

НЕИСПРАВНОСТИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ: ПРИЧИНЫ, ВЫЯВЛЕНИЕ, РЕМОНТ

Е.Д. Челноков

И.Д. Духин

Д.А. Стахов

jenek-elets@mail.ru

duhin.02@mail.ru

dima.I2002@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Электронная аппаратура имеет свойство выходить из строя и работать неисправно, однако не всегда стоит заменять ее новой, исправной электроникой, поскольку это не всегда целесообразно и экономически выгодно. Нередки случаи, когда альтернативы просто нет на рынке в силу сложности изготовления аппаратуры и логистики, а возможность диагностировать поломку и отремонтировать неисправность часто не занимает много времени и средств. В работе приведены причины, из-за которых могут возникать повреждения, их проявление на работе электроники, конструкторские решения, предотвращающие дефекты от конкретных факторов окружающей среды, методы диагностики и ремонт поломок.

Ключевые слова

Электроника, микроэлектроника, радиотехника, печатные платы, термоэлектрическое разрушение, диагностика, методы устранения неисправностей, воздействие факторов на аппаратуру

Поступила в редакцию 02.02.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. В данной публикации рассмотрены типовые неисправности электронных устройств, причины их возникновения, способы диагностирования, и устранение неисправностей, то есть ремонт электроники. Не будут рассмотрены неисправности, связанные с некачественным изготовлением устройства, проявляющийся в самом начале жизненного цикла объекта, а также случаи неисправностей на программном уровне.

Неисправность — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической документацией. (ГОСТ 13377–75).

Известны следующие виды неисправностей электроники:

- обрыв электрической цепи;
- выход из строя электронного компонента;
- значительное увеличение сопротивления;
- значительное уменьшение сопротивления;
- короткое замыкание.

Неисправности могут иметь как временный характер, проявляющийся при определенных условиях внешней среды, так и постоянный, возникающий после необратимых изменений структуры устройства.

Основная причина появления неисправностей — это эксплуатация электроники, не соответствующая нормативно-технической документации [1]. Однако на появлении неисправности жизненный цикл устройства заканчивается далеко не всегда, поскольку существует множество методов их обнаружения и исправления. Ниже приведены причины возникновения поломок устройства, механизмы их влияния, способы их нивелирования, а также методы выявления тех или иных неисправностей и их ремонт.

В настоящее время выделяют несколько основных факторов в электронике:

- 1) механические повреждения;
- 2) термические воздействия;
- 3) электрические воздействия;
- 4) химические повреждения;
- 5) специфические неисправности.

Все эти повреждения и воздействия в той или иной степени играют роль в эксплуатационной жизни каждого устройства. Освоение новых производственно-технологических процессов по поиску и устранению дефектов привело к появлению программ и методик, которые являются основными организационно-методическими документами при испытаниях, содержание которых должны обеспечить объективную оценку их качества и которые могут оформляться или одним документом, или отдельно. Программа и методы проведения испытаний определяются конструкцией, назначением и условиями эксплуатации электронной аппаратуры.

Механические повреждения. Основными факторами возникновения механических повреждений являются: вибрации, удары и линейное ускорение. Вибрации вызывают деградационные изменения печатной платы устройства усталостного характера, что через некоторое время может привести к нарушению электрических контактов. Из-за ударов и линейных ускорений возможно физическое разрушение монтируемых электронных компонентов, а также их частичное или полное отсоединение от печатной платы; сколы и трещины печатной платы, а следовательно, и обрыв проводника.

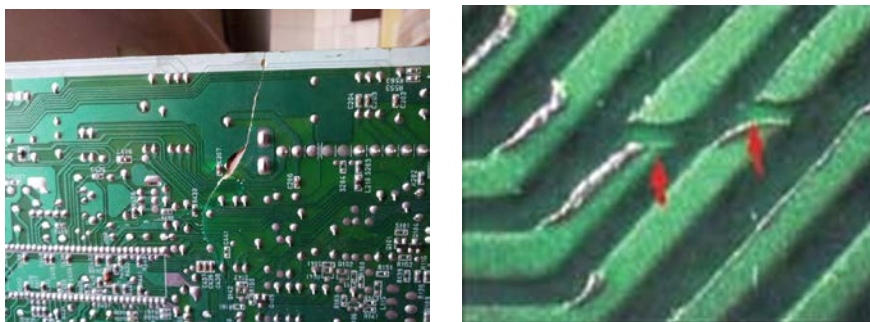


Рис. 1. Трещина печатной платы / повреждение проводника печатной платы

Механическим воздействием подвержены многие группы электронной аппаратуры: возимая, носимая, морская, бортовая, космическая, а также стационарная в момент ее транспортировки. Поэтому на этапе проектировки применяют следующие методы предотвращения влияния механических факторов, а именно уменьшение суммарной массы установленных электронных компонентов на печатную плату, а также изменение способа их монтажа, замена многих компонентов на более надежные интегральные схемы, повышение механической прочности и жесткости, заливка компаундами, увеличение опорных площадей и др. Большая часть механических поломок происходит на месте разъемов, потому что достаточно небольшого механического воздействия для повреждения разъема, если в нем находится штекер [2].

Как правило, для диагностирования механических повреждений будет достаточно внешнего и внутреннего визуального осмотра устройства и «прозвонка» его контактов.

Для ремонта потребуется замена поврежденных электронных компонентов, восстановление контактов. При сколах и трещинах на многослойной печатной плате сложность ремонта многократно возрастает из-за отсутствия доступа к внутренним слоям платы, как правило техника с такими дефектами восстановлению не подлежит.

Термические воздействия. Для электроники негативным фактором может служить как повышенная, так и пониженная температура. Важно, чтобы электроника работала в температурном диапазоне 5...40 °С. Сильные изменения температуры могут привести к повреждению проводящего рисунка из-за отличного температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) материала проводника от ТКЛР материала подложки печатной платы.

Высокая температура вызывает уменьшение электропроводности и нагрузочной способности проводников по току, изменению вольт-амперных характеристик диодов и транзисторов, что приводит к нарушению рабочих характеристик схемы и ее некорректной работе. Повышение температуры уменьшает сопротивление полупроводников, а следовательно, согласно закону мощности электрического тока, увеличивается выделяемая тепловая энергия, из-за невозможности достаточно быстро рассеивать ее в окружающую среду полупроводниковые элементы сильнее подвергаются деградиационным процессам, а также термическому разрушению (рис. 2) при достижении критической температуры ($T_{кр} = 200$ °С для кремниевых полупроводников; $T_{кр} = 100$ °С для приборов на основе германия).

Высокая температура опасна и для аккумуляторов, постоянная повышенная температура сильно повышает износ гальванических элементов и сокращает срок службы. В худшем случае, при превышении максимально допустимой температуры может начаться цепная реакция металлизации, так в случае литий-

ионный аккумулятора при температуре 105 °С он начинает вздуваться, а при дальнейшем нагреве может воспламениться и даже взорваться (рис. 3).

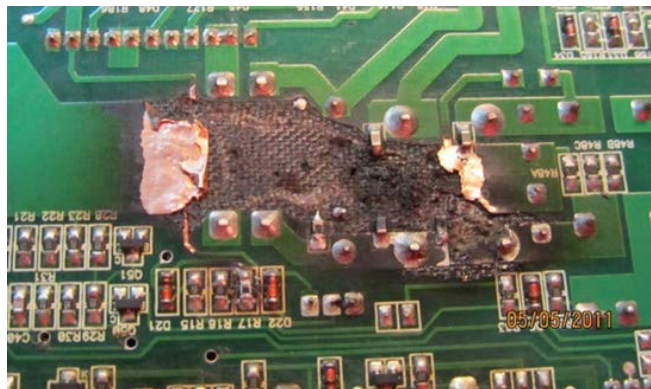


Рис. 2. Термическое разрушение участка печатной платы



Рис. 3. Вздутие аккумулятора

Низкая температура способствует ухудшению диэлектрических свойств благодаря конденсации воды, деформации (рис. 4) и хрупкости устройства. Мобильные устройства начинают работать нестабильно в условиях холода, проявляется уменьшение производительности и произвольные выключения из-за того, что у гальванических элементов заметно сокращается емкость и выходное напряжение, недостаточное для корректной работы электроники.

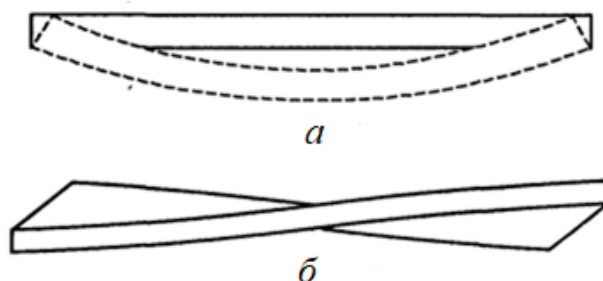


Рис. 4. Виды деформаций печатных плат:
a — изгиб; *б* — скручивание

Для предотвращения термического воздействия на электронику увеличивают ширину и толщину проводников, выбирают материал основания печатной платы с ТКЛР, близким к ТКЛР меди, оснащают высокомошные элементы пассивным или активным охлаждением, в качестве которых могут выступать радиаторы и кулеры, а также добавляют системы автоматического отключения, защищающие сильно греющиеся модули от перегрева. Для того чтобы маломощное устройство работало в условиях холода, его следует теплоизолировать от окружающей среды.

Неисправности работы техники, связанные с изменениями температуры, в большинстве случаев имеют временный характер и исчезают в условиях номинальной температуры. При тепловом разрушении мощных элементов следует провести осмотр на наличие повреждение компонентов, расположенных рядом, контактных площадок и проводников. Провести замену вышедших из строя компонентов.

Электрические воздействия. Электрический ток, без которого электроника не может работать, также является источником разных неисправностей устройства. Так при постоянном воздействии сильных электрических полей, порождаемых высоким напряжением, постепенно разрушается структура диэлектрика, что способствует его электрическому пробое.

Большой ток способствует деградации полупроводников. Частой причиной возникновения неисправности может является короткое замыкание, которое происходит от случайного контакта двух проводников, например из-за попадания на них воды.

Резкие скачки напряжения, которые могут произойти из-за сбоев в работе цепи питания, электрических пробоев от снижения диэлектрических свойств непроводящих материалов или статического электричества, вызванного контактом электронных компонентов с пылью или другими инородными телами, а также неправильная полярность подключения к сети питания могут привести к выходу из строя полупроводниковых элементов и электролитических конденсаторов. Для защиты от электрического пробоя на этапе проектировки увеличивают расстояние между проводниками с большой разницей по напряжению и используют материал подложки с высокими диэлектрическими свойствами, добавляются элементы и каскады, сглаживающие напряжение на полупроводниках, плавкие предохранители, ограничивающие максимальный проходящий в схеме ток, и защита от неправильной полярности. Устройства герметизируют или устанавливают в помещения с очистительными сооружениями с целью защиты их от контакта с пылью и используют покрытия от поломок, связанных с попаданием влаги.

Обнаружить неисправности, связанные с электрическим пробоем визуальным осмотром получить далеко не всегда, в таких случаях эффективными методами будут прозвонка, модуляция и сравнение с рабочим экземпляром.

Для починки потребуется замена вышедших из строя электронных компонентов, иногда печатной платы, реже всей электронной ячейки.

Химические повреждения. Помимо вышеописанных воздействий на электронику также влияет окружающая среда, которая может оказывать сильное химическое воздействие. Чаще всего под таким воздействием понимается химическая или электрохимическая коррозия проводников или изоляции (рис. 5). В первую очередь ее может вызывать влажность окружающей среды.

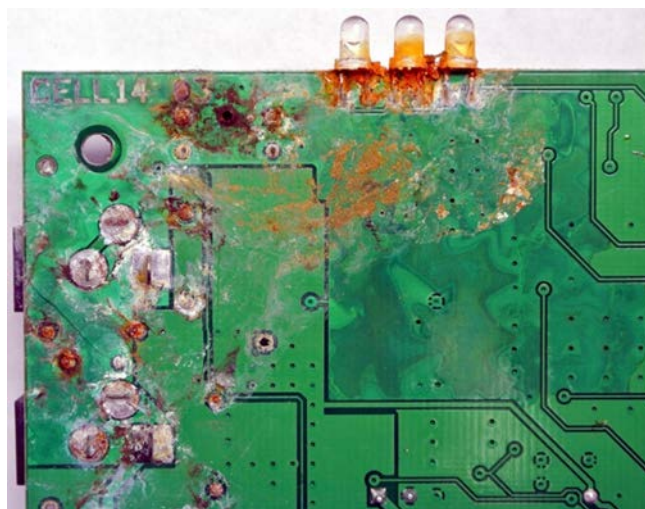


Рис. 5. Следы коррозии на печатной плате

Помимо коррозии проводников и контактных площадок и повреждения невлагодостойких лакокрасочных покрытий, повышенная влажность также уменьшает поверхностное сопротивление материала ПП, уменьшает сопротивление изоляции, увеличивает токи утечки, а также уменьшает адгезию проводников к диэлектрику, что по итогу может привести к отслоению проводящего рисунка [3].

В итоге с течением времени влияние влажности на не защищенное электрооборудование может привести к выходу этого оборудования из строя из-за электрического пробоя между проводниками или, наоборот, из-за разрыва цепи вследствие коррозии или отслаивания проводника. Если известно, что оборудование будет использоваться в средах с повышенной влажностью (например, в тропиках или на морских судах), для защиты свойств материала ПП изначально в производстве используют влагостойкие (характеризующиеся способностью поглощать водяные пары из воздуха) и водостойкие (характеризующиеся способностью материала впитывать и удерживать в порах и капиллярах воду) материалы. Для защиты проводников же используют влагостойкие лакокрасочные покрытия или вовсе полностью герметизируют ячейки.

Помимо влаги химическое воздействие может оказывать соляной туман (характерно для морской электроники) и другие химически активные среды. Защититься от подобных воздействий можно с помощью выбора правильного покрытия, химически устойчивого к данному воздействию [4]. Что касается самих покрытий, то основные из них и их свойства перечислены ниже.

1. *Акриловые покрытия* — это покрытия общего применения, они просты в нанесении, обладают хорошей ремонтпригодностью и низкой стоимостью, высокой влагостойкостью и эластичностью, но при этом требуют много растворителя и плохо защищают от химически активных веществ.

2. *Уретановые покрытия* используются, когда нужна хорошая защита от влаги и химически активных веществ. Обладают высокой эластичностью, отличной химической стойкостью к растворителям и устойчивостью к механическим воздействиям (кроме вибраций), но долго полимеризуются и тяжело удаляются, из чего следует низкая ремонтпригодность.

3. *Силиконовые покрытия* используются, когда нужна высокотемпературная защита. Помимо очень высокой температурной стойкости, обладают высокой эластичностью, химической стойкостью и ремонтпригодностью, но обладают низкой адгезией и стойкостью к истиранию, высокой стоимостью, большой необходимой толщиной нанесения.

4. *Эпоксидные покрытия* обеспечивают отличную механическую защиту, а также температурную и химическую стойкость, хорошие диэлектрические свойства, простоту в нанесении, но долго полимеризуются и тяжело удаляются, а также обладают высоким удельным весом.

5. *Фторполимерные покрытия*, также как и уретановые, отлично защищают от влаги и химических воздействий и обладают хорошими диэлектрическими свойствами, но не дают хорошей механической защиты и обладают высокой стоимостью.

Для максимальной эффективности покрытие должно быть сплошным и не иметь в себе полостей, иметь достаточную толщину и равномерность покрытия. при нарушении сплошности покрытия или при попадании влаги или других активных веществ в полости во время нанесения, может произойти местная коррозия, что впоследствии приводит к поломке.

Соответственно для обеспечения надлежащей защиты необходимо выбрать способ нанесения покрытия, который позволит избавиться от ненужных дефектов. На выбор метода также влияют материал покрытия и характер поверхности, которую необходимо покрыть [4]. Возможные способы и свойства покрытия после их применения можно увидеть в таблице.

Таким образом, химические поломки электрооборудования могут возникать из-за производственного брака (попадание влаги под защитное покрытие и т. п.), из-за использования оборудования в средах, под которые оно не при-

способлено (разъедание соляным туманом химически не устойчивого к нему покрытия и последующая коррозия проводника) или из-за старения покрытия и утратой им необходимых защитных свойств. Выявить подобный тип поломок довольно легко, ведь коррозия сопровождается образованием оксидов и других веществ, которых можно обнаружить визуально на проводнике. Для восстановления работоспособности оборудования требуется очистить проводник от продуктов коррозии, восстановить утерянный контакт между проводниками или сломанный компонент и впоследствии обновить защитное покрытие.

Сравнение свойств различных способов покрытия

Свойство	Способ покрытия				
	Кисть	Погружение	Напыление	Селективное	Вакуумное
Улучшение адгезионных показателей	Никогда	Никогда	Редко	Никогда	Общее
Эффективность переноса	Умеренная	Низкая	Низкая	Отличная	Умеренная
Контроль толщины	Низкий	Низкий	Умеренный	Хороший	Отличный
Линейность толщины	Низкая	Низкая	Умеренная	Умеренная	Отличная
Образование перемычек	Да	Да	Да	Да	Нет
Маскирование	Требуется	Требуется	Требуется	Не требуется	Требуется
Покрытие краев / точечное	Низкое	Низкое	Низкое	Низкое	Отличное
Пустоты / отверстия	Возможны	Возможны	Возможны	Маловероятны	Нет

Специфические неисправности. Иногда неисправности могут происходить из-за весьма неожиданных факторов. Так, плесневые грибы, выросшие в устройстве, могут привести к уменьшению поверхностного и объемного сопротивления, к замыканию, к разрушению защитных покрытий, к коррозии, к нарушению адгезии и т. д. (рис. 6). Чтобы избежать попадания в электронику спор грибов еще на стадии производства приходится следить за применением горячих операций на начальных стадиях производства, за хорошей аэрацией помещения и за чистотой рук рабочих. Также возможно применение материалов с особыми свойствами, к которым грибы не смогут приспособиться. В быту подобные неполадки легко выявляются визуальным осмотром устройства, а недопускаются регулярной очисткой.

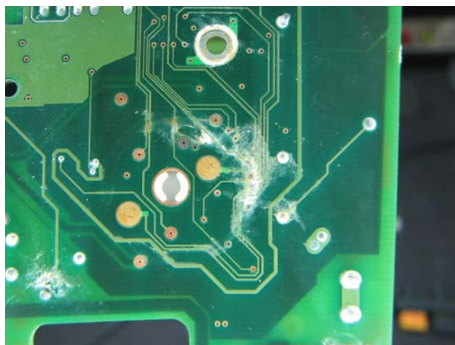


Рис. 6. Плесень на печатной плате

Также отдельно можно выделить пыль, которая совместно с влагой может привести к химической и электрохимической коррозии, а также к увеличению емкости проводников из-за увеличения диэлектрической проницаемости среды. Не допустить неисправностей можно регулярной очисткой или герметизацией ячейки [3].

Отдельным пунктом стоит выделить старение, ведь даже при условии идеальных условий эксплуатации электрооборудование не может работать вечно по множеству причин. К примеру, электролитические конденсаторы имеют свойство высыхать, у ламп может выгореть эмиссия, у реле — сгореть контакты и т. д. Полупроводниковые излучатели (светодиоды и лазеры) тоже имеют свой механизм деградации, основанный на уменьшении квантового выхода материала активной области излучателя [5].

Методы поиска и устранения неисправностей. Даже после установления причины поломки, не всегда легко можно обнаружить в какой именно части схемы произошел разрыв контакта или какой именно компонент электрической цепи вышел из строя. Ниже перечислены методы, с помощью которых можно если и не найти место поломки, то хотя бы сузить круг поиска.

1. *Выяснение истории появления неисправностей.* Этот метод часто может помочь найти проблему, если устройство сломалось из-за каких-либо явных внешних факторов. Необходимо вспомнить, были ли какие-то значительные механические воздействия на оборудования, не было ли большого повышения или понижения температуры и т.д. Метод позволяет найти проблему быстро без доступа к документации, но при этом требует подтверждения другими методами.

2. *Внешний осмотр.* Тоже немаловажный и доступный метод. Позволяет выявить неработающий компонент по тепловым следам, обнаружить трещины, загрязнения и коррозию. Помимо этого, если устройство вовсе не работало изначально, то с помощью осмотра можно выявить причины брака, такие как неправильное расположение компонентов, не качественные паяные соединения, дефекты проводников вроде трещин и т. п.

3. *Метод рентгеновского осмотра.* Позволяет увидеть скрытые дефекты устройства с высокой точностью их локализации. Особенно полезен при возникновении неисправностей у компонентов, имеющих мелкий шаг выводов. К таким компонентам можно отнести микросхемы в BGA корпусах [6].

4. *«Прозвонка».* Применение этого метода уже требует специального оборудования, например, мультиметра. С помощью него можно проверить проводники на целостность. Соответственно если есть подозрения на нарушения контакта, следует воспользоваться именно этим методом, так как он позволяет точно локализовать неисправность. Также есть похожий, но более точный метод, подразумевающий измерение сопротивления между «контрольными точками». Это хоть и требует знания сопротивлений в исправном оборудовании, но зато позволит помимо разрыва контакта или замыкания обнаружить вышедшие из строя компоненты.

5. *Сравнение с исправным устройством.* В этом методе сравниваются различные характеристики заведомо исправного и неисправного устройства. По отличиям электрических характеристик и внешнего вида можно судить о месте и причине неисправности.

6. *Моделирование.* Хоть для этого метода и нужна достаточно высокая квалификация и умение работать в сторонних программах, моделирование может как помочь выдвинуть гипотезу о неисправности, так и дать необходимые данные для других методов диагностики (например — токи и напряжения между каскадами). Похож на предыдущий метод, но может дать больше информации.

7. *Наблюдение прохождения сигналов по каскадам.* Требуется специальное оборудование (осциллографа) и достаточной квалификации, но позволит выявить и локализовать сложные поломки.

8. *Временная модификация схемы.* Позволяет как найти неисправность, так и подтвердить или опровергнуть гипотезы, выдвинутые с помощью других методов. Этот метод подразумевает включения новых связей или временный обрыв старых, выпаивание и впаивание компонентов. Также можно гипотетически неисправный блок заменить на заведомо исправный, что позволит также локализовать проблему.

9. *Провоцирующее воздействие.* Этот метод хорошо подходит для определения пропадающих неисправностей. Подразумевает искусственное повышение/понижение температуры, оказание механических воздействий и изменение других внешних факторов, которые гипотетически могут быть причиной поломок.

10. *Выполнение тестовых программ.* Не всегда применимый на практике метод, ведь для него необходимо как наличие этих самых программ, так и целое ядро устройства, необходимое для их выполнения. Тем не менее в случае, когда этот метод удастся применить, получается в кратчайшие сроки обнаружить неисправность.

11. *Пошаговое исполнение команд.* Этот метод является самым трудоемким и требует крайне высокой квалификации, но без него невозможно устранить поломки внутри цифровых компонентов, таких как процессоры. С помощью специального оборудования систему вводят в режим пошагового исполнения и после каждого шага проверяют состояние всех шин, по полученным данным определяя неисправность [7].

12. *Бесконтактный тепловой метод контроля.* Метод, позволяющий оперативно обнаружить неисправность путем просмотра устройства с помощью тепловизора, на экране которого будет видна аномалия в термограмме, свидетельствующая о дефектном узле. Большим преимуществом бесконтактного теплового контроля является эффективное нахождение компонентов со скрытыми неисправностями [8].

Выводы. В работе проведено исследование основных причин возникновения поломок в электрооборудовании, способы их выявления и устранения, также приведены основные способы диагностики неисправного устройства. По итогу можно сделать выводы о том, что поломка оборудования может происходить при совершенно разных обстоятельствах, и в некоторых случаях можно восстановить его работоспособность, даже не обладая глубокими знаниями, высокой квалификацией или технической документацией на устройство, тогда как других ситуациях, напротив, без специального оборудования починка невозможна или нецелесообразна вследствие больших денежных или временных затрат. Несмотря на то, что техника с каждым годом становится все сложнее, тем самым делая процесс починки более затруднительным, многие старые или простые электронные устройства все еще можно отремонтировать, имея опыт использования паяльника и базовые знания об электронике. Тем не менее, нужно понимать, что современную продвинутую технику сложно починить без соответствующих знаний, и иногда стоит отдать ее квалифицированным специалистам или вовсе заменить новой.

Литература

- [1] *Классификация неисправностей.* URL: <https://helpiks.org/8-95905.html?ysclid=lbgy2hdp2q735672175> (дата обращения 02.02.2023).
- [2] *Типовые неисправности электронных устройств.* URL: <http://www.mkuznecov.ru/content/tipovye-neispravnosti-elektronnyh-ustroystv.html?ysclid=lbgz0q04jj683523656> (дата обращения 02.02.2023).
- [3] Пирогова Е.В. *Проектирование и технология печатных плат.* Москва, Форум, Инфра-М, 2005.
- [4] *Влагозащита радиоэлектронной аппаратуры.* URL: <https://kit-e.ru/elcomp/vlagozashhita-radioelektronnoj-apparatyury/?ysclid=lbj9og4zlf564214919> (дата обращения 02.02.2023).

- [5] Сидоров В.Г., Шмидт Н.М. Деградационные явления и проблемы надежности полупроводниковых источников излучения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2013, № 2, с. 71–80.
- [6] Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н. *Проектирование коммутационных структур электронных средств*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [7] *Методы поиска и устранения неисправностей. А также причин неработоспособности электронных устройств*.
URL: <http://www.mkuznecov.ru/metodi.html?ysclid=lbgzdn0kjk381999275> (дата обращения 02.02.2023).
- [8] Семенцов С.Г., Гриднев В.Н., Сергеева Н.А. Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 1, с. 3–14.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-1-3-14>

Челноков Евгений Дмитриевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Духин Иван Дмитриевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Стахов Дмитрий Андреевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Резчикова Елена Викентьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Челноков Е.Д., Духин И.Д., Стахов Д.А. Неисправности в электронике: причины, выявление, ремонт. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 03 (80).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-3-869>

MALFUNCTIONS IN ELECTRONICS: CAUSES, DETECTION, REPAIR

E.D. Chelnokov

jenek-elets@mail.ru

I.D. Dukhin

duhin.02@mail.ru

D.A. Stakhov

dima.I2002@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Electronic equipment tends to fail and malfunction, but it is not always worth replacing it with new, serviceable electronics, since it is not always advisable and economically profitable. There are often cases when there is simply no alternative on the market due to the complexity of manufacturing and logistics, and the ability to diagnose a breakdown and repair a malfunction often does not take much time and money. The paper presents the reasons for which damage may occur, their manifestation in the operation of electronics, design solutions that prevent defects from specific environmental factors, methods for diagnosing and repairing breakdowns.

Keywords

Electronics, microelectronics, radio engineering, printed circuit boards, damage, thermoelectric destruction, diagnostics, troubleshooting methods, the impact of factors on the equipment

Received 02.02.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] *Klassifikatsiya neispravnostey* [Fault classification]. URL: <https://helpiks.org/8-95905.html?ysclid=lbgy2hdp2q735672175> (accessed 02.02.2023). (In Russ.).
- [2] *Tipovye neispravnosti elektronnykh ustroystv* [Typical faults of electronic devices]. URL: <http://www.mkuznecov.ru/content/tipovye-neispravnosti-elektronnyh-ustroystv.html?ysclid=lbgz0q04jj683523656> (accessed 02.02.2023). (In Russ.).
- [3] Pirogova E.V. *Proektirovanie i tekhnologiya pechatnykh plat* [Design and technology of printed circuit boards]. Moscow, Forum Publ., Infra-M Publ., 2005. (In Russ.).
- [4] *Vlagozashchita radioelektronnoy apparatury* [Moisture protection of radioelectronic equipment]. URL: <https://kit-e.ru/elcomp/vlagozashchita-radioelektronnoj-apparatury/?ysclid=lbj9og4zlf564214919> (accessed 02.02.2023). (In Russ.).
- [5] Sidorov V.G., Shmidt N.M. Degradation phenomena and the problem of semiconductor light emitting sources reliability. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics], 2013, no. 2, pp. 71–80. (In Russ.).
- [6] Gridnev V.N., Gridneva G.N. *Proektirovanie kommutatsionnykh struktur elektronnykh sredstv* [Design of switching structures for electronic devices]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. (In Russ.).
- [7] *Metody poiska i ustraneniya neispravnostey. A takzhe prichin nerabotosposobnosti elektronnykh ustroystv* [Troubleshooting methods. As well as the causes of electronic device inoperability].

URL: <http://www.mkuznecov.ru/metodi.html?ysclid=lbgzdn0kjk381999275> (accessed 02.02.2023). (In Russ.).

- [8] Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Infrared thermography methods of assessing temperature effect on reliability of electronic equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 1, pp. 3–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-1-3-14> (in Russ.).

Chelnokov E.D. — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Dukhin I.D. — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Stakhov D.A. — Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific adviser — Rezhikova E.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Chelnokov E.D., Dukhin I.D., Stakhov D.A. Malfunctions in electronics: causes, detection, repair. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 03 (80). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-3-869> (in Russ.).