

О ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ АВИАНИКИ

А.Сокольский¹, М.Сокольский²

УДК 621.3.019.34,
541.138/.138.3
БАК 05.27.00

Электрохимическая миграция – один из процессов, способных привести к отказам электронной аппаратуры. Существующие методы защиты от нее в некоторых условиях оказываются неэффективными. Такие условия могут создаваться, в частности, при эксплуатации летательных аппаратов. Для существования электрохимической миграции необходимо сочетание нескольких факторов, причем исключение любого из них предотвращает ее возникновение. Анализ показал, что один из этих факторов поддается устранению, а именно – образование электролита на поверхности печатных плат электронных устройств. При штатном хранении и обслуживании авиатехники электролит может образоваться только при конденсации влаги из окружающего воздуха. Для предотвращения конденсации предлагается способ, основанный на добавлении в состав многослойной печатной платы нагревательного слоя с необходимыми элементами автоматического управления нагревом.

В соответствии с ГОСТ 25467-82 электронная аппаратура разделяется на три группы: стационарную, транспортируемую и портативную. Для каждой из групп характерны свои условия эксплуатации, которые определяются климатическими, механическими, биологическими и другими факторами воздействия. Аппаратура должна соответствовать требованиям, предъявляемым стандартом, и обеспечивать необходимый уровень надежности для каждой группы. При эксплуатации высококачественной и надежной аппаратуры, к которой, в частности, относится авионика, очень

дорого обходятся даже единичные отказы, влекущие за собой значительные материальные затраты и опасность гибели людей.

Современные технологии позволяют создать влагозащитные покрытия, способные практически исключить воздействие окружающей среды на поверхность печатной платы. Однако в определенных условиях традиционные способы влагозащиты оказываются недостаточно эффективными.

Продолжающаяся микроминиатюризация электроники уже сегодня привела к тому, что расстояния между проводниками на печатной плате (ПП) уменьшилось до величины порядка десятков микрометров. Между соседними проводниками практически всегда существует

¹ Аспирант МАИ (НИУ), sokol347@gmail.com.

² Доцент МАИ (НИУ), mikky63@yandex.ru.

разность потенциалов, и при таких расстояниях резко увеличивается интенсивность протекания электрохимических процессов на поверхности ПП, приводящих к возникновению и росту дендритов^{*} и образованию оксидов, следствием чего может стать короткое замыкание и выход из строя печатного узла.

Особенно велика вероятность развития этих процессов в условиях солевого тумана, а также при работе в районах с неблагоприятной экологической обстановкой, в первую очередь в атмосфере, загрязненной выбросами промышленных предприятий и транспорта. Однако в условиях, характерных для эксплуатации авиационной техники, дендриты могут образовываться и без участия этих факторов.

Так, эксплуатация летательных аппаратов в странах с влажным субтропическим климатом (например, в Индии) показала недостаточную защищенность авионики от электрокоррозионных и электрохимических процессов в печатных платах, значительно снижающих их физическую надежность. Анализ отказов показал, что они связаны не столько с некачественным нанесением защитного покрытия, что бывает довольно редко, сколько со сложными климатическими условиями эксплуатации электронной аппаратуры на борту летательного аппарата. В результате быстрых и частых смен температуры окружающей среды (от -50 °C на высоте 10 000 м до +60 °C на аэродроме) покрытие деформируется и покрывается микроскопическими трещинами, которые со временем увеличиваются. Высокая влажность способствует конденсации влаги на поверхности ПП, которая, осаждаясь в виде дистиллированной воды, растворяет вещества на поверхности платы, образуя благоприятную среду для возникновения явлений электрокоррозии и электрохимической миграции.

Электрохимическая миграция (ЭХМ) – это сложный электрохимический процесс с множеством возможных механизмов и причин. Однако в подавляющем большинстве случаев она возникает при выполнении трех необходимых условий (рис.1):

- наличии разности потенциалов между близко расположенными печатными проводниками, обусловленной функционированием устройства и/или присутствием в проводниках разнородных металлов, образующих гальваническую пару – например, золота и олова, серебра и никеля;
- присутствию на поверхности ПП атмосферных либо технологических загрязнений, содержащих вещества, способные к диссоциации в воде – соли, щелочи и т.п.;



Рис.1. Необходимые условия для возникновения электрохимической миграции между элементами проводящей структуры печатной платы

- наличии конденсированной влаги на поверхности ПП, которая растворяет вещества из загрязнений, в результате чего получается раствор электролита.

Явление электрохимической миграции заключается в том, что при наличии токопроводящей среды (электролита) и разности потенциалов между проводниками проводник с большим потенциалом (анод) растворяется, отдавая положительно заряженные ионы металла. Ионы направляются к проводнику с меньшим потенциалом (катоде), где восстанавливаются до металлического состояния. Это приводит к тому, что между парами проводников анод-катод образуется тонкая перемычка в виде древовидной рыхлой металлической структуры. В результате ЭХМ за несколько минут могут образоваться кристаллы – дендриты толщиной 2–20 мкм и длиной до

^{*} Дендриты – кристаллические образования, имеющие разветвленную древовидную форму; в данной статье речь идет о дендритах, образованных металлами топологической структуры ПП.

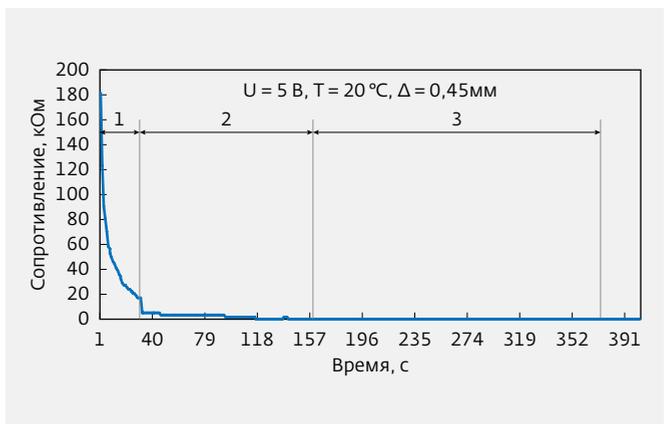
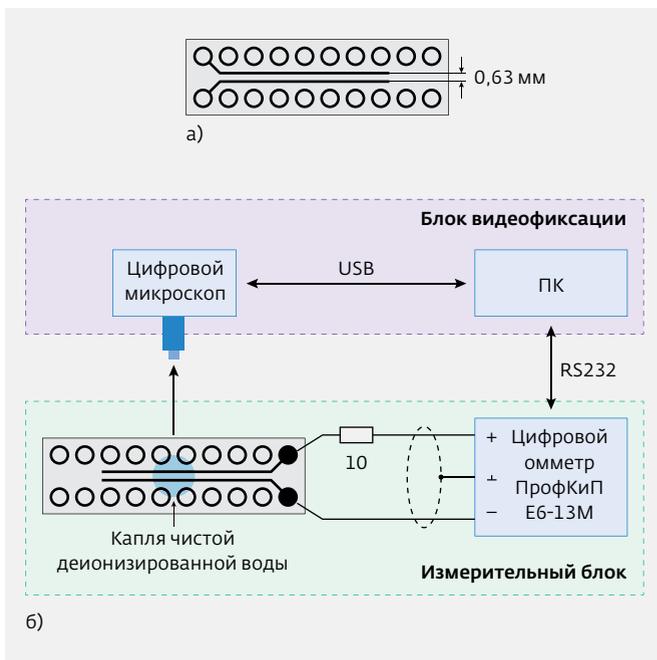


Рис.3. Изменение сопротивления в процессе электрохимической миграции. Этапы развития процесса обозначены стрелками с цифрами 1, 2, 3

Рис.2. Постановка эксперимента: а – тестовая плата; б – экспериментальная установка

12–15 мм. Сопротивление дендритов в этой фазе процесса может составлять 30–50 Ом, что приводит к сбою в работе устройства.

После образования перемычки начинается процесс ее металлизации, в ходе которого она утолщается до 0,1 мм. Со временем металлизация дендритов достигает проводника-анода, что вызывает короткое замыкание и выход устройства из строя.

Для исследования этапов процесса электрохимической миграции разработана и изготовлена плата тест-купона Е по ГОСТ 55693-2013 (рис.2а) и создана экспериментальная

установка, функциональная схема которой представлена на рис.2б.

Для наблюдения за ходом эксперимента использовался цифровой электронный микроскоп DTX 30. Для измерения сопротивления – цифровой омметр ПроКиП Е6-13М. Для предотвращения короткого замыкания при образовании дендритов и их металлизации в цепь установлен резистор на 10 кОм.

Эксперимент проводился с несколькими тестовыми платами при одинаковых условиях: при температуре 40 °С и напряжении между проводниками 5 В. На проводники тестовой платы шприцем наносилась капля деионизированной воды объемом 1 мл и удельным сопротивлением 18,2 МОм·см. Изменение сопротивления между проводниками в ходе развития процессов электрохимической миграции и металлизации дендритов показано на рис.3, развитие структуры одного из дендритов – на рис.4.



Рис.4. Три этапа электрохимической миграции: а – растворение загрязнений и выход ионов меди из проводника; б – рост дендритов; в – металлизация дендритов

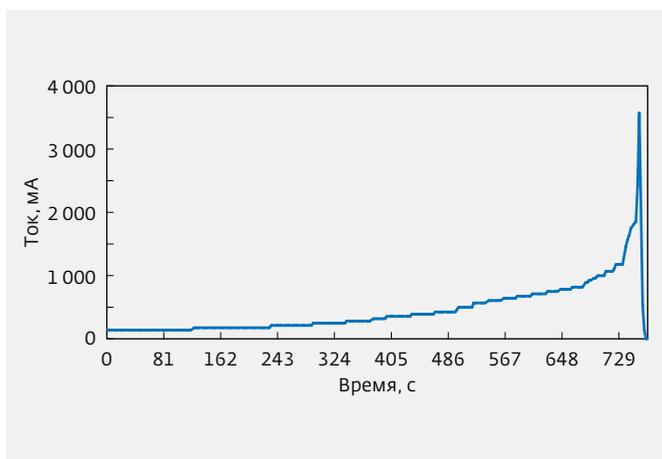


Рис.5. Изменение тока при металлизации дендритов

Анализ полученных результатов позволяет условно разделить процесс электрохимической миграции на три этапа.

На первом этапе (0–29 с) происходит образование ионов меди и восстановление катионов водорода. Сопротивление падает со 180 до 17 кОм; на 29-й с сопротивление резко, в течение 0,3 с, падает до 5 кОм, что свидетельствует о начале образования дендритов.

Второй этап (30–153 с) – рост дендритов и их замыкание. Сопротивление падает с 5 кОм до 30 Ом.

На третьем этапе (154–378 с) происходит металлизация дендритов. Сопротивление падает с 30 до 3 Ом – идет процесс металлизации. При этом ток утечки между проводниками растет, что приводит к повышению температуры в зоне прохождения процесса. Так как объем капли деионизированной воды незначителен, то в течение 5–15 с под воздействием температуры она испарялась, и процесс металлизации прекращался.

При создании условий, когда жидкость не успевает высохнуть, рост металлического мостика между проводниками продолжается до достижения им другого проводника (378–750 с), что приводит к короткому замыканию и обугливанню диэлектрика печатной платы (рис.5).

Таким образом, в условиях данного эксперимента катастрофические последствия наступают примерно на 750 с; к этому времени между проводниками образуется металлическая перемычка из восстановленной меди сопротивлением всего несколько Ом. Однако очевидно, что отказ авионики возникает раньше, в конце второго этапа, когда сопротивление цепи дендритов падает до 30 Ом, что при напряжении 5 В соответствует току утечки в цепи ≈160 мА.

Одним из способов предотвращения явления ЭХМ является тщательная очистка печатных узлов и нанесение конформных покрытий. Ошибки в реализации процесса нанесения могут привести к недоотверждению или

пересушке покрытий, что повлияет на характеристики материала, такие как поверхностное натяжение, тиксотропные свойства и время отверждения, и в конечном итоге может снизить его защитные свойства и долговечность.

Но даже если конформное покрытие нанесено идеально, в процессе эксплуатации возникают дефекты, позволяющие начаться процессу коррозии и электрохимической миграции. Для того чтобы не допустить ЭХМ, необходимо устранить хотя бы один из обязательных факторов, нужных для ее возникновения. Первые

Таблица 1. Результаты измерений при исследовании условий выпадения конденсата при нагреве в интервале 20–50 °С

Время нагрева, с	Температура в камере, °С	Температура ПП, °С	Температура точки росы, °С
0	20	20	18,31
15	22	20,5	20,28
30	24	20,8	22,25
45	26	21	24,23
60	28	21,4	26,2
75	30	22	28,17
90	32	22,5	30,15
105	34	23,5	32,12
120	36	24,9	34,09
135	38	27,4	36,06
150	40	32,3	38,03
165	42	37,1	40,01
180	44	39,8	41,96
195	46	41,8	43,95
210	48	45,1	45,92
225	50	47,3	47,89
240	52	49,9	49,86
255	54	53,1	51,83
270	56	55	53,8
285	58	57,2	55,77
300	60	59,8	57,74

два необходимых условия – наличие разности потенциалов и загрязнений – присутствуют всегда, и от них невозможно защититься. Но образования конденсированного слоя воды на поверхности платы можно не допустить.

Жидкость конденсируется на поверхности ПП при ее охлаждении ниже точки росы ($T_{\text{росы}}$) окружающего воздуха. Значение $T_{\text{росы}}$ определяется двумя факторами: температурой воздуха и его относительной влажностью. Точка росы тем выше, чем выше относительная влажность; по мере роста последней $T_{\text{росы}}$ приближается к фактической температуре окружающего воздуха, и наоборот – чем ниже влажность, тем ниже точка росы.

Очевидно, что при минимальной разности температуры между ПП и окружающей средой конденсации влаги на поверхности платы не происходит.

Для уточнения условий осаждения жидкости на плату был проведен эксперимент в климатической камере (Votsch vc37018). Плата в течение 30 мин выдерживалась при постоянной температуре 20 °С. Затем при постоянном значении влажности температура постепенно уменьшалась до -50 °С – имитировался подъем летательного аппарата на большую высоту. На этом значении температуры производилась выдержка для охлаждения платы до температуры внутри камеры,

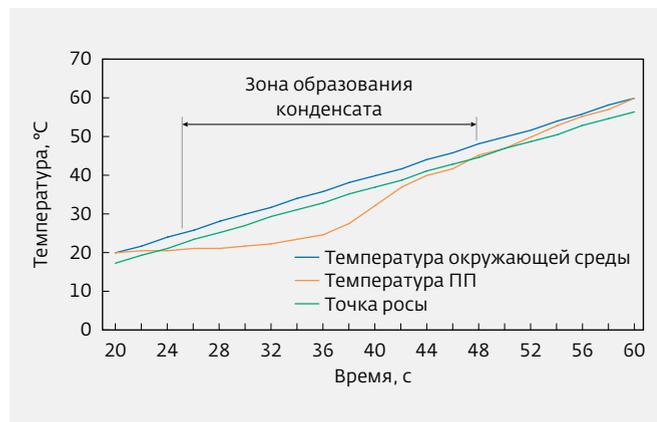


Рис.6. Условия возникновения конденсата

то есть до -50 °С, что регистрировалось термопарой, встроенной в плату. Далее температура в камере постепенно увеличивалась – имитировалось снижение. В интервале от 20 до 50 °С (измеренное значение относительной влажности – 95%) регистрировались температуры воздуха в камере и платы и моменты образования конденсата.

Результаты эксперимента представлены в табл.1 и на рис.6. Как видно из таблицы и графика, образование

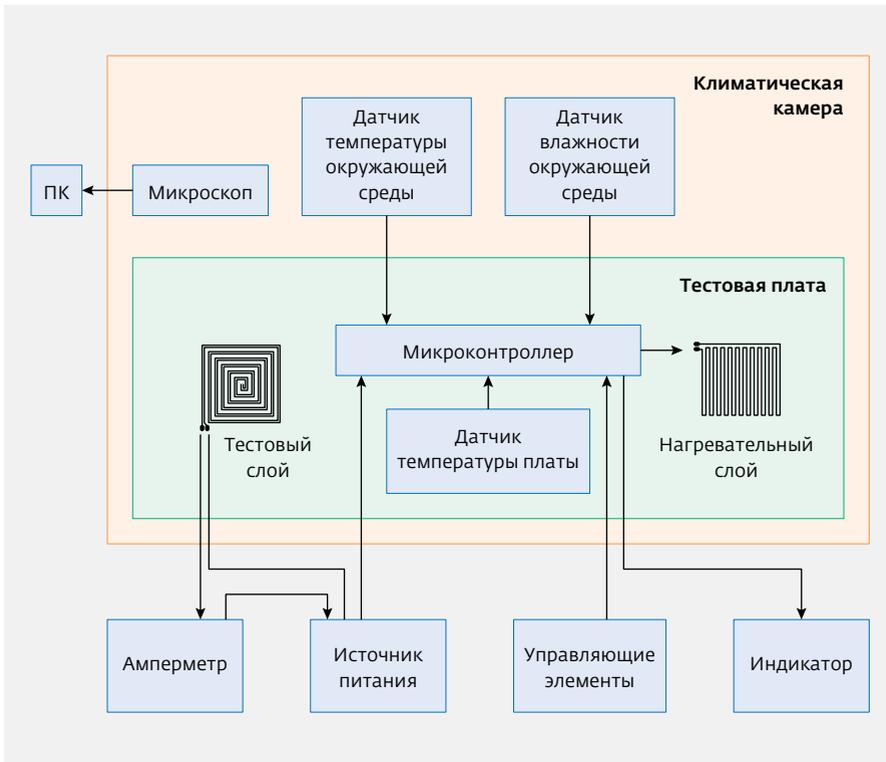


Рис.7. Функциональная схема исследовательского стенда

конденсата, в полном соответствии с теорией, происходит тогда, когда температура платы имеет значение, меньшее, чем температура точки росы.

Экспериментальные данные по образованию конденсата были положены в основу второго этапа

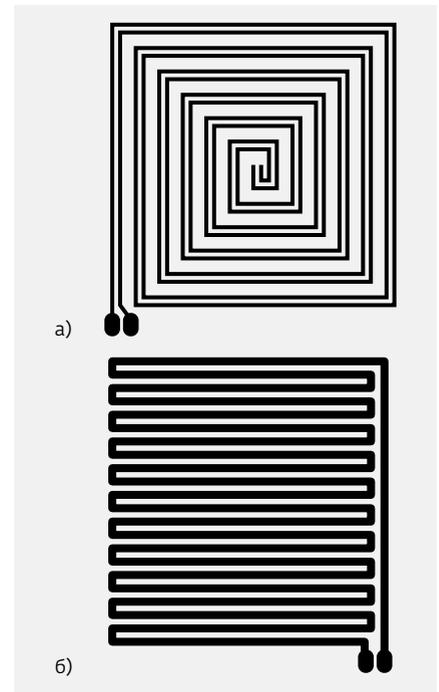


Рис.8. Тестовая плата: а - проводящий слой с разомкнутыми проводниками; б - нагревательный слой

исследования – разработке и лабораторной проверке метода предотвращения электрохимической коррозии путем управляемого нагрева платы до температуры, превышающей текущую температуру точки росы окружающей среды.

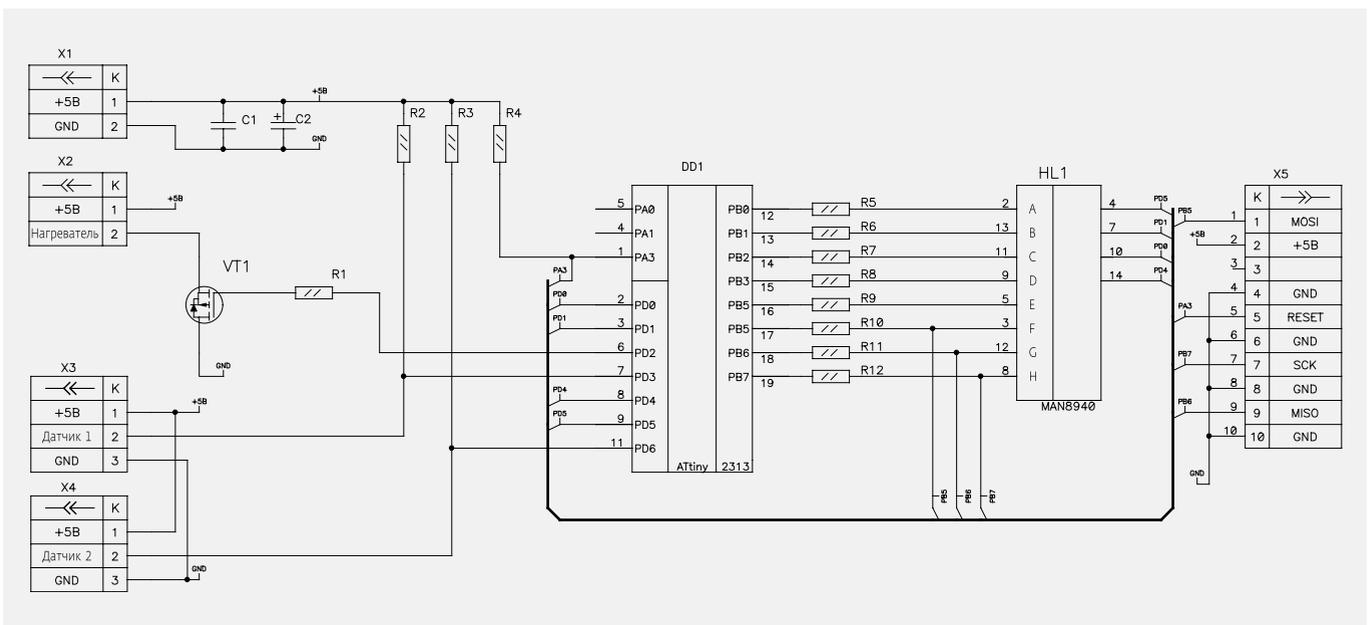


Рис.9. Принципиальная схема устройства, управляющего подогревом платы

Функциональная схема исследовательского стенда представлена на рис.7. Тестовая плата содержит тестовый проводящий слой с разомкнутыми проводниками и нагревательный слой (рис.8); на ней размещены датчики температуры и влажности. Устройство, разработанное для управления подогревом платы с ростом температуры окружающей среды, выполнено по схеме, показанной на рис.9; управляющий алгоритм, реализованный в программе микроконтроллера, – на рис.10.

В ходе проверки работоспособности устройства для предотвращения ЭХМ проведена следующая серия экспериментов.

На первом этапе климатическая камера охлаждалась до температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (имитация набора высоты летательным аппаратом). Установившаяся температура поддерживалась в течение 10 мин (имитация полета на большой высоте), за которые температура тестовой платы и температура окружающей среды приходили к установившемуся значению.

После этого температура в камере постепенно повышалась (имитация снижения летательного аппарата). В определенный момент времени разница между температурой тестовой платы и температурой окружающей среды достигла значения, превышающего разницу между температурой среды и точки росы для текущего значения температуры и влажности окружающей среды, и произошла конденсация влаги на поверхности тестовой платы. Согласно изложенному выше представлению о процессе электрохимической миграции, это должно приводить к образованию дендритов и появлению тока в проводящем слое, что и было зафиксировано амперметром, а также визуальным наблюдением с помощью цифрового электронного микроскопа Levenhuk DTX 30.

На втором этапе эксперимента нагревательный слой печатной платы и два датчика температуры – на тестовой плате и в климатической камере – подключались к управляющему устройству. Климатическая камера включалась на нагрев. Когда значение $T_{\text{росы}}$, растущее вместе с ростом $T_{\text{ос}}$, становилось выше текущей $T_{\text{пп}}$, управляющее устройство включало нагрев тестовой платы; после доведения $T_{\text{пп}}$ до значения, превышающего $T_{\text{росы}}$ на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, подогрев отключался. При наблюдении в микроскоп было подтверждено отсутствие на плате осажденной влаги, практически нулевой ток утечки указывал на отсутствие между проводниками каких-либо электропроводящих структур.

Проведенные эксперименты показывают, что встраивание нагревательного слоя в печатные платы авиационных приборов позволяет исключить фактор

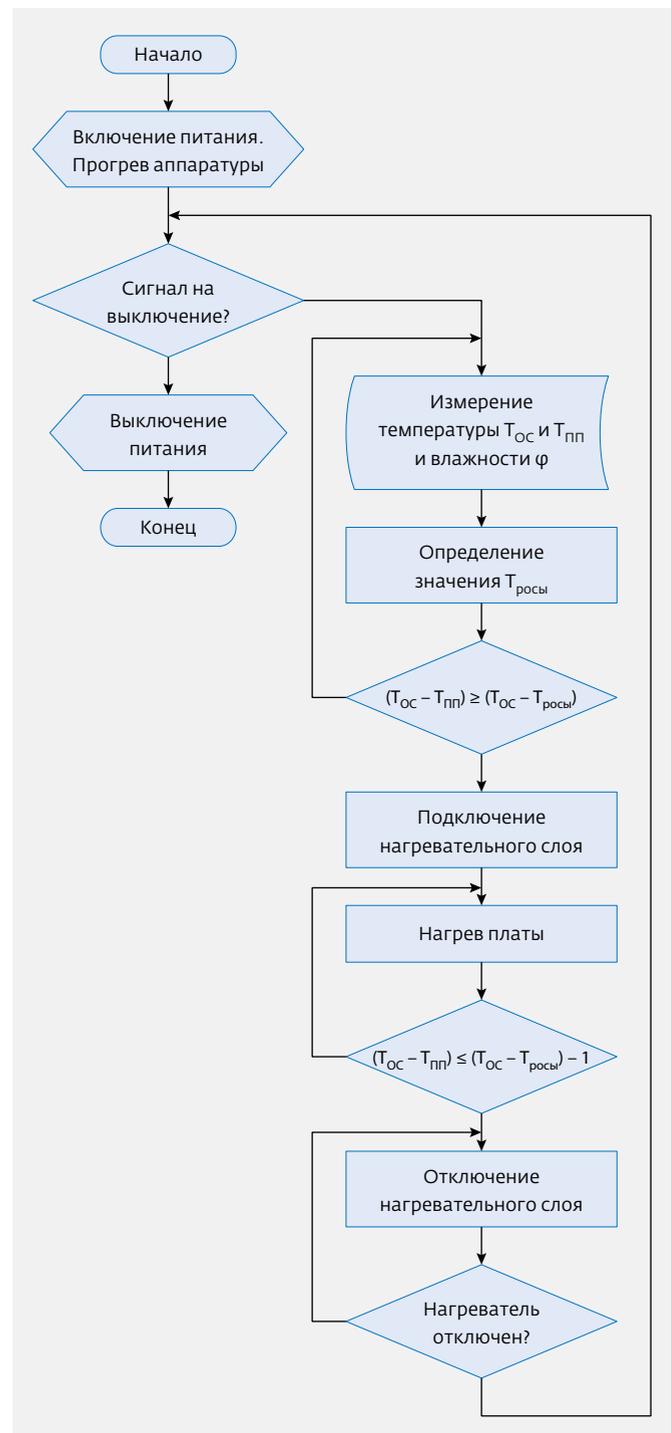


Рис.10. Блок-схема алгоритма работы устройства

наличия электролитического слоя на поверхности печатных плат, что значительно снижает вероятность возникновения явления электрохимической миграции. На их основании можно переходить к изучению эффективности внедрения этого технического решения в практические разработки. ●