

УДК 678.7

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПКМ
НА ОСНОВЕ ПЛИС И МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ**

© 2021 Г.В. Дмитриенко, Д.В. Мухин

Ульяновский государственный технический университет,
обособленное структурное подразделение
«Институт авиационных технологий и управления»

Статья поступила в редакцию 10.12.2020

В статье рассматриваются вопросы автоматизации диагностики и контроля параметров ПКМ на основе ПЛИС и микроконтроллеров.

Ключевые слова: Композиционные материалы, диагностика, автоматизация

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-11-16

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-48-732005\18***ВВЕДЕНИЕ**

Все более широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкцию новых изделий является одним из основных направлений современного машиностроения. Замена традиционных конструктивных материалов, в первую очередь металлов, на ПКМ, в силу существенных отличий их свойств неизбежно вызывает необходимость замены большинства технологических процессов, используемых в производстве. В частности коренному пересмотру подлежат методы диагностики и контроля и их место в цепочке производства деталей и узлов.

Переход от металлов к ПКМ приводит к тому, что многие узлы, ранее изготавливаемые с использованием сборочных операций из отдельных деталей, при переходе на композиты становится выгоднее изготавливать целиком, например панели фюзеляжа самолета или крыла. Однако при этом с одной стороны форма таких изделий становится достаточно сложной, вследствие чего появляется масса предпосылок для возникновения различного рода характерных для ПКМ дефектов, с другой стороны, цена брака при производстве такой детали оказывается слишком высока. Для уменьшения вероятности возникновения дефектов целесообразно проводить диагностику состояния детали на всех этапах ее производства с возможностью внесения корректив в процесс ее изготовления

Дмитриенко Герман Вячеславович, доктор технических наук, профессор кафедры «Самолетостроение».

E-mail: dmitrienko.german@yandex.ru

Мухин Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».

E-mail: dmuhin123@mail.ru

в тех случаях, когда возникают ситуации, способные привести к возникновению дефекта. Однако подобный подход ведет к существенному увеличению диагностической информации.

При большом объеме проверки изделий из ПКМ на входном контроле, на производстве требуется быстрое действие и точность обработки получаемой информации. Оператор, который будет производить эти действия, в силу человеческого фактора подвержен усталости и совершению отклонений, которые могут привести к ошибкам диагностики и контроля. Кроме того, бывают ситуации, в которых обходимо длительное время непрерывно наблюдать за объектом, что опять же трудно осуществить человеку-оператору. Эти трудности могут быть преодолены с использованием автоматизации процессов контроля.

В случае, когда схема, по которой производится контроль неизменна, меняются только окружающее состояние и время, для выполнения задач по контролю и хранению полученной информации подходит микроконтроллер (МК), который обеспечивает функции контролирования, получение измерительной информации ее сравнения и хранения [1]. Вся получаемая информация в зависимости от объема должна находиться в памяти контролируемого устройства или на отдельном носителе информации. Исходя из выше сказанного, можно предложить следующие варианты реализации автоматизации процесса диагностики. Если процесс диагностики параметров образцов ПКМ одинаков и никакие изменения в аппаратную часть вноситься не будут, то реализация выполняется на микроконтроллере, который обеспечивает необходимые условия диагностики и контроля образцов ПКМ.

Основное назначение МК – контролировать все процессы, которые происходят на его плат-

форме. МК осуществляет контроль за состоянием неких переменных и изменение системы в динамических условиях. По характеристикам МК соответствует центральному процессору компьютера ЦП (Central Processing Unit – CPU). Область его применения – хранение данных, выполнение арифметико-логических операций, управление системами. МП получает данные с входных периферийных устройств, обрабатывает их и передает выходным периферийным устройствам. Для МК программа пишется на Ассемблере, который позволяет полно раскрыть все возможности микроконтроллера и получить максимальное быстродействие и компактный код. Основными факторами подбора микроконтроллера являются:

1. Способность работы с прикладной системой.
2. Наличие в микроконтроллере необходимого количества портов, контактов.
3. Наличие необходимых устройств периферии: различных преобразователей, интерфейсов связи.
4. Обеспечение требуемой производительности: мощность вычислений, дающую возможность обработки запросов системы на определенном прикладном языке программирования.

В случае, когда диагностика и контроль, точнее схема измерения, условия измерения меняются, добавляются или удаляются элементы или устройства контроля и диагностики, по управление осуществляется через программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС). В ПЛИС программируется схема измерения, контроля и диагностики образцов ПКМ. В случае изменения условий или состав периферийных устройств, ПЛИС просто перепрограммируется, записывается в нее новая схема измерения. Программирование ПЛИС заключается в разработке электрической схемы диагностики и контроля, иными словами аппаратную процедуру обработки результатов измерений, диагностики и контроля можно поручить ПЛИС. Написание программы производится для ПЛИС фирмы Altera на языке Verilog или Quartus II.

Кроме того, через ПЛИС можно осуществлять сравнение в цифровом виде измеряемой информации с эталонированной информацией хранящейся в памяти, как внешнего устройства, так и самой ПЛИС. Кроме того можно производить вычисления, сохранять данные в регистрах или ПЗУ, а также оперировать данными прошитыми в память микроконтроллера. В ПЛИС создается архитектура из базовых логических элементов, под заданную программу испытаний и необходимую конфигурацию. В результате получается высокое быстродействию и гибкость контролирующей схемы. Это даёт возможность, не изменяя одного чипа сделать целый ряд проектов – схем, меняя конфигурацию программи-

руемой схемы, при неизменной периферийной базе. При выборе ПЛИС основным критерием является количество программируемых блоков – их должно хватить для реализации задачи.

В этих условиях использование ПЛИС становится более гибкой по сравнению с микроконтроллером.

Кроме того, процесс автоматизации позволяет расширить возможности диагностики ПКМ за счет использования комбинированных методов, при этом синхронное управление аппаратурой и датчиками будет осуществляться средствами автоматизации. Так в [7] в схеме диагностики используется рупорная антенна, для диагностики параметров образца ПКМ. Если вместо рупорной антенны поставить фазированную антенную решетку (ФАР), то с ее помощью можно производить и диагностику и нагрев и управление зондирующим лучом и т.д. переведя все на электронное управление. Затем производить обработку полученной информации, производить коррекцию выдавать рекомендации по полученным результатам (дефектам) образцов ПКМ.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ, КОТОРЫЕ БУДУТ ПОДВЕРГАТЬСЯ АВТОМАТИЗАЦИИ

СВЧ нагрев углеродных полимерных композиционных материалов.

Нагрев образцов ПКМ осуществлялся с помощью ФАР. Под управлением ПЛИС можно управлять мощностью нагрева, его длительностью, а также моделировать условия приближенные к нагреву в эксплуатационных условиях.

Так для примера, нагрев ПКМ производится при равномерном или близким к равномерному нагреву образцов материала. Равномерный нагрев ПКМ может производиться [2-5] следующим образом:

- в печах: дуговые печи, печи сопротивления;
- пламенем: плазменные горелки, жидкий реактивный двигатель;
- плазмой: ВЧ плазмотроны, дуговые плазмотроны;
- аэродинамическим нагревом: аэродинамические трубы, сверхзвуковой полет;
- теплопроводностью: твердые или жидкие нагреватели;
- лучистый нагрев: солнечные печи, дуговые отражательные печи, газоразрядные лампы, плазменные излучатели, инфракрасные излучатели, лазеры, ВЧ и СВЧ нагреватели.

Из перечисленных выше методов наиболее оптимально производить нагрев ПКМ лучистым нагревом, с помощью ВЧ и СВЧ нагревателей [6, 7]. Достоинством СВЧ нагрева является высокий КПД (близко к 100%) преобразования СВЧ энергии в тепловую энергию, выделяемую только в

объеме нагреваемых образцов ПКМ. Тепловые потери подводющих трактов обычно не велики, стенки подводющих волноводов и рабочих камер остаются практически холодными. Основным преимуществом СВЧ нагрева является тепловая безинерционность, т.е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на образец ПКМ. Этим достигается высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость. Возможность применения необходимых видов нагрева, например избирательного равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося.

Чтобы применение СВЧ энергии было экономически оправдано необходимо брать СВЧ приборы, которые имеют в сочетании следующие характеристики:

- высокий КПД преобразования энергии промышленной частоты в СВЧ энергию (60-70%);
- высокий уровень выходной мощности в непрерывном режиме;
- простые и дешевые источники питания;
- простота конструкции, надежность, большой срок службы (не менее 2-5 тыс. часов);
- возможность эффективной работы при переменной нагрузке.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют магнетроны, пролетные многорезонаторные клистроны и амплитроны.

Учитывая приведенные выше требования для СВЧ нагревателя, за основу был взят магнетрон М-136, с воздушным охлаждением. Выходная мощность составляет 1 кВт, КПД - 60-70%, рабочая частота магнетрона - 2,45 ГГц ± 50 МГц.

На основе магнетрона М-136 был разработан и изготовлен СВЧ нагреватель, для СВЧ нагрева исследуемых материалов (рис. 1).

Нагреватель состоит из нагревательной камеры, блока питания, платы управления и СВЧ генераторов (четыре магнетрона). Нагревательная камера изготовлена по всем требованиям, предъявляемым к СВЧ устройствам, напряженность поля вокруг нагревательной камеры на расстоянии 0,5 м не превышает 10 мкВ/м. Магнетроны крепятся на боковую стенку камеры, для создания мощного одностороннего лучистого потока энергии и одеты в металлические корпуса, использующиеся в качестве экранов, вентиляционные отверстия, находящиеся на корпусах закрыты мелкой сеткой, для предотвращения выхода СВЧ энергии наружу, шаг

сетки 1 мм. Блок питания магнетронов состоит из четырех отдельных источников питания (на каждый магнетрон), схема питания магнетрона стандартная. Для повышения надежности работы блока питания питание магнетронов производится с двух трансформаторов накального и анодного. Управление включением и выключением магнетронов осуществляет плата управления, электрическая схема приведена на рис. 1. В функции платы управления входит:

- управление работой магнетрона (длительность включения, рабочий режим мощности) и контроль за рабочими режимами блока питания, а именно контроль за током накала магнетрона и током первичной обмотки питающего трансформатора;
- контроль за обдувом блока питания и магнетрона;
- контроль за тепловыми режимами магнетрона и анодного трансформатора;
- контроль закрытия СВЧ камеры;
- контроль за превышением сетевого напряжения.

В случаи неисправности источника питания плата управления производит его отключение с запоминанием причины отказа и вывода ее на индикацию ее в виде условного кода. Для быстрого включения магнетрона и выхода его на рабочую мощность накал магнетрона включается отдельно и раньше, чем подается на магнетрон анодное напряжение.

Блок питания и магнетроны принудительно обдуваются воздухом, магнетрон согласно паспорту 100 литров в минуту, блок питания 250 литров в минуту согласно расчету теплового режима.

Технические параметры нагревателя следующие:

- полезная мощность (нагрева) от 0,6 кВт до 3 кВт;
- потребляемая мощность 5 кВт.

Работа и управление платы производилось под управлением МК серии К589ИР12.

Одной из проблем создания технологических СВЧ-установок является трудность формирования требуемого распределения температуры в обрабатываемом материале. Зачастую требуемое пространственное температурное распределение в обрабатываемом материале заменяют формированием заданного распределения СВЧ-энергии [8, 9]. В большинстве случаев для эффективной СВЧ-обработки материалов требуется

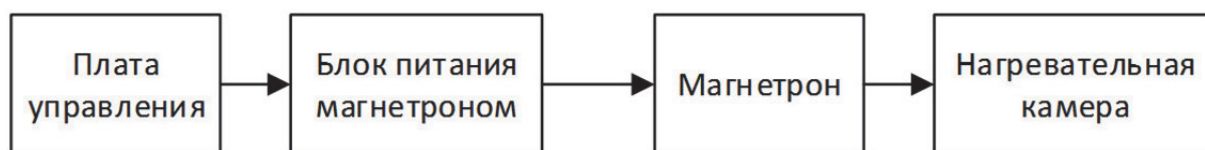


Рис. 1. Структурная схема СВЧ-нагревателя

обеспечение равномерного распределения энергии по их объему. В других же случаях следует локализовать СВЧ-энергию в заданной области.

В работах [10] и [11] рассматривались задачи распространения электромагнитных волн в многослойных средах и СВЧ-нагрева при кусочно-постоянных во времени параметрах среды.

В большинстве случаев для эффективной СВЧ-обработки материалов требуется обеспечение равномерного распределения энергии по их объему. В других же случаях следует локализовать СВЧ-энергию в заданной области.

Нагрев образцов производится сверхвысокочастотной электромагнитной волной (СВЧ-полем) на частотах 0,5...8 ГГц, частота определяется выбранным СВЧ-генератором – клистроном, магнетроном и т.д.

Температурное поле нагретого образца ПКМ определяется уравнением теплопроводности [12–14]:

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \frac{d^2T(x,t)}{dx^2} + \frac{q_{v0}}{c_p} \exp(-\psi x), \quad (1)$$

где c_p – объемная теплоемкость.

Для описания задачи примем модель полуограниченной пластины $0 \leq x \leq \infty$, нагрев производится с одной стороны, с нулевыми температурами внешней поверхности и начальной температурой. Граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad T(x, 0) &= 0; \\ x = 0 \quad T(x, 0) &= 0; \\ x \rightarrow \infty \quad \frac{dT(\infty, t)}{dx} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Тепловая задача решается операционным методом Лапласа. С учетом перехода от уравнений к их изображениям методом вариаций произвольных постоянных находится решение уравнения. Произведя интегрирование и переход к оригиналам, получаем конечное уравнение

$$\begin{aligned} T(x,t) &= \frac{q_{v0}}{\lambda \psi^2} \left[1 - \exp(-\psi x) + \frac{1}{2} \exp(a\psi^2 t - \psi x) \times \right. \\ &\times \operatorname{erfc} \left(\psi \sqrt{at} - \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - \frac{1}{2} \exp(a\psi^2 t + \psi x) \times \\ &\times \operatorname{erfc} \left(\psi \sqrt{at} + \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \left. \right] - \frac{q_{v0}}{\lambda \psi^2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \end{aligned}$$

В случае образца с дефектами нагрев неоднородный, и решение находится на основе функции Грина:

$$G(x, \zeta, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-\zeta)^2}{4at} \right] - \exp \left[-\frac{(x+\zeta)^2}{4at} \right] \right\}$$

при $t = 0 \quad T(x, 0) = f(x); \quad x = 0 \quad T(x, 0) = g(t).$

Функция Грина совпадает с характеристикой системы управления объектом с распределенными параметрами.

Конечное решение имеет вид:

$$\begin{aligned} T(x,t) &= \int_0^\infty G(x, \zeta, t) f(\zeta) d\zeta + \\ &+ \frac{x}{2\sqrt{\pi a}} \int_0^t \exp \left[\frac{x}{4a(t-\tau)} \right] \frac{g(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} + \\ &+ \int_0^\infty G(x, \zeta, t) \frac{q_{v0}}{c_p} e^{-\psi \zeta} d\zeta. \end{aligned}$$

ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПКМ НА ОТРАЖЕНИЕ ИЛИ НА ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН

Для определения параметров предыдущих слоев используется метод [15], в котором предполагают, что магнитная и диэлектрическая проницаемости плоскостройной среды зависят лишь от одной координаты, которую обозначим через z . Тогда решение волновых уравнений для ТМ- и ТЕ-поляризованных волн в произвольном слое номера n можно представить в виде:

$$E_x^{(n)} = A_n e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + B_n e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})}, \quad (3)$$

$$H_x^{(n)} = C_n e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + D_n e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})}, \quad (4)$$

где $\gamma_n = \kappa_0 \sqrt{\mu_n \varepsilon_n - \sin^2 \theta_0}$, $\kappa_0 = \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве, μ_n и ε_n – магнитная и диэлектрическая проницаемости слоя номера n , θ_0 – начальный угол падения, z_n, z_{n-1} – координаты начала и конца слоя ($n-1$). Для удобства записи множитель $e^{-j\omega_0 t + j\kappa_0 \cos \theta_0 y}$ опущен. Сшивая полученные решения вида (3) на границе соседних слоев при помощи граничных условий для ТМ- и ТЕ-волн соответственно n (4), получаем две системы алгебраических уравнений для определения неизвестных постоянных A_n, B_n, C_n, D_n :

$$\begin{cases} A_n = \frac{1}{2} A_{n+1} \left(1 + \frac{\varepsilon_n \gamma_{n+1}}{\varepsilon_{n+1} \gamma_n} \right) e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + \frac{1}{2} B_{n+1} \left(1 - \frac{\varepsilon_n \gamma_{n+1}}{\varepsilon_{n+1} \gamma_n} \right) e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} \\ B_n = \frac{1}{2} A_{n+1} \left(1 - \frac{\varepsilon_n \gamma_{n+1}}{\varepsilon_{n+1} \gamma_n} \right) e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + \frac{1}{2} B_{n+1} \left(1 + \frac{\varepsilon_n \gamma_{n+1}}{\varepsilon_{n+1} \gamma_n} \right) e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_n = \frac{1}{2} C_{n+1} \left(1 + \frac{\mu_n \gamma_{n+1}}{\mu_{n+1} \gamma_n} \right) e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + \frac{1}{2} D_{n+1} \left(1 - \frac{\mu_n \gamma_{n+1}}{\mu_{n+1} \gamma_n} \right) e^{-j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} \\ D_n = \frac{1}{2} C_{n+1} \left(1 - \frac{\mu_n \gamma_{n+1}}{\mu_{n+1} \gamma_n} \right) e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} + \frac{1}{2} D_{n+1} \left(1 + \frac{\mu_n \gamma_{n+1}}{\mu_{n+1} \gamma_n} \right) e^{j\gamma_n(z_n - z_{n-1})} \end{cases} \quad (6)$$

Следует подчеркнуть, что система (5)-(6) получена из линейных комбинаций вида (3) для ТМ- и ТЕ-волн с учетом граничных условий (4). Решение уравнений системы (5)-(6) для неизвестных постоянных A_1, B_1, C_1, D_1 и $A_{n+1}, B_{n+1}, C_{n+1}, D_{n+1}$ удобнее представить в матричном виде. Для поглощающей среды коэффициенты A_n, B_n, C_n, D_n являются комплексными величинами, так что характеристические матрицы для ТМ- и ТЕ-волн также комплексны (7).

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_{n+1} \\ D_{n+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

где матрицы $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$ – ха-

рактеристические матрицы для ТМ- и ТЕ-волн исследуемого слоя.

Величины A_1, C_1 есть амплитуды падающих ТМ- и ТЕ-волн, которые можно положить равными единице. Величины B_1, D_1 – коэффициенты отражения ТМ- и ТЕ-волн, а величины A_{n+1}, C_{n+1} – коэффициенты прохождения соответствующих волн.

Амплитуды отраженных волн B_{n+1}, D_{n+1} и слое $(n+1)$, который мы считаем полубесконечным, равны нулю. С учетом этих замечаний коэффициенты прохождения и отражения будут иметь вид (8,9):

$$T^{(TM)} = \frac{1}{M_{11}}, \quad R^{(TM)} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (8)$$

$$T^{(TE)} = \frac{1}{R_{11}}, \quad R^{(TE)} = \frac{R_{21}}{R_{11}} \quad (9)$$

где через $T^{(TM)}, T^{(TE)}, R^{(TM)}, R^{(TE)}$ обозначены коэффициенты прохождения и отражения, а через $M_{11}, M_{21}, R_{11}, R_{21}$ – матричные элементы характеристических матриц.

Такой подход можно применить для анализа нестационарного нагреваемых полимерных материалов заменяя непрерывное изменение e и tgd по толщине-слоистой моделью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, К.Б. Микроконтроллерное управление электроприводом / К.Б. Алексеев, К.А. Палагута. - М.: МГИУ, 2008. - 298 с.
2. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ

- диэлектрики в условиях высоких температур. - М.: Советское радио, 1977. - 208с.
3. Кинджери В.Д. Измерения при высоких температурах. Методы измерения свойств материалов при температурах выше 1400 С влияние различных факторов. -М.: Metallurgia, 1963. 466 с.
4. Техника высоких температур./Под ред. И.Э. Кэмпбелла. -М.: Иностранная литература, 1959. 596 с.
5. Microwave heating and dielectric diagnosis technique in a single-mode resonant cavity/Jow Jinder, Hawley Martin C., Finzel Mark C., Asmussen Jes.(jr)// Rer. Sci. Instrum. -1989. - 60. №1. - P. 96-103.
6. Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника СВЧ. - М.: Радио и связь, 1981. 89 с.
7. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. - М.: Советское радио, 1977. - 208с.
8. Дайсон Дж. Измерение фазы на УВЧ и СВЧ. М.: Электроника, 1968. 38 с.
9. Соловов В.Я. Фазовые измерения. М.: Энергия, 1973. 120 с.
10. Красюк В.Н. Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями. Л.: Судостроение, 1986. 164 с.
11. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Советское радио, 1970. 340 с.
12. Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями / АН СССР. Ин-т высоких температур: в 2 т. М.: Наука, 1974. Ч. 2. Нестационарные температурные поля при импульсном лучистом нагреве, 1974. 726 с.
13. Гершензон, В.Е., Райзер В.Ю., Эткин В.С. Метод переходного слоя в задаче о тепловом излучении шероховатой поверхности // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. № 11. С. 1279–1284.
14. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС. 2003. 784 с.
15. Баутин В.А., Ерышов Н.М., Поряков Ю.А. О вычислении коэффициентов отражения и прохождения радиоволн через плоскостойкую среду // Радио-техника и электроника. 1976. Т. 21. № 2. С. 382-385.

**AUTOMATION OF THE DIAGNOSTIC PROCESS OF PCM PARAMETERS
BASED ON PLIS AND MICROCONTROLLERS**

© 2021 G.V. Dmitrienko, D.V. Mukhin

Ulyanovsk State Technical University,
Separate Structural Unit
«Institute of Aviation Technologies and Management», Ulyanovsk, Russia

The article discusses issues of automation of diagnostics and control of PCM parameters based on FPGAs and microcontrollers.

Key words: Composite materials, diagnostics, automation

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-11-16

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Ulyanovsk Region within the framework of the scientific project No. 18-48-732005\18

German Dmitrienko, Doctor of Technics, professor at the Aircraft Engineering Department.

E-mail: dmitrienko.german@yandex.ru

Dmitry Mukhin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Engineering Department.

E-mail: dmuhin123@mail.ru