупроводниковых приборов. Когда и где начался путь к полупроводниковым приборам, сказать не просто. Доподлинно известно, что еще в 1833 г. М. Фарадей, экспериментируя с сульфидом серебра (а это был, как мы сейчас знаем, полупроводник), обнаружил, что проводимость данного вещества растет с повышением температуры, в противоположность проводимости металлов. Однако объяснить данное явление М. Фарадей не смог.

В 1874 г. немецкий учёный-физик Фердинанд Браун, будущий нобелевский лауреат (в 1909 г. он получит премию "За выдающийся вклад в создание беспроволочной телеграфии") открыл принцип действия кристаллических диодов (проводят электрический ток только в одном направлении). Правда, объяснить его не смог, поэтому современники Ф. Брауна не заинтересовались его открытием. Независимо от него в 1882 г. французский физик Ж. Жасмин открыл феномен полупроводника и предложил использовать его для выпрямления переменного тока вместо механических переключателей. В 1899 г. Ф. Браун запатентовал выпрямитель на кристалле.

В 1906 г. американский инженер Гринлиф Виттер Пикард получает патент на кристаллический детектор, в котором с поверхностью кристалла (кремния, например) контактировал тонкий металлический проводник – так называемый "кошачий ус" (cat's whisker).

В это же время на кристаллические детекторы обратили внимание ряд компаний из разных стран мира. Радиосвязь очень интересовала военных. На некоторое время кристаллические детекторы становятся предметом исследований. Так, к примеру, компания Маркони вкладывает тысячи фунтов стерлингов в исследования и производство кристаллических детекторов.

В дореволюционной России исследованиями и производством кристаллических детекторов занималось Русское общество беспроволочных телеграфов и телефонов (РОБТиТ), которое было создано в г. Киеве Семеном Моисеевичем Айзенштейном в 1906 г. на собственные средства. Впоследствии на мощностях РОБТиТ стали выпускать первые кристаллические детекторы для военных радиостанций.

Проблему односторонней проводимости в точке соприкосновения металлической пружины и кристаллов полупроводника исследовал и советский инженер О.В. Лосев, экспериментировавший в 1922 г. со слаботочной техникой. Он открыл явление возникновения электромагнитных колебаний и эффект их усиления в полупроводниковом кристаллическом детекторе. Таким образом им был построен первый в мире детекторный полупроводниковый приёмник, способный усиливать электромагнитные колебания – "кристадин" (рисунок 1.6а).

Олег Владимирович Лосев обессмертил свое имя двумя открытиями: он первый в мире показал, что полупроводниковый кристалл может усиливать и генерировать высокочастотные радиосигналы; он открыл электролюминесценцию полупроводников, то есть испускание ими света при протекании электрического тока.

Лосев родился в 1903 г. в Твери в семье конторского служащего. В раннем возрасте у него проявилась склонность к физике и технике. В годы Первой

мировой войны в городе была сооружена военная радиоприемная станция, которая получала радиogramмы от союзников России по Антанте и отправляла их телеграфом в Петроград и Москву. Однажды в 1917 г. школьнику Олегу довелось побывать на станции – и тут же влюбиться в радиотехнику.

После окончания школы в 1920 г. и неудачного опыта поступления в Московский институт связи Лосев оказался в Нижегородской радиолаборатории под начальством В.К. Лебединского, с которым он познакомился на тверской радиостанции. Лосев обычно ночевал в лабораторном здании на лестничной площадке перед чердаком – в городе на Волге у него не было ни семьи, ни комнаты, ни быта.

После выполнения обязательных по лаборатории работ он стал заниматься самостоятельным экспериментированием с кристаллическими детекторами. Приступая к исследованиям, Лосев исходил из заведомо ошибочной посылки, что поскольку "некоторые контакты... между металлом и кристаллом не подчиняются закону Ома, вполне вероятно, что в колебательном контуре, подключенном к такому контакту, могут возникнуть незатухающие колебания" (в то время уже было известно, что для самовозбуждения одной лишь нелинейности вольтамперной характеристики недостаточно; обязателен падающий участок – но Лосев этого не знал!).

Статья Лосева о детекторе-генераторе и детекторе-усилителе появилась в 1922 г. В ней он разъясняет обязательность наличия падающего участка вольтамперной характеристики контакта. В.К. Лебединский и М.А. Бонч-Бруевич обратили внимание на невозпроизводимость эффекта и на то, что, немного поработав, детекторы-генераторы "скисали", поэтому о какой-либо конкуренции с ламповой электроникой как генеральным направлением не могло быть и речи, но практическая значимость открытия была огромной.

Еще при ранних исследованиях детекторов в 1923 г. Лосев заметил, что при пропускании тока некоторые из них испускают свет. Особенно ярко светились карборундовые детекторы. Здесь лишь отметим, что за исследование све-

чения Лосеву в 1938 г. без защиты диссертации была присуждена степень кандидата физико-математических наук (а ведь он так и не получил высшего образования). Выданные ему два авторских свидетельства на "Световое реле" (первое заявлено в феврале 1927 г.) формально закрепили за нашей страной приоритет в области светодиодов.

Открытие "Losev Licht", как называли эффект в Германии, где Лосев публиковался в научных журналах, стало мировой сенсацией. И после изобретения транзистора (в 1948 г.) и создания теории *p-n*-перехода стала понятна природа свечения. Примечательно, что "Losev Light" – так называли светодиоды во многих странах мира до середины 1970-х гг.

Когда началась Великая отечественная война, Лосев не уехал в эвакуацию, а продолжил работу над усилительным трехполюсным полупроводниковым прибором. Однако 22 января 1942 г. на 39-ом году жизни Лосев скончался от истощения в блокадном Ленинграде.

Открытия Лосева значительно обогнали свое время: тогда не было ни достаточно чистых материалов, ни теории полупроводников, чтобы осознать открытое и добиться воспроизводимого повторения, а главное – развивать дальше. К сожалению, преждевременность открытия, как правило, оборачивается драмой не только для автора, но и для самого открытия – оно напрочь забывается, а когда, наконец, приходит "его время", открывается заново.

Таким образом, конкретному созданию полупроводниковых приборов предшествовал длительный и весьма насыщенный период исследований в области электроники, научных экспериментов и разработок во многих странах, в том числе и в СССР.

С 1934 по 1938 гг. в Ленинградском физико-техническом институте под руководством академика А.И. Иоффе были проведены важные работы в области создания полупроводниковых диодов.

В 1938 г. академик Б.И. Давыдов и его сотрудники предложили диффузионную теорию выпрямления переменного тока посредством кристаллических

детекторов, в соответствии с которой оно имеет место на границе между двумя слоями проводников, обладающих p - и n -проводимостью. А в начале 1940-х гг. В.Е. Лашкарев открыл механизм инжекции (переноса носителей тока) – явления, составляющего основу действия полупроводниковых диодов и транзисторов.

Когда ученые смогли понять детектирующие (выпрямляющие) свойства p - n -переходов, промышленность стала выпускать различные вентильные устройства. До появления плоскостных кремниевых и германиевых диодов массово производились селеновые диоды, набранные в столбики или же в плоские конструкции, которые радиолюбители называли "шоколадками".

Благодаря простоте устройства, надежности их действия селеновые выпрямители очень быстро вытеснили все другие виды выпрямителей. Селеновый выпрямитель состоит из набора отдельных селеновых шайб, каждая из которых является элементарным самостоятельным выпрямителем (диодом). Селеновая шайба имеет свойство вентили (диода), то есть хорошо проводит ток в одном направлении (от железного основания к контактному сплаву) и очень плохо – в обратном направлении.

До 1944 г. в СССР для радиолокации использовались СВЧ детекторы по схеме О.В. Лосева. Применение таких детекторов, как в полевых, так и в стационарных условиях было весьма непростой задачей. Обслуживающему персоналу радиолокационной станции приходилось тратить много времени для поиска "стабильной точки" на поверхности кристалла.

Учитывая большую важность диапазона СВЧ радиоволн для радиолокации, в ЦНИИ-108 была поставлена задача – разработать более надежное точечно-контактное соединение в СВЧ детекторе (НИР "Контакт"). За его основу был принят вариант сварного (вварного) точечного контакта металла с кристаллом германия.

Для производства детекторов этого типа в большом количестве потребовались монокристаллы германия, собственное производство которых в то время

в СССР отсутствовало. Поэтому в кратчайшие сроки были разработаны технологии очистки и выращивания германия с необходимыми электрофизическими свойствами. Именно на этих образцах были разработаны новые типы СВЧ детекторов с вварным контактом.

В 1925 г. корпорация "American Telephone and Telegraph" открывает научный и опытно-конструкторский центр "Bell Telephone Laboratories". В 1936 г. директор "Bell Telephone Laboratories" решает сформировать группу ученых, которая провела бы серию исследований, направленных на замену ламповых усилителей полупроводниковыми. Группу возглавил Д. Бекер, привлечший к работе физика-теоретика У. Шокли и физика-экспериментатора У. Браттейна.

В 1938 г. в рабочей тетради 26-летнего У. Шокли появляется первый набросок полупроводникового триода. Идея проста и не отличается оригинальностью: сделать устройство, максимально похожее на электронную лампу, с тем лишь отличием, что электроны в нем будут протекать по тонкому нитевидному полупроводнику, а не пролетать в вакууме между катодом и анодом. Все как в радиолампе: только без вакуума, без громоздкого стеклянного баллона и без подогрева катода. У. Шокли приступает к теоретическим расчетам, однако все попытки построить твердотельный усилитель ни к чему не приводят.

В то же время в Европе немецкие физики Р. Поль и Р. Хилш создали на основе бромида калия работающий трехэлектродный кристаллический усилитель. Тем не менее из-за низкой рабочей частоты никакой практической ценности немецкий прибор не представлял. Есть сведения, что в первой половине 1930-х гг. трехэлектродные полупроводниковые усилители собрали и два радиолюбителя – канадец Л. Кайзер и новозеландский школьник Р. Адамс. Адамс, в дальнейшем ставший радиоинженером, признавался, что ему никогда не приходило в голову оформить патент на изобретение, так как всю информацию для разработки усилителя он почерпнул из радиолюбительских журналов.

К 1926-1930 гг. относятся работы Ю. Лилиенфельда, который запатентовал конструкцию полупроводникового усилителя, в наше время известного под названием полевой транзистор. Несмотря на получение патента, создать работающий прибор Лилиенфельд не сумел: в 1930-е гг. еще не нашлось необходимого материала, на основе которого можно было бы изготовить работающий транзистор. Именно поэтому усилия большинства ученых того времени были направлены на изобретение более сложного биполярного транзистора.

Работы по твердотельному усилителю в "Bell Telephone Laboratories" прерываются с началом Второй мировой войны. У. Шокли и многие его коллеги откомандированы в распоряжение министерства обороны США, где работают до конца 1945 г.

В послевоенные годы в "Bell Telephone Laboratories" начинают форсировать работы в области глобальной связи. Аппаратура 1940-х гг. использовала для усиления, преобразования и коммутации сигналов два основных элемента: электронную лампу и электромеханическое реле. Эти элементы были громоздкими, срабатывали медленно, потребляли много энергии и не отличались высокой надежностью. Усовершенствовать их значило вернуться к идее использования полупроводниковых приборов.

Предложенная в СССР Б.И. Давыдовым теория p - n -перехода была развита У. Шокли. 19 декабря 1947 г. У. Браттейн и Д. Бардин, работавшие под руководством У. Шокли, открыли транзисторный эффект в детекторах, основанных на кристаллах германия. В 1948 г. были опубликованы результаты исследований У. Шокли и изготовлены первые германиевые транзисторы с точечным контактом (рисунок 1.6б). Год спустя в "Bell Telephone Laboratories" были разработаны и первые плоскостные диоды на основе германия с p - n -переходом.

Сначала новое устройство называли германиевым триодом. Бардину и Браттейну название не понравилось. Им на помощь пришел инженер Д. Пирс. Он вспомнил, что одним из параметров вакуумного триода служит крутизна характеристики – transconductance – и потому предложил назвать аналогичный

параметр твердотельного усилителя *transresistance*, а сам усилитель – транзистором.

В то же время У. Шокли создает теорию транзистора с *p-n*-переходами – и, в конце концов, изобретает плоскостной биполярный транзистор.

Примечательно, что американские военные не заинтересовались транзистором и порекомендовали использовать его в слуховых аппаратах. Через несколько лет транзистор стал незаменимым компонентом в военной РЭА, но именно близорукость военных спасла транзистор от грифа "совершенно секретно".

Между тем характеристики первых транзисторов отличались неустойчивостью и непредсказуемостью, и поэтому их реальное практическое применение началось уже после 1951 г. За исследования в области полупроводников и изобретение транзистора У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн в 1956 г. разделили Нобелевскую премию по физике. Уже в 1952 г. в "General Electric" изготовили первый германиевый диод, а в 1954 г. в "Texas Instruments" разработали кремниевый транзистор, который имел лучшие характеристики по сравнению с германиевым.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Кристадин О.В. Лосева (1922 г.) (а) и макет первого транзистора (1947 г.) (б)

Европейских изобретателей точечного транзистора звали Г. Матаре и Г. Велкер. Еще в 1944 г. Матаре, занимаясь полупроводниковыми выпрямителями для радиолокаторов, сконструировал прибор, который назвал дуодиодом. Это была пара работающих параллельно точечных выпрямителей, использующих одну и ту же пластинку германия. В июне 1948 г. Матаре и Велкер создают стабильно работающий точечный транзистор. Европейский транзистор появляется на полгода позже, чем прибор Бардина и Браттейна, но абсолютно независимо от него.

Дальнейшая судьба европейского изобретения сложилась печально. Матаре и Велкер в августе 1948 г. подготовили патентную заявку на изобретение, но французское бюро патентов очень долго изучало документы. Только в марте 1952 г. они получают патент на изобретение транзитрона – такое название выбрали немецкие физики своему полупроводниковому усилителю. Однако несмотря на то, что транзитроны работали лучше и дольше транзисторов, завоевать мировой рынок они не смогли – и вскоре от них отказались.

В СССР работа по транзисторам велась почти в таком же темпе, что и за рубежом. Параллельно с киевской лабораторией В.Е. Лашкарева исследовательская группа московского инженера А.В. Красилов в 1948 г. создала германиевые диоды для РЛС. В начале 1949 г. А.В. Красилов и его помощница С.Г. Мадоян опубликовали первую в СССР статью о транзисторах, называвшуюся "Кристаллический триод".

4 сентября 1952 г. было подписано Постановление Совета Министров СССР о проведении НИР "Разработка германиевых диодов, заменяющих мало-мощные лампы" (шифр "Плоскость") со сроком окончания в третьем квартале 1953 г. Проведение НИР поручалось ФТИ АН СССР, ЦНИИ-108 и НИИ-160. В мае 1953 г. в ФТИ АН СССР Ж.И. Алферовым были созданы первые плоскостные германиевые диоды. Разработанные диоды имели параметры, соответствующие утвержденному техническому заданию, а наилучшие конструкционные решения были достигнуты в ЦНИИ-108.

В 1954 г. в ФТИ АН СССР были созданы германиевые диоды с диаметром p - n -перехода до 3 см. Также в этом году были созданы конструкции выпрямителей с водяным охлаждением и рабочими токами до 200 А.

В марте 1958 г. для первой атомной подлодки начались работы над германиевыми выпрямителями на токи в каждом диоде до 1000 А.

Позднее разработанные технологии и конструкции новых типов диодов были внедрены на заводе "Электровыпрямитель" (г. Саранск). Благодаря героическим усилиям ученых СССР к началу 1960 г. завод "Электровыпрямитель" стал флагманом производства полупроводниковых диодов, а проводимые теоретические и экспериментальные работы ученых СССР долгое время позволяли продукции этого завода быть конкурентоспособной на мировом рынке.

Таким образом, к началу 1960-х гг. полупроводниковые диоды постепенно вытесняли электровакуумные диоды.

С образованием сети специальных научно-исследовательских организаций постоянно ускорялось и развитие транзисторов. В начале 1950-х гг. в СССР ежедневно выпускали десятки точечных транзисторов типа С1-С4 и П1-П3 (рисунок 1.7). В 1957 г. советская промышленность выпустила 2,7 млн. транзисторов.

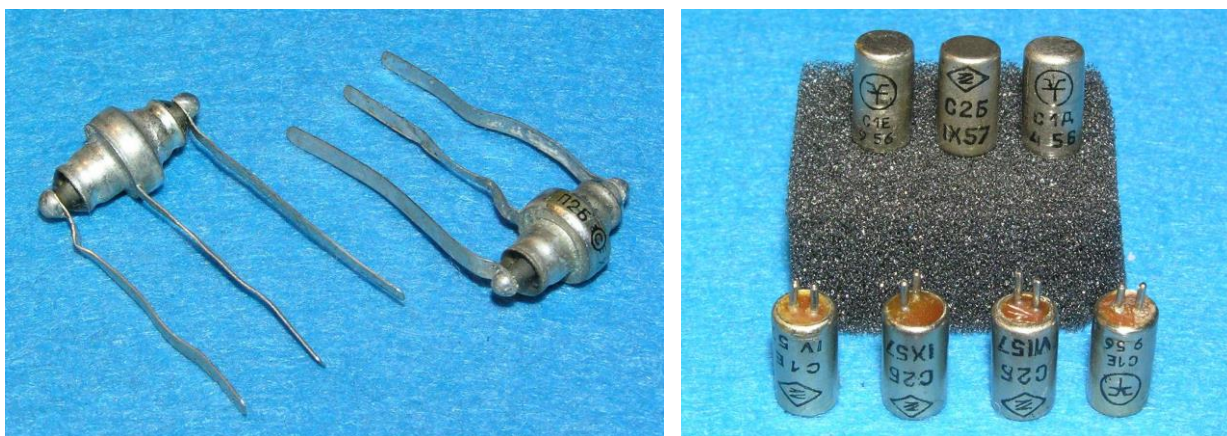


Рисунок 1.7 – Первые отечественные плоскостные транзисторы П2Б и точечные С2Б (1954-1960 гг.)

Уже в середине 1950-х и начале 1960-х гг. все РЭС стали переходить с вакуумных ламп на твердотельные приборы. Изобретение интегральных схем в 1958 г. Дж. Килби из компании "Texas Instruments" (США) только усилило эту тенденцию.

Эра силовых полупроводниковых приборов началась в 1956 г., когда американским исследовательским коллективом под руководством Я. Молль были изобретены кремниевые тиристоры – мощные полупроводниковые приборы, пришедшие на смену управляемым ртутным выпрямителям и совершившие подлинную революцию в управляемом электроприводе. Достаточно сказать, что ртутный вентиль на 1000 А имел массу 300 кг, а тиристор на тот же ток вместе с охладителем – всего 5 кг.

Серийное производство тиристоров было налажено в 1958 г. фирмой "Westinghouse". В то же время в СССР начинается производство собственных управляемых кремниевых тиристоров. Были созданы и многие типы силовых кремниевых диодов (экспортировались в 40 стран мира) и транзисторов (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Одни из первых серийных отечественных германиевых диодов: точечные ДГ-Ц7 и плоскостные ДГ-Ц21, ДГ-Ц24, ДГ-Ц27 (середина 1950-х гг.)

Незапираемые тиристоры сыграли выдающуюся роль в развитии силовой электроники и широко используются и в наше время. Широкое распространение тиристоров обусловило популярность возникшего в то время термина "тиристорная техника", который использовали в том же смысле, что и сейчас термин "силовая электроника". Но невозможность выключения с помощью импульсов управления часто затрудняло их применение. Десятилетиями разработчикам силовых устройств приходилось смиряться с этим недостатком, используя в ряде случаев довольно сложные узлы силовых схем для выключения тиристоров.

Вторым поколением силовых приборов стали биполярные и полевые транзисторы, а третьим – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Разработанные в указанный период силовые биполярные транзисторы нашли свою область применения, но радикально ситуацию в силовой электронике не изменили. Только с появлением силовых полевых транзисторов и IGBT в руках инженеров оказались полностью управляемые электронные ключи, приближающиеся по своим свойствам к идеальным. Это резко облегчило решение самых различных задач по управлению мощными электрическими процессами.

Наличие достаточно совершенных электронных ключей даёт возможность не только мгновенно подключать нагрузку к источнику постоянного или переменного напряжения и отключать её, но и формировать для неё очень большие сигналы тока или напряжения практически любой требуемой формы.

Первая в СССР кафедра промышленной электроники была создана в МЭИ под руководством профессора И.Л. Каганова в 1943 г.

Огромный вклад в формирование имиджа силовой электроники в нашей стране внёс выдающийся советский ученый и инженер Юрий Иванович Конев. В 1970-1980-е гг. им был открыт целый ряд программ, в результате реализации которых изучалась и разрабатывалась новая элементная база, создавались основы схемотехники устройств силовой электроники, появились новые научные

школы. При этом зачастую схемотехнические решения, предложенные 30-40 лет назад и невостребованные при их появлении, получали второе дыхание много лет спустя, когда технологии позволяли их реализовать в должной мере.

1.3 Силовая электроника в наши дни и тенденции ее развития

На сегодняшний день силовая электроника является одной из наиболее динамично развивающихся областей науки и техники, в рамках которой во всём мире ведутся активные исследования. Сейчас наблюдаются как эволюционные изменения, так и прорывы в области физики силовых электронных приборов, в области принципов преобразования электроэнергии и методов управления силовыми электронными приборами.

Кроме того, стало очевидным, что для силовой электроники нужны устройства с более высокой компактностью, лучшей технологичностью, более совершенными характеристиками, нежели чем у широко применяемых до сих пор кремниевых приборов. Поэтому значительные изменения могут быть достигнуты только при применении новых материалов с улучшенными характеристиками электрического поля. Такими материалами являются карбид кремния и нитрид галлия. Они подходят для приборов, работающих с большой выходной мощностью, при высоких температурах и на очень высоких частотах. Следовательно, можно достичь более высокого предельного напряжения в приборе при меньшей толщине материала.

В настоящее время созданы реальные образцы силовой техники, работающей на частотах до единиц и десятков гигагерц. Возрастание частоты переключения снижает требования к уровню запасаемой энергии в магнитных компонентах, позволяет значительно улучшить переходные процессы. Принципиально происходит как миниатюризация, так и лучшая интеграция магнитных компонентов в силовые устройства.

Развитие силовой электроники изменяет и сами подходы к решению технических задач. К примеру, создание силовых полевых транзисторов существенно способствует расширению области применения индукторных двигателей, которые в ряде областей вытесняют коллекторные двигатели.

Существенным фактором, благотворно влияющим на распространение устройств силовой электроники, являются успехи информационной электроники и, в частности, микропроцессорной техники. Для управления мощными электрическими процессами используют всё более сложные алгоритмы, которые могут быть рационально реализованы только при применении достаточно совершенных цифровых устройств.

Для получения электрической энергии уже длительное время используют и так называемые альтернативные источники тока: например, солнечные элементы. В настоящее время доля этой энергии в общем объёме электроэнергии невелика. Однако многие учёные считают солнечные элементы очень перспективными источниками электрической энергии, не нарушающими энергетический баланс на Земле.

Вызывают интерес и другие примеры использования альтернативных источников электроэнергии. Так, например, на юго-восточном побережье Австралии запущена первая в мире электросиловая установка, использующая в качестве топлива ореховую скорлупу. Строительство такого генератора обошлось австралийцам в три миллиона местных долларов. Однако высокая производительность электростанции, которая будет перерабатывать до 1680 кг ненужной ореховой скорлупы в час, производя при этом 1,5 МВт электричества, позволяет надеяться на её быструю окупаемость.

Индийские учёные придумали ещё один альтернативный источник тока. Они решили использовать фрукты, овощи и отходы от них для электропитания бытовой техники. Внутри такие источники тока содержат пасту из переработанных бананов, апельсиновых корок и других овощей или фруктов, в которой размещены электроды из цинка и меди. От четырёх таких источников могут ра-

ботать настенные часы, электронная игра или карманный калькулятор. Новинка рассчитана, прежде всего, на жителей сельских районов, которые могут сами заготавливать фруктово-овощные ингредиенты для подзарядки необычных источников тока.

Не за горами тот день, когда человек сможет самостоятельно вырабатывать электричество во время повседневной деятельности. Американские исследователи разрабатывают специальную обувь с пластмассовыми вставками: во время ходьбы нога будет давить на пластинки, заставляя их сжиматься и растягиваться, что позволит вырабатывать до 3 Вт электрической мощности. Этого вполне хватит, чтобы послушать на ходу радио или музыку, сэкономив, таким образом, на гальванических элементах.

Несколько лет назад компания "Vodafone" спонсировала разработку необычной технологии с названием "Power Pocket". Устройства на основе этой технологии должны находиться как можно ближе к телу человека, чтобы использовать его тепло для производства электроэнергии для бытовых нужд. На данный момент на основе технологии "Power Pocket" созданы два практичных товара: шорты и спальный мешок. Впервые они были опробованы в 2013 г. Опыт оказался удачным, одной ночи человека в таком спальном мешке оказалось достаточно, чтобы зарядить аккумулятор смартфона примерно на 50%.

Японская компания "East Japan Railway Company", один из лидеров пассажирских перевозок в Японии, решила оснастить каждый свой турникет генератором электроэнергии. Так что пассажиры, проходящие через них, сами того не осознавая, будут вырабатывать электричество.

В Бразилии есть тюрьмы, в которых заключенным позволяют крутить педали велотренажеров, вырабатывая энергию для окрестных деревень. За это им предлагают сокращение срока тюремного заключения.

Американская компания "MagCap Engineering" вместе с изобретателем Гордоном Уодлом считают, что в будущем мы станем получать электроэнергию в основном из деревьев. Каждое дерево будет круглосуточно давать не-

большое количество энергии, которое может накапливаться в аккумуляторах. "Воткните алюминиевый стержень через кору в ствол живого дерева; сделайте медную трубку и погрузите её на 17 сантиметров в грунт. Возьмите вольтметр и убедитесь, что между стержнем в стволе и зарытой трубкой есть потенциал 0,8-1,2 В постоянного тока", – говорит президент "MagCap Engineering" Крис Лагадинос. Разработчики утверждают, что в ближайшее время усовершенствуют устройство, доведя напряжение до 12 В при силе тока в 1 А (с одного дерева).

Если взять сочный кислый лимон, воткнуть в него оцинкованный гвоздь и вставить медную монету, то произойдет химическая реакция, в результате которой освобождается энергия, которую можно использовать. Однако очень-очень мало: подключив вольтметр к лимону, получим напряжение всего 1 В. Чтобы зажечь светодиодную лампочку, потребуется не менее 4 лимонов. Вместо лимона можно использовать апельсин, грейпфрут, луковицу или картошку. Значения могут быть достаточно разными, в зависимости от качества материалов и продуктов, правда получить больше 2 В вряд ли получится. Однако прогресс не стоит на месте: примерно год назад компания "Sony" представила на научном конгрессе в США миниатюрную электрическую батарею, размером 2х4 см, которая работает на фруктовом соке. Она может использоваться в мобильных телефонах, плеерах и ноутбуках.

Ученые Чарльз Милликен и Гарольд Мэй из медицинского университета Южной Каролины нашли любопытный микроорганизм, который вырабатывает электричество, поглощая различные токсичные отходы – десульфитобактерию. Эти бактерии способны к непрерывному производству электричества, достаточного для питания маленьких электронных устройств. Причем пока у этих микроорганизмов есть пища, они способны поставлять электроэнергию 24 ч в сутки 7 дней в неделю. В похожем направлении работают ученые из Бостона – они представили установку, которая получает электричество из почвенных бактерий. Внешне установка выглядит как ведро с грязью, однако

ее энергии хватило, чтобы полностью зарядить аккумулятор мобильного телефона.

Интересным представляется предложение использовать механические электрогенераторы для подзарядки (замены) химических аккумуляторов. На сегодняшний день производятся два вида генераторов: с использованием механических сил, возникающих при естественном движении человека, и с использованием специальных механизмов, приводимых в движение с помощью мускульной силы.

Конструкция первых представляет собой цилиндр, внутри которого расположена катушка, внутри которой, в свою очередь, помещается постоянный магнит в виде шарика. При ходьбе и других движениях человека, шарик внутри катушки перемещается, вызывая появление электродвижущей силы (ЭДС) в катушке. Имея с собой такой источник тока, человек может, например, не бояться остаться без сотовой связи в дальнем туристическом походе.

Также выпускают в настоящее время мини-электрогенераторы с приводимым во вращение вручную ротором, использующие механический завод спиральной (как в механических часах) пружины (компания "Freeplay Energy Europe") с использованием пьезоэффекта.

Генераторы электрической энергии на пьезоэлементах рассматриваются разработчиками для совместного использования с химическими аккумуляторами или даже как их замена. Пьезоэлементы предлагается вмонтировать чаще всего в обувь, реже – в одежду. Также ведутся разработки по созданию синтетической ткани для пошива одежды, которая будет иметь пьезоэлектрические свойства или свойства солнечных батарей.

Необходимо отметить, что технические направления развития устройств, связанных с преобразованием энергии, всегда являлись довольно сложными. Это объяснялось тем, что процессы, в которых происходит изменение энергии при переходе из одного состояния в другое, принципиально обладают "затратной" по расходу мощности технологией, поэтому развитие этих направлений в

технике имеет свою специфику. Она заключается в том, что в изделиях этого типа в любом случае при коммутации силового ключа всегда происходит выделение потерянной в процессе преобразования энергии. А это, в свою очередь, сопряжено с проблемой теплопередачи и, в конечном счете, влияет на долговечность и надёжность всего изделия. Поэтому технический прогресс в этой области весьма консервативен. Если при развитии информационных технологий прогресс при появлении новых, революционных открытий даёт порой гигантский скачок в их развитии, то в системах с преобразованием энергии мы можем наблюдать только постепенный прогресс.

1.4 Электропитание радиоэлектронной аппаратуры

1.4.1 Общие сведения

Толковый словарь определяет *электропитание* как "снабжение чего-то электроэнергией".

Подобно воздуху, являющемуся условием и средой жизнедеятельности практически всех живых организмов на Земле, электропитание является условием и средой функционирования практически всей современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Отказ системы, обеспечивающей электропитание, приводит к прекращению работы питаемого оборудования. Поэтому ни одно радиоэлектронное устройство не может быть надежнее его источника электропитания.

Все источники электроэнергии условно делят на первичные и вторичные. К *первичным источникам электроэнергии* относят источники, преобразующие неэлектрическую энергию (химическую, тепловую, механическую, световую и т. д.) в электрическую. Среди них:

- химические источники тока;
- термоэлектронные генераторы и преобразователи;
- фотоэлектрические источники тока;
- топливные элементы;

- биохимические источники тока;
- атомные источники тока;
- электромашинные генераторы.

Ко *вторичным источникам электроэнергии* относят источники, преобразующие те или иные параметры электрической энергии. Как правило, все вторичные источники электроэнергии относят к устройствам силовой электроники.

Множество различных потребителей требует в общем случае возможности использовать электрическую энергию с нестандартными параметрами (регулируемым напряжением, нестандартной частотой, различным числом фаз, другим, чем в источнике рода тока). Поэтому для наиболее эффективного использования электрической энергии, генерируемой с постоянными параметрами, необходимы преобразователи электрической энергии между источником и потребителем. В развитых странах мира сегодня уже до 50% всей вырабатываемой электроэнергии подвергается преобразованию перед использованием.

Такую ситуацию в чем-то можно сравнить с ситуацией в хлебопечении, где из муки двух зерновых культур – пшеницы и ржи – выпекают сотни различных видов хлебобулочных изделий, позволяющих пользователям выбирать тот продукт, который им наиболее предпочтителен.

Очевидно, вторичный источник электроэнергии не может существовать отдельно от первичного. Тогда как первичный источник вполне может обеспечивать электропитание того или иного устройства без "посредничества" вторичного, если параметры его выходного напряжения соответствуют требованиям питаемого устройства.

Рассмотрим далее наиболее распространённые примеры первичных источников электроэнергии.

Химические источники тока (ХИТ) непосредственно преобразуют химическую энергию в электрическую. ХИТ широко используют для автономного электропитания РЭА. Также их применяют как вспомогательные и (или) резервные источники электроэнергии. Выходное напряжение ХИТ практически

не содержит переменной составляющей (пульсаций). Поэтому ХИТ часто используют в РЭА, критичной к качеству напряжения электропитания.

ХИТ принято делить на две группы:

- гальванические элементы и батареи;

- аккумуляторы (от латинского "accumulator", что означает "собиратель"; в электротехнике так называют устройства, накапливающие электрическую энергию с целью её дальнейшего применения).

Элементы первой группы также называют *первичными* ХИТ, а элементы второй – *вторичными*.

Первичные ХИТ – одноразовые, содержат активные вещества в электродах, а после полного расходования активных веществ становятся неработоспособными и требуют замены новыми. Процесс генерации энергии в ХИТ называют *разрядом*. Как правило, ХИТ работают в режиме непрерывного или прерывистого разряда. ХИТ, состоящий из одной ячейки, называют *гальваническим элементом*. Если ХИТ состоит из двух и более элементов, то его называют *гальванической батареей*.

Так как в ХИТ имеет место непосредственное превращение химической энергии в электрическую (без тепловой стадии), то коэффициент полезного действия (КПД) ХИТ обычно высок – и составляет 90-95%.

Вторичные ХИТ после разряда, т.е. после израсходования активных масс, могут быть приведены в рабочее состояние пропусканием электрического тока через элемент в обратном направлении.

Первичные ХИТ, по сравнению с аккумуляторами, обладают бóльшей удельной электрической ёмкостью и имеют меньшую стоимость. Основным же преимуществом аккумуляторов является возможность их многократного использования и вследствие этого значительно меньшая стоимость единицы получаемой электроэнергии.

Термобатареи непосредственно преобразуют тепловую энергию в электрическую. Их делят на термоэлектронные генераторы и термоэлектронные преобразователи.

В простейшем виде термобатареи представляет собой батарею термопар, у которых одни концы спаев нагреваются, а другие имеют достаточно низкую температуру, благодаря чему создается термо-ЭДС – и во внешней цепи протекает электрический ток. Каждая термопара может состоять из двух разнородных полупроводников или из проводника и полупроводника.

Фотоэлектрические источники тока осуществляют преобразование тепловой и световой энергии в электрическую.

В общем случае к фотоэлектрическим преобразователям относят:

- вентильные фотоэлементы;
- вакуумные и газонаполненные (ламповые) фотодиоды;
- фототранзисторы и фототиристоры;
- электрохимические (жидкостные) фотоэлементы.

Как источник тока в РЭА находят применение только первые из них, так как у остальных КПД преобразования с точки зрения энергетики слишком мал.

Яркий пример вентильных фотоэлементов – солнечные батареи.

Топливные элементы осуществляют непосредственное преобразование энергии химических реакций в электрическую энергию. Действие таких элементов основано на электрическом окислении вещества (топлива), которое подобно реакции горения топлива. Однако в отличие от горения в этих элементах окисление топлива и восстановление кислорода происходит на разных электродах. Поэтому энергия выделяется в нагрузке без промежуточного преобразования в энергию иного вида, что обеспечивает высокий КПД преобразователя. В топливных элементах химическая реакция протекает при взаимодействии активных веществ, которые в твердом, жидком или газообразном состоянии непрерывно поступают к электродам.

В отличие от ХИТ, в топливных источниках тока электроды являются нерасходуемыми (и неизменяемыми при работе), а реагенты хранятся вне элемента и подаются в него в процессе работы.

Биохимические источники тока можно рассматривать как разновидность топливных элементов, так как в них протекают подобные окислительно-восстановительные процессы. Отличие биохимических элементов от топливных состоит в том, что активные вещества (или одно из них) создаются с помощью бактерий или ферментов из различных углеводов и углеродов.

Атомные элементы превращают атомную энергию непосредственно в электрический ток, минуя множество "посредников": паровые котлы, паропроводы, теплообменники, турбины, вращающиеся генераторы тока. Напряжение в таких элементах может достигать нескольких киловольт, а внутреннее сопротивление очень велико (порядка 10^{13} Ом). Разрядный ток не превышает одного миллиампера. Достоинством таких элементов является очень большой срок службы.

Электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Их делят на генераторы постоянного и переменного тока. Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трёхфазные синхронные и асинхронные генераторы, действие которых основано на использовании вращающегося магнитного поля (закона Фарадея).

Вторичными источниками электроэнергии являются устройства, приводящие параметры выходной электроэнергии первичных источников к требуемым для электропитания той или иной РЭА (рисунок 1.9).

В дальнейшем вторичные источники электроэнергии будем называть источниками электропитания (ИЭП). Согласно ГОСТ 52907-2008, ИЭП – это устройство силовой электроники, входящее в состав РЭА и преобразующее входную электроэнергию для согласования её параметров с входными параметрами составных частей РЭА.



Рисунок 1.9 – Схема электропитания РЭА

Иными словами, ИЭП представляют собой функциональные узлы РЭА или законченные устройства, использующие энергию, получаемую от первичного (или вторичного) источника электроэнергии, и предназначенные для обеспечения той или иной РЭА электроэнергией требуемого вида и качества.

Исторически первые электронные устройства питались от ХИТ (гальванических батарей). Однако стремительное развитие переменного тока в конце XIX века и глобальная электрификация заставили искать и разрабатывать новые устройства, способные понижать и преобразовывать напряжение промышленной сети. Так, понижающий трансформатор решал вопрос уменьшения напряжения переменного тока, ламповый выпрямитель преобразовывал переменный ток в постоянный, а конденсаторы выполняли функцию сглаживающего фильтра.

С середины XX века в ИЭП начали активно заменять радиолампы на полупроводниковые приборы, а затем – на малые интегральные схемы. Одновременно разрабатывались новые топологии ИЭП. Это позволило значительно уменьшить габариты ИЭП, повысить качество выходного напряжения, значительно упростить регулировку необходимых параметров.

Современные ИЭП могут иметь широкий диапазон регулировок, программируемые защиты, собственный ЖК-дисплей и активно взаимодействуют с компьютером.

Таким образом, ИЭП в своём развитии прошли путь от крупногабаритных блоков на вакуумных лампах до микросхем, уместящихся на подушечке пальца (рисунок 1.10).

В настоящее время ИЭП чаще всего являются унифицированными и выпускаются серийно как отечественной, так и зарубежной промышленностью в виде модулей и блоков электропитания (рисунок 1.11). Поэтому при создании той или иной РЭА разработчик может подобрать унифицированный ИЭП.

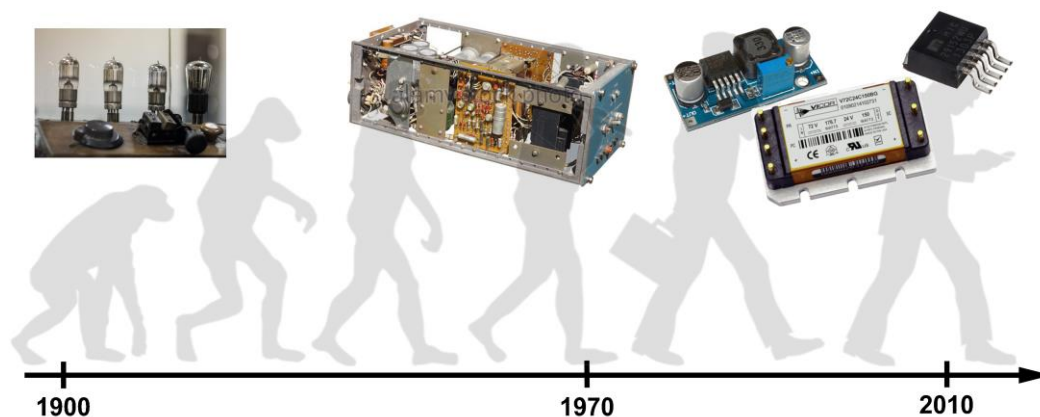


Рисунок 1.10 – Эволюция ИЭП



Рисунок 1.11 – Современные серийные модули электропитания

Однако если по эксплуатационным, конструктивным или другим соображениям серийные ИЭП не удовлетворяют потребителя, то требуется изготовление специализированных ИЭП с учётом всех правил и ограничений, специфичных для данного вида РЭА (рисунок 1.12). Поэтому во всём мире существует множество компаний, изготавливающих собственные ИЭП (в виде отдельных узлов или блоков), как правило, для своей же РЭА.



Рисунок 1.12 – Специализированные ИЭП

Рассмотрим далее, как осуществляют электропитание различной РЭА.

1.4.2 Портативная аппаратура

За последние 20 лет число портативной техники выросло на порядки. Это связано, прежде всего, с появлением мобильных телефонов, ноутбуков и компьютерных планшетов. Как правило, они используют как первичные источники электроэнергии (литий-ионные аккумуляторы и т. д.), так и вторичные. Это обусловлено тем, что, во-первых, портативная техника должна иметь автономное электроснабжение, а во-вторых, она включает в себя ряд узлов (усилители мощности, микропроцессоры, дисплеи и т. д.), каждый из которых требует отдельного электропитания (как по номиналу питающего напряжения, так и по некоторым другим характеристикам). Поэтому для преобразования выходного напряжения аккумуляторов (гальванических батарей) используют ИЭП того или иного вида. Например, в типовом современном мобильном телефоне напряжение аккумулятора (обычно около 3-4 В) преобразуется ИЭП следующим образом:

- в напряжение 3-5 В для дисплея/клавиатуры/вибровозонка;
- в регулируемое напряжение (1,5-3) В для усилителя мощности передатчика;
- в 1,3 В для микропроцессора и т. д.

Точные значения напряжений, а также возможные структуры системы электропитания мобильных телефонов варьируются от модели к модели – и, как правило, производители неохотно раскрывают эти данные.

Обычно ИЭП встраиваются в основную (материнскую) плату мобильного телефона и имеют малые размеры, составляя так называемую интегрированную систему электропитания. Основой такой системы является специальная микросхема ASIC (application-specific integrated circuit – интегральная схема специального назначения), выполняющая, среди прочих, следующие функции:

- управление включением электропитания;
- формирование линейки напряжений для электропитания элементов цифровой и аналоговой частей телефона;
- обеспечение заряда батареи.

Упрощенная схема одного из типовых вариантов системы электропитания мобильного телефона приведена на рисунке 1.13. А на рисунке 1.14 показано место ИЭП в составе современной портативной техники компании "Apple".

Для заряда аккумуляторов портативной техники, в свою очередь, используют зарядные устройства – ИЭП, обеспечивающие заряд аккумуляторных батарей в соответствии с тем или иным алгоритмом. Одно из первых зарядных устройств GSM мобильных телефонов показано на рисунке 1.15.

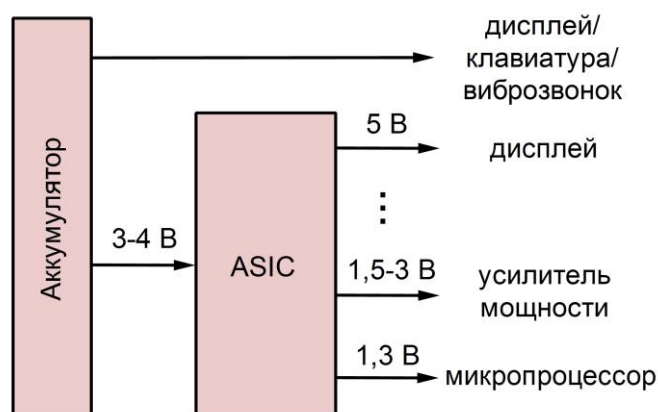


Рисунок 1.13 – Упрощённая структура типовой системы электропитания мобильного телефона

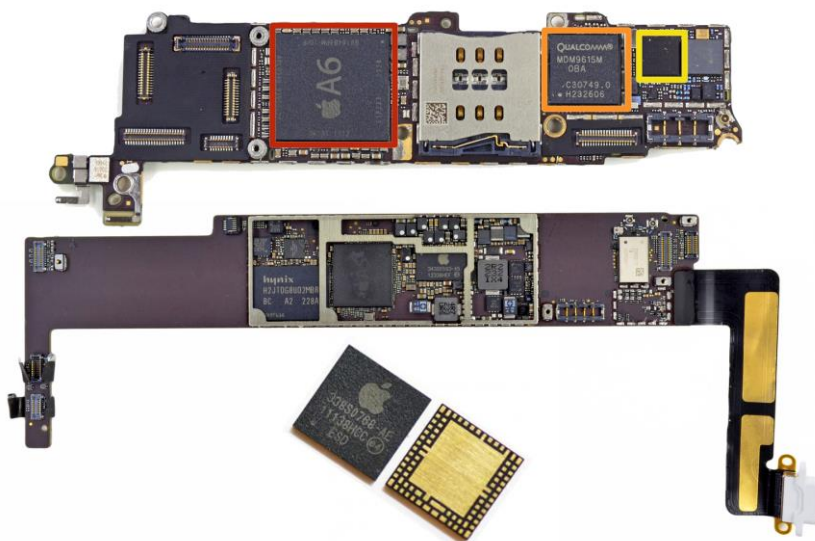


Рисунок 1.14 – ИЭП в составе смартфона и компьютерного планшета производства компании "Apple"

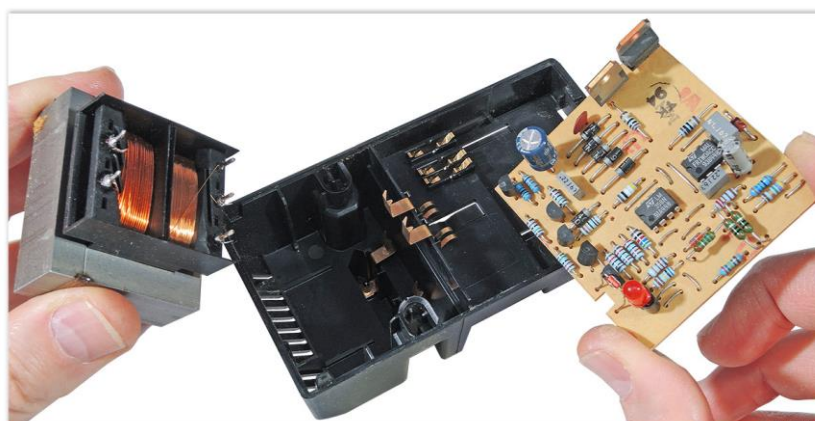


Рисунок 1.15 – Зарядное устройство мобильного телефона Siemens S24859-C2510-A7-1 (середина 1990-х гг.)

1.4.3 Стационарная аппаратура

Стационарная аппаратура представляет собой наиболее широкую область применения ИЭП. Это бытовая техника, музыкальная техника, компьютерное оборудование, связанное и телевизионное оборудование и т. д. (рисунки 1.16-1.18).

Как правило, для электропитания стационарной РЭА используют ИЭП всего диапазона возможных мощностей.



Рисунок 1.16 – ИЭП усилителя мощности музыкального центра

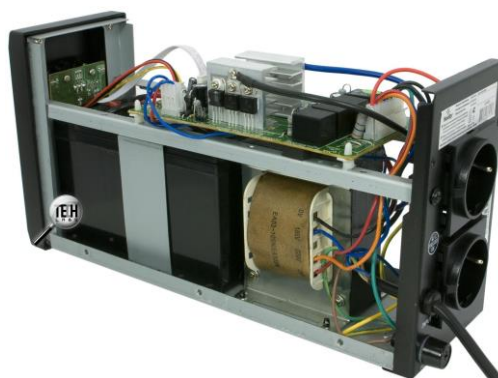
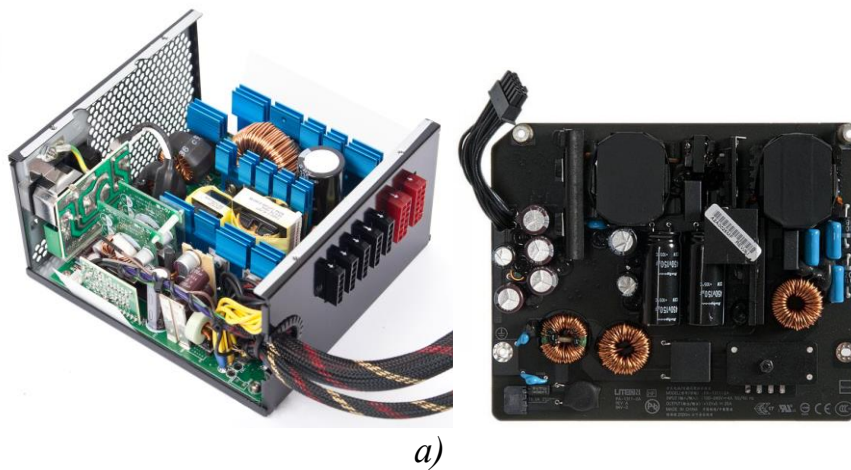
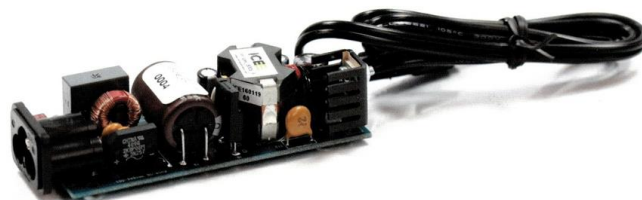


Рисунок 1.17 – Источник бесперебойного электропитания



а)



б)

Рисунок 1.18 – ИЭП компьютеров PC и Apple iMac (а) и адаптер электропитания для телевизора (б)

Обычно стационарная аппаратура запитывается от промышленной сети однофазного или трёхфазного переменного тока ($\sim 230/400$ В 50 Гц), в редких случаях от аккумуляторов и собственных генераторов переменного тока, в том числе с повышенной частотой (обычно 400 Гц).

Как правило, требования, предъявляемые к ИЭП стационарной РЭА, зависят от вида и назначения РЭА. Разумеется, требования, предъявляемые к ИЭП бытового музыкального проигрывателя отличаются от требований, предъявляемых к научной измерительной аппаратуре, базирующейся в условиях Крайнего Севера.

Различают источники бесперебойного и гарантированного электропитания для стационарной РЭА. К примеру, для бесперебойного функционирования базовых станций мобильной связи к их ИЭП предъявляют особые требования по надёжности и другим электрическим характеристикам. Кроме того, система их электропитания имеет более сложную структуру. Это обусловлено, в частности, тем, что существующие электросети во многих случаях оставляют желать лучшего. Перебои в электроснабжении могут достигать от нескольких минут до нескольких суток, что совершенно не приемлемо, например, для систем мобильной связи.

Система электропитания типовой базовой станции состоит из нескольких элементов: распределительного щита, системы автоматического включения резерва (АВР), ИЭП с комплектом аккумуляторных батарей (АКБ). В зависимости от объекта могут быть установлены и другие системы. Упрощённая схема типовой структуры системы электропитания базовой станции мобильной связи приведена на рисунке 1.19, а на рисунке 1.20 – внешний вид стойки базовой станции.

Назначение распределительного щита – распределение напряжения источника первичной электроэнергии на различные электрические системы объекта. Каждая из цепей, обычно, оснащается отдельным автоматом. Также в состав щита, как правило, включают счётчик электроэнергии.

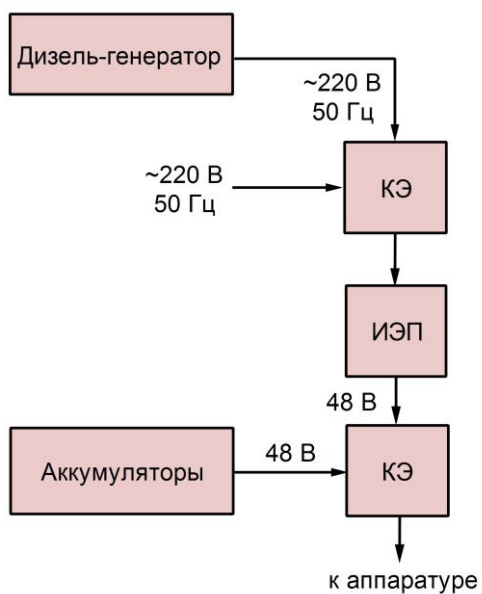


Рисунок 1.19 – Упрощённая схема типовой системы электропитания базовой станции мобильной связи

КЭ – ключевой элемент; ИЭП – источник электропитания

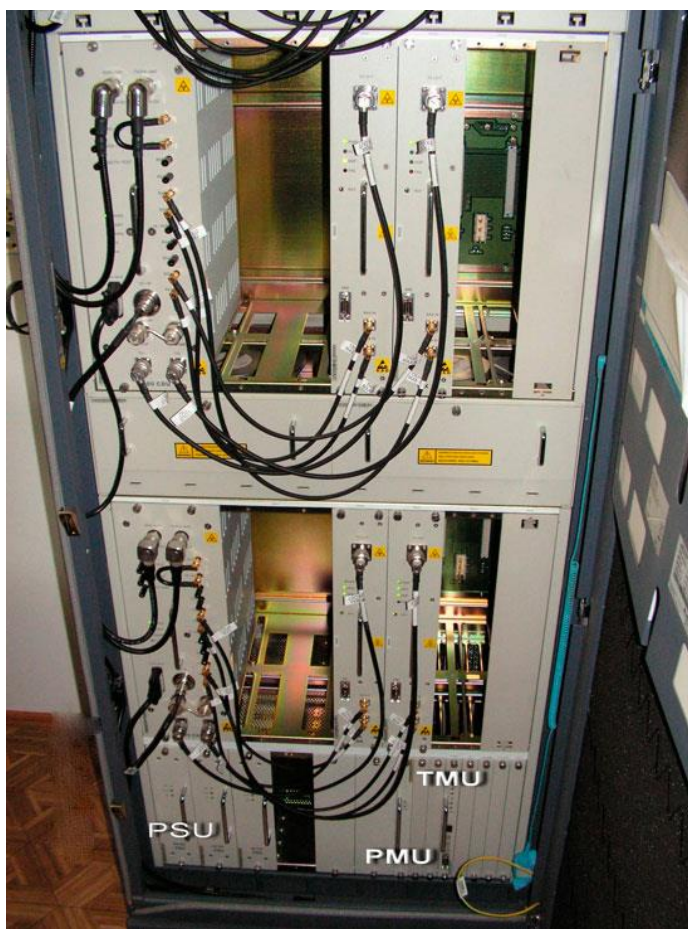


Рисунок 1.20 – Стойка базовой станции мобильной связи с блоком ИЭП

Основная задача ИЭП – преобразование выходного напряжения источника первичной электроэнергии (обычно это напряжение трёхфазного переменного тока $\sim 220/380$ В 50 Гц) в напряжение с характеристиками, требуемыми для работы телекоммуникационного оборудования (обычно это напряжение постоянного тока 48 В). ИЭП не только преобразует, но и стабилизирует параметры в достаточно жёстких пределах – вплоть до 1-2% в условиях действия дестабилизирующих факторов, что, к сожалению, достаточно распространено, особенно в сельских электрических сетях.

Вместе с тем практически все базовые станции оснащают комплектом аккумуляторов, которые обеспечивают электроснабжение объекта на время отключения сети. Поэтому ещё одной важной задачей ИЭП является переключение на электропитание от АКБ на время пропадания внешней электрической сети. После включения сети ИЭП переходит в режим заряда АКБ. Кроме того, он может быть настроен на периодическую подзарядку и тестовую зарядку/разрядку комплекта АКБ. Число и ёмкость АКБ может сильно отличаться от значимости объекта, типа и объёма оборудования, его удалённости, частоты отключения и других факторов. Суммарная ёмкость измеряется в величинах порядка сотен ампер-часов. Обычно исходят из того, чтобы объект смог "продержаться" на АКБ до доставки дизель-генераторной установки (ДГУ), а срок может разниться от нескольких часов до суток.

Для некоторых, особо важных объектов, например, спецсвязи, может устанавливаться дополнительный ввод от независимой линии электропередачи. Для автоматического переключения между резервным и основным вводами используется специальное устройство – АВР. Оно отвечает за своевременное переключение на резерв и возврат в исходное состояние в случае пропадания/восстановления электроснабжения по основной линии. В случае если второй ввод организовать проблематично, а также для обеспечения бóльшей надёжности работы объекта может также быть установлена ДГУ. За её включение/выключение также отвечает АВР.

1.4.4 Радиолокационные системы

РЛС – это системы, позволяющие определять координаты и характеристики различных объектов в воздухе, космосе, на воде, на земле и даже под землёй с помощью радиоволн. Важнейшее применение РЛС нашли в военных целях, особенно в противовоздушной и противоракетной обороне страны. Обнаружение воздушных, надводных и наземных целей на больших расстояниях, распознавание типов и классов целей, наведение с высокой точностью управляемых ракет на цели, дистанционное зондирование земли с авиационно-космических носителей – всё это и многое другое составляет успехи радиолокации сегодняшнего дня на передовых рубежах военно-технического развития страны.

Используют РЛС и в мирных целях – дистанционное зондирование поверхности Земли в интересах экологического мониторинга, геодезии и картографии. Строители и геологи успешно эксплуатируют так называемые георадары для подповерхностного зондирования с целью обнаружения подземных пластов воды и нефти, электрокабелей и трубопроводов. Широко применяют РЛС для управления воздушным движением самолётов и вертолётот, метеорологии, для исследования космического пространства и т. д. В наши дни нет ни одной отрасли науки и техники, в которую РЛС не внесли бы существенный вклад.

Различают стационарные и мобильные РЛС. Электропитание стационарных РЛС может обеспечиваться как от сети переменного тока общего назначения, так и от собственных электромашинных генераторов. Мобильные РЛС, как правило, всегда имеют автономную систему электроснабжения.

Определяющее влияние на тактико-технические характеристики РЛС (дальность действия, точность определения координат цели и т. д.) оказывает, прежде всего, система электропитания составных частей РЛС.

Как и любая радиоэлектронная система, РЛС состоит из передатчика, антенны, приёмника, устройства обработки сигналов и внешних интерфейсов. Как

правило, эта аппаратура крайне чувствительна к некачественной электроэнергии, что отражается, прежде всего, на характеристиках всей РЭС.

Система электропитания РЭС представляет собой совокупность функционально связанных ИЭП, устройств управления, коммутации, распределения, защиты, контроля и сигнализации, надёжно обеспечивающую требуемыми напряжениями все цепи аппаратуры РЭС.

В общем случае структура системы электропитания РЭС зависит от типа РЭС, требований по мощности, выходным напряжениям, массогабаритным параметрам, элементной базы и т. д.

Рассмотрим для примера электротехническую систему РЭС "П-18М" (АО "Концерн ВКО "Алмаз-Антей"). Его структура приведена на рисунке 1.21, а на рисунках 1.23 и 1.24 – фотографии РЭС и одного из ИЭП соответственно.

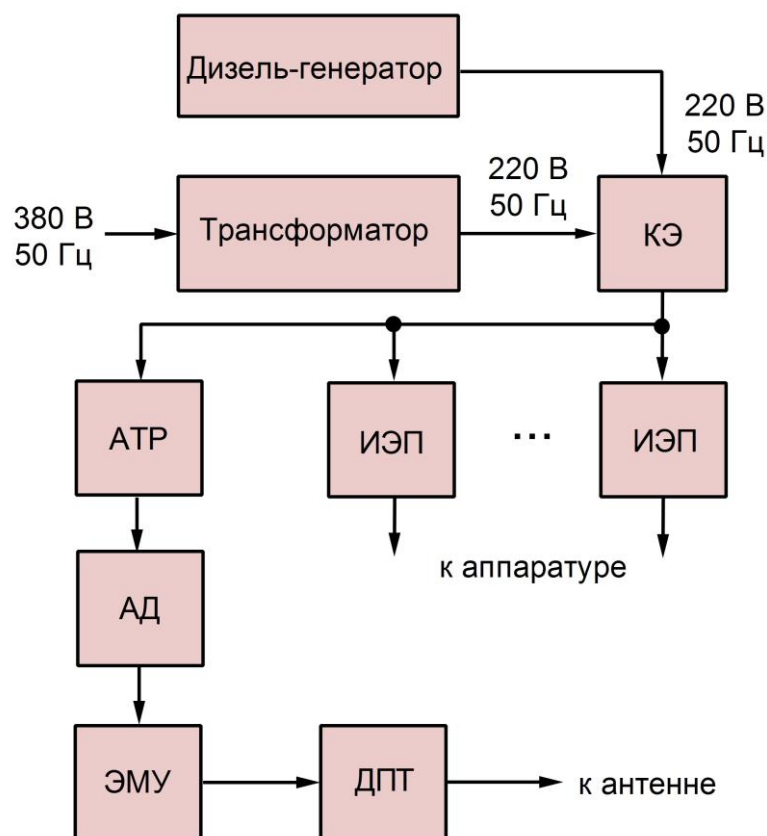


Рисунок 1.21 – Электротехническая система РЭС "П-18М"

АТР – автотрансформатор; АД – асинхронный двигатель; ЭМУ – электромашинный усилитель; КЭ – ключевой элемент; ДПТ – двигатель постоянного тока;

ИЭП – источник электропитания

Дизель-генератор или трансформатор (в зависимости от положения ключевого элемента) осуществляет электроснабжение линейки ИЭП и автотрансформатора электропривода антенны. Электропривод обеспечивает постоянство скорости вращения антенны. Мощность, потребляемая от дизель-генератора или сети, равна 10 кВт.



Рисунок 1.22 – Внешний вид РЛС "П-18М"

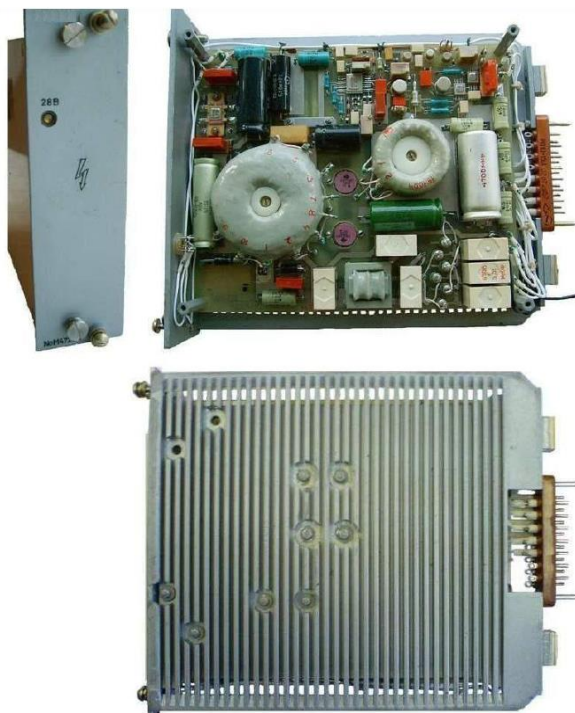


Рисунок 1.23 – ИЭП из состава РЛС "П-18М"
(28 В / 7 А, КПД до 85%)

Электротехническая система бортового радиотехнического комплекса (РТК) самолёта А-50 (АО "Концерн "Вега") имеет структуру, приведённую (упрощённо) на рисунке 1.24. Внешний вид самолёта-носителя РТК приведён на рисунке 1.25.

Основу автономной электротехнической системы в этом случае составляет генератор переменного трёхфазного тока напряжением 115/220 В частотой 400 Гц, подключаемый к маршевому двигателю. Выходное напряжение генератора является входным для линейки ИЭП, а также для отдельного выпрямительного устройства, преобразующего переменное напряжение 115/220 В частотой 400 Гц в постоянное 27 В для электропитания РЭА. С целью повышения надёжности системы выпрямитель резервирован аккумулятором.

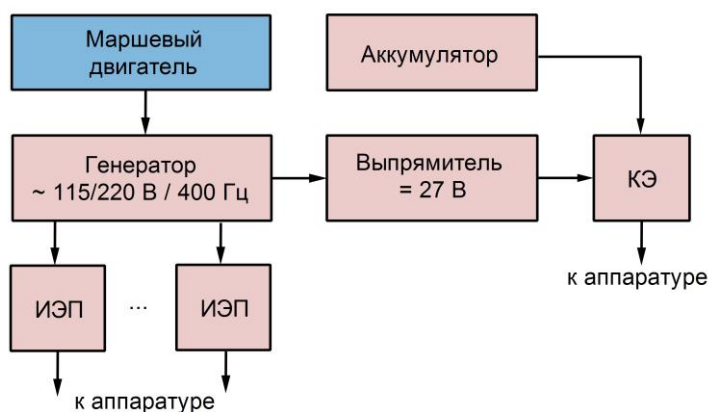


Рисунок 1.24 – Электротехническая система РТК самолета А-50

ИЭП – источник электропитания; КЭ – ключевой элемент.



Рисунок 1.25 – Внешний вид авиационного комплекса А-50

В настоящее время в РЭС широко применяют антенные решётки, каждый элемент которых имеет в своём составе, помимо излучателя, собственный приёмо-передающий модуль (ППМ). Система электропитания такой антенной решётки является распределённой. Её типовая структура приведена на рисунке 1.26, а на рисунке 1.27 – внешний вид бортовой РЭС "Жук-АЭ" (АО "Корпорация "Фазотрон-НИИР") для истребителя МиГ-35.

Число ИЭП в антенной системе подобных РЭС может достигать нескольких тысяч. В зависимости от требуемого функционала РЭС каждый ИЭП антенной решётки может обеспечивать электропитанием как свой собственный ППМ, так и их группу. Например, на рисунке 1.28 изображена плата ИЭП, обеспечивающего электропитанием линейку ППМ антенной решётки наземной РЭС.

Системы электропитания других специальных радиоэлектронных систем так же отличаются разнообразием (в зависимости от типа РЭА, первичного источника электроэнергии и т. д.). Однако их типовые структуры практически совпадают с ранее рассмотренными для РЭС.

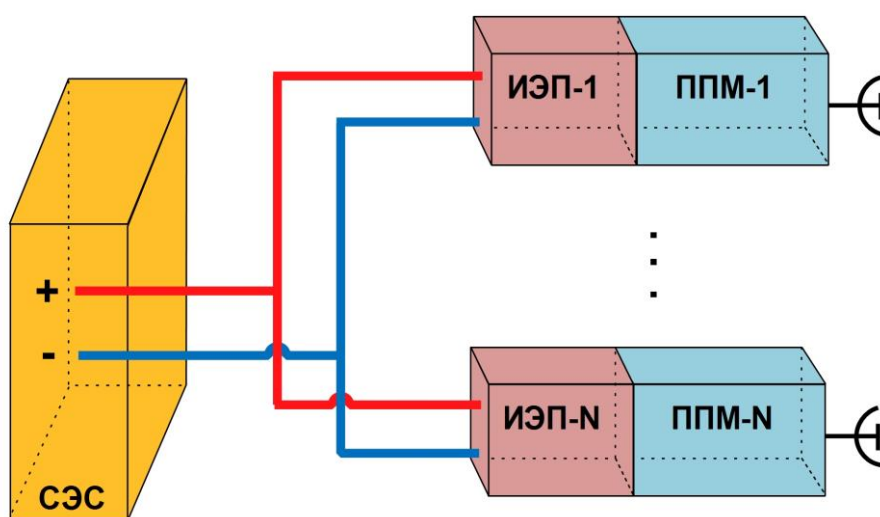


Рисунок 1.26 – Структура системы электропитания антенной решётки

СЭС – система электроснабжения носителя; ИЭП – источник электропитания;

ППМ – приёмо-передающий модуль



Рисунок 1.27 – Бортовая РЛС "Жук-АЭ"

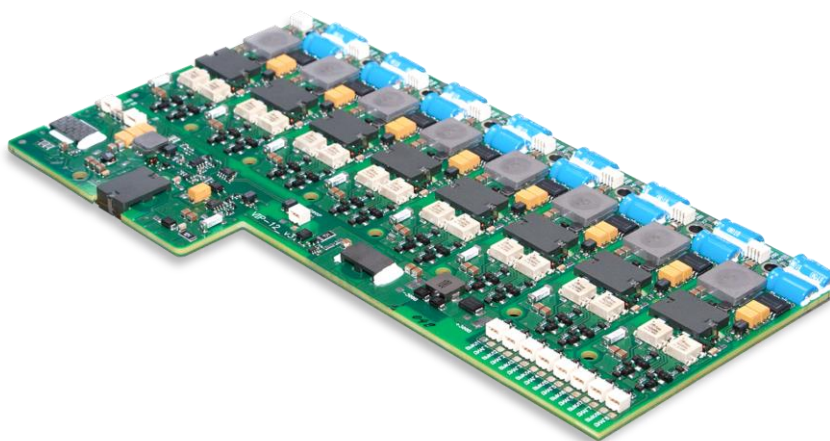


Рисунок 1.28 – ИЭП линейки ППМ наземной РЛС с антенной решеткой

1.5 Системы электроснабжения летательных аппаратов

Авиационные системы электроснабжения. Бортовая система электроснабжения летательных аппаратов (ЛА) – система, предназначенная для обеспечения бортового электрооборудования ЛА электроэнергией требуемого качества. *Системой электроснабжения (СЭС)* принято называть совокупность устройств для производства и распределения электроэнергии.

Первый проект самолетного электрооборудования разработал в 1869 г. выдающийся русский электротехник А.Н. Лодыгин. На его вертолете «электролете» с приводом двух воздушных винтов предусматривался электрический

двигатель, комплекс электрооборудования, включавший аккумулятор, и изобретенные автором проекта лампы накаливания.

Создатель первого в мире самолета А.Ф. Можайский в 1879 г. предложил использовать энергию электрической искры для воспламенения горючей смеси в разработанном им двигателе. Высокое напряжение, необходимое для искрового разряда, получалось с помощью индукционной катушки, питаемой от аккумуляторной батареи.

Таким образом, на первых самолетах источником электроэнергии служил аккумулятор. Он использовался для зажигания горючей смеси в двигателях и для освещения. Затем на отдельных самолетах появились и генераторы. Так, в 1912 г. для освещения, обогрева и радиосвязи на бомбардировщике «Илья Муромец» был установлен генератор переменного тока (1000 Гц, 2 кВА) разработки В.П. Вологодина. Генератор приводился во вращение от ветряного двигателя.

С 1919 г. на самолетах стали применять постоянный ток напряжением 8 В, а с 1923 г. – 12 В, в 1933 г. – 24 В, в 1937 г. – 27 В.

Источниками электрической энергии являлись генераторы постоянного тока мощностью 250-650 Вт с приводом от авиационного двигателя и аккумуляторные батареи емкостью до 15 А-ч. Для преобразования постоянного тока напряжением 24 В в постоянный ток напряжением 220-650 В, необходимый для питания радиотехнических устройств, начали использовать умформеры мощностью до 150 Вт.

Важной вехой в истории авиационного электрооборудования стал 1939 г. На бомбардировщике Пе-2 впервые в авиации широко был использован электропривод. Электромеханизмы для привода шасси, стабилизатора, посадочных щитков, управления триммерами к нему разрабатывались под руководством А.А. Енгибаряна и К.В. Рогова. Это привело к повышению использования электроэнергии на самолетах. В качестве источников электрической энергии на этом самолете были установлены два генератора ГС-1000 мощностью по

1000 Вт и две аккумуляторные батареи 12-А-30. Оборудование самолета Пе-2 выдержало проверку в годы Великой Отечественной войны. В США, Англии и Германии подобное электрооборудование на самолетах стало внедряться лишь спустя 2-3 года после создания самолета Пе-2.

В 1943 г. на самолетах широко стали применяться угольные регуляторы напряжения. В 1944 г. появились новые провода (типа ВПВЛ) с хлорвиниловой изоляцией. К 1945 г. для авиации была разработана серия генераторов типа ГСР мощностью до 9 кВт.

Послевоенный период развития систем электроснабжения характеризуется быстрым ростом потребления электрической энергии на самолетах гражданской авиации. В 1956 г. был создан первый в мире пассажирский реактивный самолет Ту-104. Для запуска авиадвигателей на этом самолете был применен турбостартер, что коренным образом изменило электрическую часть системы запуска. С появлением других тяжелых самолетов подобного типа росла мощность их электросистемы. Так, на самолете Ту-104 установленная мощность системы электроснабжения составляла 59 кВт, а на Ту-114 (1957 г.) – 250 кВт. Стала ясной необходимость нового повышения напряжения самолетной электросети. Для этого наиболее удобной оказалась система трехфазного тока. Инициатором применения этой системы на самолетах был А.Н. Туполев. На самолете «Максим Горький» (1934 г.) впервые в мире в качестве основного был принят трехфазный переменный ток (электрооборудование самолета было спроектировано проф. А. Н. Лариновым при участии С. В. Крауз и К.В. Рогова).

К этой идее возвратились через 20 лет – в середине 1950-х гг. Так, Ил-62 стал первым самолетом гражданской авиации, на котором в качестве первичной СЭС использовалась система трехфазного переменного тока напряжением 200/120 В частотой 400 Гц с установленной мощностью 160 кВт.

1970-е гг. благодаря интенсивному развитию полупроводниковой техники и радиоэлектроники являются началом нового этапа развития авиационной электротехники, связанного с разработкой различных статических преобразова-

телей электрической энергии, систем управления, регулирования и защиты, выполненных на новой элементной базе, позволившей существенно расширить круг задач, решаемых с помощью электрического оборудования, повысить надежность его работы.

Дальнейшее совершенствование СЭС переменного тока нашло свое воплощение в электрооборудовании самолетов Ил-96-300 и Ту-204. Установленная мощность основных генераторов первичной СЭС для самолета Ил-96-300 составляет 240 кВт, а для самолета Ту-204 – 180 кВт. Генераторы имеют интегральную конструкцию и в сочетании с современной аппаратурой регулирования и защиты обеспечивают высокое качество электрической энергии.

Для электропитания авиационного бортового электрооборудования в настоящее время применяют электроэнергию постоянного тока напряжением 28 В, переменного однофазного или трехфазного с нейтралью тока с напряжением 200/115 В частотой 400 Гц, переменного трёхфазного без нейтрали тока линейным напряжением 36 В частотой 400 Гц. Суммарная мощность генераторов на борту может составлять от 20 кВт для небольших самолётов или вертолёт до 600 и более кВт для тяжелых ЛА.

Надежность СЭС ЛА является одним из основополагающих факторов безопасности полёта. Поэтому предусматривается комплекс мер для повышения надёжности функционирования и живучести бортовой СЭС ЛА. Как правило, применяют основные, резервные и аварийные источники электроэнергии. *Основные* источники обеспечивают потребности в электроэнергии в нормальных условиях полёта. *Резервные* источники питают потребителей при нехватке мощности основных источников, вызванной отказами в работе СЭС. *Аварийные* источники питают только жизненно важные системы ЛА (потребители первой категории), без которых невозможно безопасное завершение полёта.

По принципу действия авиационные генераторы не отличаются от аналогичных наземных генераторов, но обладают рядом особенностей: малая масса и габариты, большая плотность тока якоря, принудительное воздушное, испари-

тельное или жидкостное охлаждение, высокая частота вращения ротора, применение высококачественных конструкционных материалов. Генераторы устанавливаются на двигателях и вспомогательных силовых установках, при этом частота вращения турбовинтовых двигателей ЛА стабилизирована регулированием нагрузки двигателя за счет изменения шага винта.

К примеру, сегодня в истребительной авиации применяют бортовые генераторы переменного тока ГТ30НЖЧ12. На самолете Су-27 используются два таких генератора, а на самолете МиГ-29 – один. Мощность генератора 30 кВА.

Резервным источником переменного тока служит генератор вспомогательной силовой установки (ВСУ) – небольшой газотурбинный двигатель, установленный в хвосте самолета, а также статический преобразователь. Генератор здесь такой же, как и на двигателе, за исключением того, что он без привода постоянных оборотов. ВСУ в отличие от двигателя всегда вращается с постоянными оборотами, и надобность в нем отпала. Этот генератор может использоваться для питания самолета в воздухе, в случае отказа одного из генераторов, установленных на двигателе. Так же его используют для того, чтобы запитать самолет на земле, когда двигатели не работают.

Статический преобразователь работает от бортовых аккумуляторных батарей и используется для питания переменным однофазным током 115 В 400 Гц и 36 В 400 Гц (через понижающие трансформаторы) наиболее важных потребителей в полете в случае отказа основной системы, до запуска ВСУ и при отказе понижающего трансформатора системы переменного трехфазного тока, которая получает питание от основной системы переменного трехфазного тока.

Основные и резервный генераторы системы переменного тока работают в комплекте с блоками регулирования, автоматически включающими генераторы в работу, поддерживающими постоянными напряжение и частоту, обеспечивающими равномерную загрузку генераторов при параллельной работе. Блоки автоматически выключают неисправный генератор, отключая его сначала от па-

параллельной работы, а затем от бортовой сети. Потребители при этом автоматически подключаются к шинам исправного генератора.

Аварийным источником переменного тока служит ветродвигатель (ADG – air driven generator) – это турбина, которая раскручивается набегающим потоком воздуха (рисунок 1.29). Выпускается вручную или автоматически. На одном валу с турбиной стоит генератор, который вырабатывает переменный трехфазный ток напряжением 115 В 400 Гц. От него запитываются только жизненно-важные потребители.



Рисунок 1.29 – Аварийный ветродвигатель

Данное решение реализовано на большом количестве гражданских воздушных судов, например, им оснащены аварийные системы электроснабжения самолетов SSJ-100, MC-21, A380, Boeing 787.

Стоит отдельно отметить, что на борту A320 применяется комплексное решение, заключающееся в применении RAT, на валу которого установлен гидронасос, нагнетающий давление в одну из трех гидросистем. Данная энергия используется для управления самолетом и одновременно для питания привод-генераторов. Номинальная мощность подобного рода систем не превышает 40 кВА (на B787) и, как правило, составляет величину порядка 10-20 кВА.

Несомненными преимуществами данного решения являются:

- отсутствие ограничений на продолжительность работы источника;
- полная независимость от маршевого двигателя;
- стабильная частота вращения генератора, обеспечиваемая винтом изменяемого шага.

Однако данное решение обладает и рядом существенных недостатков:

- зависимостью от условий полета, а именно от высоты и скорости полета;
- ограничением мощности единичного RAT, однозначно определяемой диаметром турбины.

В СЭС постоянным током входят три (левый, правый и резервный) охлаждаемых выпрямительных устройства (TRU – transformer rectifier units), преобразующие переменный ток в постоянный ток (рисунок 1.30), чем обеспечивается высокая надежность питания потребителей.

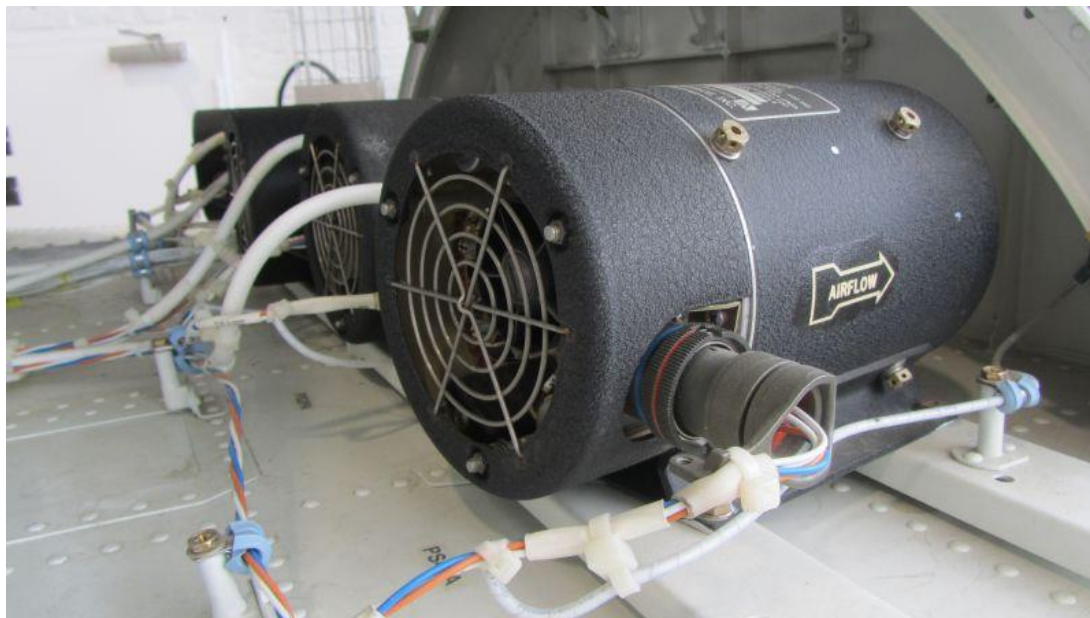


Рисунок 1.30 – Выпрямительное устройство

На современных ЛА аккумуляторные батареи применяют в качестве аварийных источников электроэнергии (для электропитания потребителей первой категории, без которых невозможно нормальное завершение полёта). В свою

очередь, аккумуляторы могут питать аварийные преобразователи тока (обычно небольшие электромашинные или статические) для потребителей первой категории, требующих электропитания переменным током. В течение всего полёта аккумуляторы работают в буфере с генераторами постоянного тока (где это предусмотрено). Используют свинцовые (12САМ-28, 12САМ-23, 12САМ-55), серебряно-цинковые (15СЦС-45) и никель-кадмиевые (20НКБН-25, 20НКБН-40, 20НКБН-28, 20КСХ-27) аккумуляторные батареи.

От аккумуляторных батарей в случае отказа основных генераторов осуществляются запуск ВСУ и питание наиболее важных потребителей до запуска ВСУ (статических преобразователей однофазного тока, статических преобразователей постоянного тока, агрегатов управления самолетом, основных приборов контроля работы двигателей и радиосредств, противопожарной системы и др.). При необходимости запуск ВСУ на земле также производится от аккумуляторных батарей.

Каждый аккумулятор имеет свое зарядное устройство, которое поддерживает аккумулятор в полностью заряженном состоянии.



Рисунок 1.31 – Аккумулятор на борту ЛА

Рассмотрим для примера СЭС пассажирского самолета SSJ-100.

СЭС самолета SSJ-100 предназначена для электропитания потребителей электроэнергией переменным трехфазным током напряжением 115/200 В частотой 400 Гц и постоянным током напряжением 28 В. СЭС переменным током является основной и состоит из двух независимых подсистем по правому и левому борту. Каждый маршевый двигатель приводит в действие свой привод-генератор (IDG – integrated-drive generator), который обеспечивает штатную подачу электропитания переменного тока. Привод-генератор представляет собой единый агрегат, состоящий из гидромеханического привода постоянных оборотов и бесщеточного генератора тока, размещенных в общем корпусе и имеющих общую систему смазки и охлаждения.

Мощность каждого генератора составляет 30 кВт. Поскольку обороты реактивного двигателя непостоянны, для того, чтобы на выходе генератора получить стабильную частоту в 400 Гц, нужно, чтобы вал генератора вращался с постоянным значением оборотов. Для этого внутри генератора установлен привод постоянных оборотов (CSD – constant speed drive). Он преобразовывает переменную частоту вращения на входе в постоянные 12000 оборотов в минуту на выходе. Также предусмотрена возможность отключения генератора от коробки приводов. Отключение может быть как ручное, так и автоматическое. Автоматически генератор отключается в двух случаях: когда температура масла в CSD превысит допустимое значение или когда возникнет очень большой крутящий момент на валу, например, внутри что-то развалится и его заклинит. Ручным отключением пользуются пилоты, если с генератором что-то случается в полете.

Вспомогательная силовая установка (ВСУ, APU) приводит в действие третий генератор переменного тока, образуя вспомогательный источник электроэнергии. После запуска двигателя или ВСУ генераторы подключаются автоматически.

В СЭС переменным током также входит аварийная система электропитания, источником которой является генератор ветродвигателя (RAT) и статический преобразователь (INV), предназначенный для преобразования постоянного тока напряжением 28 В в переменный ток напряжением 115 В частотой 400 Гц.

В СЭС постоянным током входят три (левый, правый и резервный) охлаждаемых выпрямительных устройства (TRU – transformer rectifier units), преобразующие переменный ток в постоянный ток (300 А, 28 В), и аварийные аккумуляторные батареи (четыре никель-кадмиевые аккумуляторные батареи емкостью 27 А·ч и номинальным напряжением 24 В). Зарядка батарей производится от шин постоянного тока. Переключатели управления батареями расположены в кабине экипажа. В штатных режимах работы СЭС аккумуляторы находятся в режиме зарядки – и их энергия не используется. При этом обеспечивается нормальное электроснабжение всех бортовых потребителей электроэнергии. Каждый из аккумуляторов может быть отключен от шины постоянного тока. Все аккумуляторы используются для электроснабжения систем самолёта в аварийном режиме работы при возникновении отказов или отключении основной системы постоянного тока и обеспечивают электропитанием в течение 30 мин.

Для сравнения рассмотрим также СЭС пассажирского самолета ТУ-204-300.

СЭС самолета объединяет следующие системы:

- основную систему электроснабжения переменным током постоянной частоты;
- вторичную систему электроснабжения переменным током постоянной частоты;
- систему электроснабжения переменным током от генератора ВСУ;
- вторичную систему электроснабжения постоянным током.

В качестве источников электроэнергии используются следующие.

В основной системе электроснабжения переменным током постоянной частоты:

- два генератора переменного тока в составе интегральных гидромеханических приводов-генераторов ГП 26, установленные по одному на каждом двигателе;

- генератор переменного тока ГТ60ПЧ48Б, установленный на двигателе ВСУ, используемый как вспомогательный источник электроэнергии;

- статические преобразователи ПОС-1000Б № 2 (ПОС 2) и ПТС-250БМ (ПТС 1), используемые как аварийные источники электроэнергии и являющиеся одновременно источниками электроэнергии во вторичной системе электроснабжения переменным током;

- аэродромный передвижной агрегат или стационарный источник переменного трехфазного тока напряжением 200/115 В частотой 400 Гц с заземленной силовой нейтралью.

Во вторичной системе электроснабжения переменным током постоянной частоты:

- статические однофазные преобразователи ПОС-1000Б № 1, 2 напряжением 115 В частотой 400 Гц;

- статический трехфазный преобразователь ПТС-250БМ напряжением 200/115 В частотой 400 Гц;

- статический трехфазный преобразователь ПТС-2500 (ПТС 2) напряжением 200/115 В частотой 400 Гц.

Во вторичной системе электроснабжения постоянным током:

- три выпрямительных устройства ВУ-6БК (два основных и один резервный);

- четыре аккумуляторные батареи 20НКБН25-ТД-1-УЗ, или 26108-6, или 20FP25НІСТ-R как аварийные;

- четыре привода-генератора ГП-27, получающие питание от гидросистемы самолета.

Конструктивно система электроснабжения постоянным током состоит из двух независимых подсистем – левой и правой.

Системы электроснабжения космических аппаратов. Все большую значимость в современном мире обретают космические аппараты (КА). Число государств, имеющих на орбите Земли собственные КА (как крупные платформы массой несколько десятков тонн, так и малые аппараты массой менее 1 кг класса CubeSat), уже достигло более 80.

Современный КА является сложнейшим электромеханическим устройством. При его проектировании и изготовлении используются самые передовые достижения науки, и техники на текущий момент времени, что в свою очередь значительно повышает как качество выпускаемой продукции, так и ее стоимость по причине уникальности технологий. Именно поэтому для снижения стоимости разработки КА применяется метод унификации, заключающийся в том, что основные мировые производители космического приборостроения используют, так называемые космические платформы.

Космическая (спутниковая) платформа – это общая унифицированная модель для построения КА, включающая в себя служебные системы аппарата (модуль служебных систем) и конструкцию модуля полезной нагрузки (модуль специальных систем – целевая аппаратура). К специальным системам относятся устройства, которые обеспечивают выполнения целевых задач КА (например, ретрансляционные, радиоприемные устройства, различная научная аппаратура и т.п.). К служебным же системам относятся те, которые обеспечивают функционирование и работоспособность КА на орбите в течение времени штатной эксплуатации, а именно:

- система энергоснабжения (СЭС);
- система управления движением, ориентации и стабилизации в пространстве (оптические датчики, звездные датчики, измеритель угловых скоростей, гироскопы и др.);

- апогейный двигатель для довывода с геопереходной на геостационарную орбиту (для аппаратов, находящихся на геостационарных орбитах);
- двигатели коррекции по широте и долготе (электро-реактивные двигатели, ионные двигатели);
- системы терморегулирования (контуры терморегулирования, тепловые трубы и др.);
- бортовой комплекс управления с системой передачи служебной телеметрической информации (бортовая вычислительная машина, телеметрические датчики и др.).

СЭС КА – это служебная система КА, предназначенная для обеспечения других служебных систем КА и специальных (целевых) систем КА энергией заданного качества во всех режимах работы, как в штатных, так и аварийных. К аварийным режимам относятся ситуации, при которых нарушается функционирование одной из составляющих системы (например, отказ одной из аккумуляторных батарей на борту КА или же отсутствие открытия одной из панелей фотоэлектрических батарей).

СЭС современных КА состоит из четырех основных составляющих:

1. Первичный источник энергии (солнечные батареи; термодинамические генераторы, основанные на цикле Брайтона; электрохимические генераторы; ядерные установки и др.).

На начальном этапе своего развития в космическом аппаратостроении находили свое применение электрохимические генераторы. Следствием использования, которых являлось малое время активного существования КА на орбите, не превышающее трех месяцев. Дальнейшая работа по повышению срока службы КА привела к попыткам использования ядерных установок (первый КА Snapshot (США) был запущен 03.04.1965 г, первый советский КА – 03.10.1967 г.), но ввиду их довольно большой экологической опасности (о чем свидетельствуют аварии данных аппаратов), а также достаточной сложности конструкции, требующей многократного резервирования подсистем, данное

направление получило свое развитие только в межпланетных исследовательских КА.

В дальнейшем все более широкое применение стали получать солнечные батареи. Изначально стоимость использования батарей превышала стоимость использования ядерных установок, к тому же их КПД не превышал и 10%, что влекло в свою очередь увеличение площади солнечных панелей, а как следствие и массы всего КА в целом. С улучшением технологий и «чистоты» производства полупроводников солнечные батареи, основанные на кремнии (Si) (а на настоящий момент и на гетероструктурах GaInP/GaAs/Ge), имеют КПД достигающий 30%, и согласно перспективным исследованиям в данной отрасли в ближайшее время данный показатель может достигнуть значения порядка 40%, что полностью удовлетворяет потребностям современных КА.

Особенностью солнечных батарей являются их нелинейные вольт-амперные и вольт-ваттные характеристиками, которые в значительной степени изменяются в процессе эксплуатации. В зависимости от типа рабочей орбиты и длительности участков, на которых солнечные батареи освещены либо находятся в тени, устанавливаются диапазоны изменения их температуры и освещенности. Фотоэлектрические преобразователи солнечной батареи генерируют максимальную мощность при максимальном охлаждении и освещенности, т.е. при выходе КА из тени Земли. С увеличением температуры панелей генерируемая мощность значительно уменьшается. Под воздействием интегральной дозы ионизационного излучения космического пространства мощность БС за несколько лет уменьшается на 30-50%.

2. Вторичный источник энергии или накопители энергии (кинетические накопители; тепловые аккумуляторы; индуктивные накопители; емкостные накопители и электрохимические накопители).

Наибольшее применение из них нашли электрохимические накопители – аккумуляторы, ввиду своей технологичности, энергетическим и массогабаритным показателям.

Цель аккумулятора – накопление электрической энергии от первичных источников энергии и обеспечение энергией энергопреобразующую аппаратуру на теневых участках орбиты КА.

Работа аккумулятора в составе СЭС КА имеет свои особенности:

- условия космического пространства (невесомость, фактор космического излучения);
- широкие температурные колебания, особенно при нахождении аккумулятора вне гермоконтейнера на корпусе КА;
- длительный срок эксплуатации (срок активного существования КА на сегодняшний момент достигает 10 лет и более);
- повышенное число разрядно-зарядных циклов.

Число разрядно-зарядных циклов индивидуально для каждого КА. Так для геостационарных КА за 10 лет активного существования количество разрядно-зарядных циклов не превышает нескольких тысяч, для низкоорбитальных же КА только за сутки количество подобных циклов может составить 15-20 (за 10 лет активного существования КА количество разрядно-зарядных циклов составляют десятки тысяч).

Изначально, в СЭП КА использовали серебряно-цинковые аккумуляторы. Однако из-за низкого ресурса при циклической работе они практически полностью были заменены никель-кадмиевыми, которые так же имеют относительно низкую удельную энергию (до 30 Вт·ч/кг).

Последние два десятилетия активно применяются никель-водородные (НВ) аккумуляторы, отличительные особенности которых: достаточно высокие удельные характеристики (энергоемкость до 60-80 Вт·ч/кг); высокая надежность и живучесть, за счет применения восстановительных «формовочных» циклов. Контроль уровня заряда и разряда батареи определяется сигналами датчиков давления, что обусловлено особенностью работы и конструкцией НВ аккумуляторов. Суммарная безотказная работа наработка НВ аккумуляторов

ПАО «Сатурн», ведущего производителя аккумуляторов, уже превысила 3500 лет.

На данный момент все более широкое внедрение получают литий-ионные батареи (ЛИ), которые превосходят НВ аккумуляторы по массогабаритным и энергетическим показателям.

Первая в России литий-ионная АБ 6ЛИ-25 производства ПАО «Сатурн» (г. Краснодар) была установлена на борту КА «Глонасс-М» № 27 (25.12.2008 г.). Первой штатной отечественной литий-ионной аккумуляторной батареей в составе СЭП низкоорбитального спутника стала 4ЛИ-20, её эксплуатация началась в конце 2013 г.

Литий-ионные аккумуляторы имеют ряд важных преимуществ перед никель-водородными:

- более высокие удельно-массовые характеристики – около 120 Вт·ч/кг (70-80 Вт·ч/кг у никель-водородных) с перспективой дальнейшего увеличения в новых модификациях аккумуляторов большой емкости;
- высокий энергетический КПД (около 95%);
- чрезвычайно малый саморазряд при хранении в заряженном состоянии;
- напряжение, почти вдвое превышающее напряжение никель-водородных аккумуляторов.

Известны низкоорбитальные КА с Li-ion аккумуляторными батареями: ими являются спутники Calipso (запуск 28.04.06, срок службы 7 лет), SMOS (запуск 02.11.09, срок службы 7 лет), Jason 3 (запуск 17.01.2016, срок службы более 7 лет), Аист-2Д (запуск 28.04..2016, срок службы более 3 года), спутники Proba-1 (запуск 22.10.01, срок службы 1 год), Nanosat-1 (запуск 18.12.04, срок службы 3 года), Sentinel-1В (запуск 26.04.16, срок службы 12 лет), Ломоносов (запуск 28.04.16, срок службы 5 лет) и др.

3. Энергопреобразующая аппаратура (ЭПА), составляющая основу при построении комплексов автоматики и стабилизации (КАС). Требования к ЭПА КАС обусловлено как источниками энергии, так и характером нагрузки. На

борту КА используется постоянное напряжение, поэтому в основном все силовые преобразователи строятся по DC-DC структуре. Также были проведены попытки применить сеть переменного тока на борту КА (400 Гц и выше) для повышения энергоэффективности СЭС, за счет уменьшения составляющих модулей, а также массы кабельной сети. Расчеты показывают, что данный переход может улучшить энергетические показатели СЭС в части снижения потерь на передачу энергии по проводникам (порядка 20%). Но такой переход предъявляет дополнительные требования к качеству формирующегося бортового напряжения КА строго синусоидальной формы, а также компенсацию реактивной мощности, что значительно усложняет конструкцию ЭПА.

На сегодняшний момент подавляющее большинство КАС СЭС КА (порядка 95%) строится на постоянном токе.

4. Кабельная сеть, объединяющая в единую систему другие составляющие СЭС. В современном КА длина кабельной сети может составлять сотни метров, что негативно сказывается на качестве выходных характеристик СЭС, поскольку дополнительно возникают паразитные емкостно-индуктивные связи, которые важно учитывать инженеру-разработчику КА.

В зависимости от задач, а также обеспечения энергией требуемых нагрузок (одной и более) применяются различные структурные схемы построения СЭС. Современные СЭС КА зачастую строятся на основе нескольких структурных схем, применение которых зависит от конкретной задачи и требуемых параметров проектируемой системы.

На рисунке 1.32 изображены основные структурные схемы СЭС КА применяемые в отечественных СЭС. На рисунке СБ – солнечная батарея, Н – нагрузка, АБ – аккумуляторная батарея, ЗУ – зарядное устройство, РУ – разрядное устройство, РН – регулятор напряжения СБ, СН – стабилизатор напряжения, КАС – комплекс автоматики и стабилизации.

Структурная схема с общими шинами СБ-АБ-Н (рисунок 1.32а) использовалась в основном в СЭС первого поколения, при начальном этапе использо-

вании СЭС. В данной СЭС напряжение на общей шине Н и СБ определяется напряжением АБ, что приводит к работе СБ в неоптимальном режиме. Также ухудшаются характеристики АБ (вследствие, повышенного циклирования). Подобная СЭС сегодня может использоваться в СЭС КА типа CubeSAT, в которых минимизирует массогабаритные показатели и служащих для выполнения одной-двух функций, со сроком активного существования, не превышающего один-два месяца.

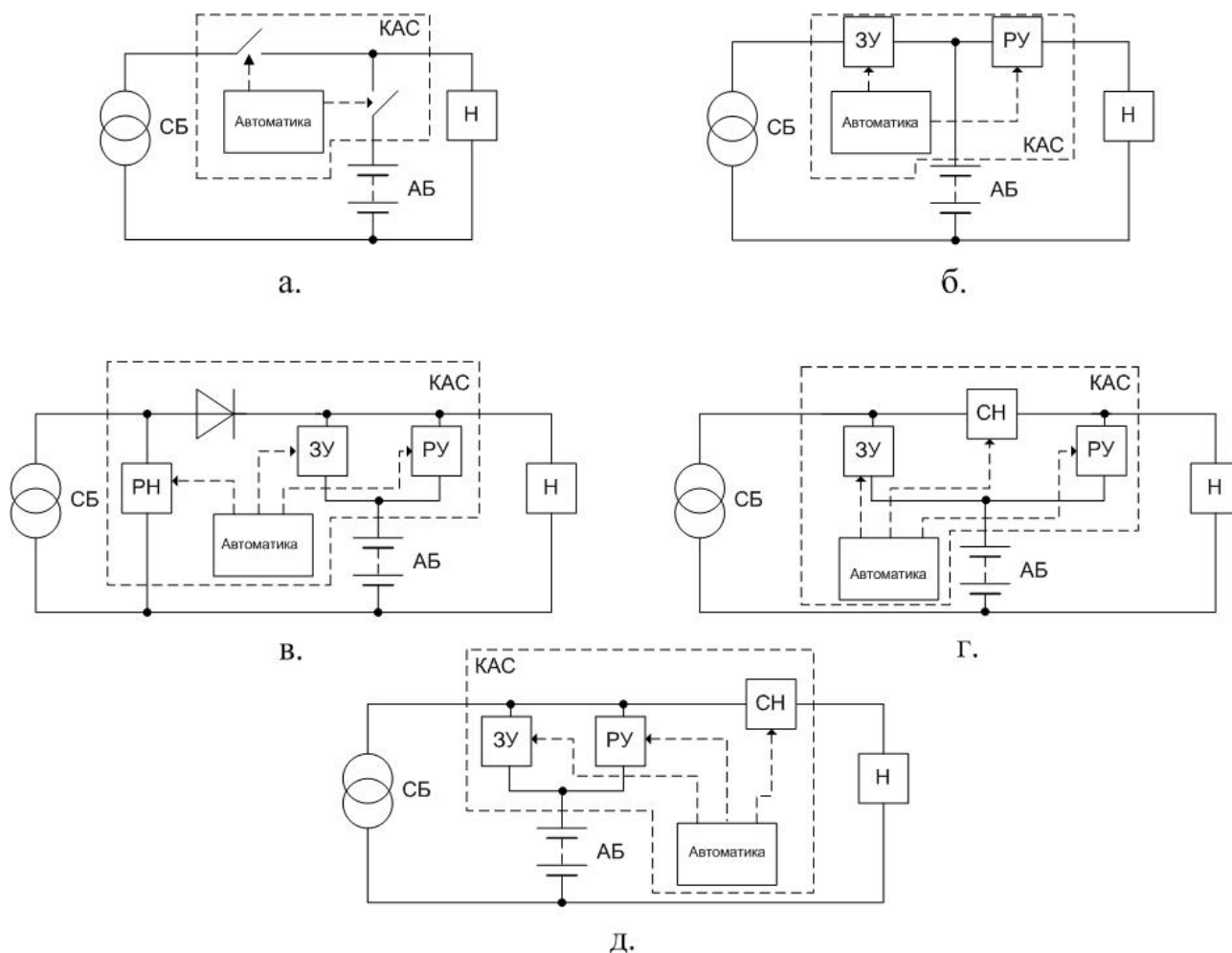


Рисунок 1.32 – Структуры СЭС космических аппаратов

Развитие данной СЭС привело к появлению последовательной структуры (рисунок 1.32б). В данной СЭС энергия СБ преобразуется в требуемое для нагрузки путем двух преобразований (ЗУ-РУ), что снижает ее энергоэффективность. Также подобная структура не обеспечивает оптимальное использование

мощности СБ, по причине того, что ток заряда АБ, в данной системе, получается по остаточному принципу (в данном случае, ток заряда АБ – это разница между током СБ и тока нагрузки), поэтому ее возможно использовать только на КА с резкопеременными графиками нагрузки и широкими теневыми участками (режим минимальной нагрузки должен совпадать с нахождением на выходе КА из «тени» в момент заряда АБ от СБ).

Для более гибкого и эффективного регулирования энергопотоками в СЭС КА применяется параллельная СЭС (рисунок 1.32в) с отдельными силовыми шинами СБ, АБ, Н, позволяющая согласовать режимы источников энергии и нагрузки, что одновременно как повышает энергоэффективность СЭС, так и понижает ее массу и увеличивает ресурс КА. Дополнительно в СЭС вводится РН, который позволяет регулировать энергию СБ для нагрузки Н. Недостатком такой системы является связь (посредством диода) силовых шин СБ и нагрузки Н, а также отсутствие возможности регулировать напряжение СБ в оптимальной рабочей точке при изменении условий эксплуатации. Достоинство данной структуры СЭС возможность применения индивидуальных разрядно-зарядных циклов для каждой АБ. Современные СЭС КА обычно используют в своем составе две и более АБ, что позволяет значительно повысить живучесть КА в случае ошибочной работы одной из АБ, а также проводить операции по их технологическому обслуживанию.

Дальнейшее развитие СЭС КА привело к появлению параллельно-последовательной структуры (рисунок 1.32г). В данной структуре отсутствует регулятор напряжения РН, но в состав введен стабилизатор нагрузки СН. В отличие от параллельной структуры здесь полностью разделены между собой силовые шины СБ, АБ и Н, что дает возможность регулировать напряжение СБ в оптимальной рабочей точке во всех режимах работы. Благодаря этому, СЭС становится полностью управляемой, появляется возможность применения экстремального регулятора мощности (ЭРМ), который обеспечивает максимальный отбор мощности от первичного источника СБ, что повышает энергоэффек-

тивность всей СЭС КА. Недостатком такой структуры являются дополнительные потери в преобразователе СН при работе от СБ. Но именно такая структура дает возможность управлять работой СЭС по любому алгоритму.

Одновременно с этим свое применение нашла и параллельная структура СЭС с стабилизатором напряжения (рисунок 1.32*d*). Эта структура является производной от параллельно-последовательной структуры. Различие этих структур выражается в том, что выход РУ подключается не на выходную шину нагрузки Н, а на входную шину СБ. Это в свою очередь увеличивает величину потерь, поскольку энергия от АБ передаваемую в нагрузку Н передается посредством двух преобразователей (РУ и СН). С другой же стороны подобный подход обеспечивает более качественные выходные параметры СЭС, поскольку в любой момент времени непосредственно на нагрузку Н работает только преобразователь СН (в отличие от параллельно-последовательной структуры, где энергию нагрузки обеспечивают два преобразователя СН и РУ, что приводит к появлению переходных процессов в момент смены типа преобразования).

Основными отечественными разработчиками подобных СЭС КА в настоящее время являются АО «ИСС» (г. Железногорск), АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара), АО «НПО Лавочкина» (г. Химки), АО «КБ «Арсенал» (г. Санкт-Петербург) и др.

Данные предприятия имеют полный цикл разработки, изготовления и отладки всех систем КА. Основными же поставщиками КАС для СЭС КА в России являются АО «ИСС», АО «НПЦ «Полюс», АО «АВЭКС» и др. Так на низкоорбитальных КА производства АО «РКЦ «Прогресс» (Ресурс-П, Ресурс-ДК) применяется параллельно-последовательная структура СЭС с КАС производства АО «НПЦ «Полюс», с возможностью экстремального регулирования мощности (ЭРМ) СБ. Также широко применяется параллельная структура со стабилизацией выходного напряжения (на КА Глонасс-К и Глонасс-М).

В зарубежных разработках в основном нашла применение параллельная структура СЭС и параллельная структура со стабилизацией выходного напря-

жения. Ведущим производителем систем подобного рода являются Thales Alenia Space (Франция-Италия), EADS Astrium (Франция-Германия), Boeing (США), Lockheed Martin Space Systems (США) и др.

Большинство современных КАС СЭС КА можно разделить на высоковольтные (от 60 В) и низковольтные (менее 60 В). На КА большой мощности (свыше 10 кВт) наблюдается тенденция к переходу на высоковольтные шины питания. Применение такой шины в составе СЭС КА позволяет снизить массогабаритные показатели и повысить энергетические показатели СЭС в целом. Так при мощности нагрузки 10 кВт применение 100 В шины позволяет снизить потери на проводниках кабельной сети КА примерно в 4 раза в сравнении с шиной питания 30 В, по причине меньших протекающих токов.

Но одновременно с этим важно понимать, что применение высоковольтной шины на борту КА предъявляет особые требования к качеству изоляции этих систем, так как наличие изоляционных дефектов может привести к возникновению дуговых и коронных разрядов на силовых шинах. Также особые требования предъявляются и к электронным компонентам (транзисторы, конденсаторы и др.).

Контрольные вопросы и задачи

1. Какие источники электроэнергии исторически появились первыми?
2. В чём преимущество систем передачи переменного тока перед системами передачи постоянного тока?
3. Чем силовая электроника отличается от информационной?
4. Приведите примеры устройств, осуществляющих преобразование параметров электрической энергии.
5. Приведите примеры устройств силовой и информационной электроники в составе современных радиоэлектронных систем.
6. С помощью каких полупроводниковых приборов возможно осуществление преобразования параметров электрической энергии?

7. Какие источники электроэнергии называют первичными, а какие – вторичными?

8. Какие требования предъявляют к современным устройствам и системам электропитания?

9. Приведите примеры использования альтернативных источников электроэнергии.

10. Приведите структуру и поясните принцип функционирования системы электроснабжения современного пассажирского самолета на примере SSJ-100.

Список литературы

1. Розанов Ю.А. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

2. Мураев В.Е. От переменного к постоянному // Электрическое питание. – 2004. – № 4. – С. 10-14.

3. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры / О.К. Березин, В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов и др.; под ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 504 с.

4. ГОСТ 52907-2008. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008.

5. Системы электроснабжения летательных аппаратов / Под ред. С.П. Халютин. – М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010. – 427 с.

6. Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы / Богомяков А.А., Голов Н.А., Евсеев Ю.А. и др.; под ред. Ковалева Ф.И. и Усачева В.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 247 с.

7. Chappell P. Introduction to Power Electronics. – London: Artech House, 2014. – 200 p.

8. Dokic B., Blanusa B. Power Electronics. Converters and Regulators. – NY: Springer, 2015. – 599 p.

9. Стрелков В.Ф. Электротехнические комплексы радиолокационных станций: дис. ...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Стрелков Владимир Федорович. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 316 с.

10. Апасов В.И. Разработка и исследование комбинированного понижающе-повышающего преобразователя для системы электроснабжения автоматического космического аппарата: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.12 / Апасов Владимир Иванович. – Томск: ТУСУР, 2018. – 160 с.