

*Аналізується життєвий цикл сучасних радіоелектронних засобів (РЕЗ), робиться акцент на необхідності більш глибокої автоматизації етапу супроводу та доповнення етапу проектування для підвищення ефективності подальшого супроводу РЕЗ. Пропонуються шляхи автоматизації процесів контролю та діагностування технічного стану РЕЗ на стадії супроводу, а також кроки щодо забезпечення дігностованості РЕЗ ще на стадії їх проектування*

*Ключові слова: життєвий цикл, етап супроводу, технічний стан, діагностування, внутрішній параметр, функція чутливості*

*Анализируется жизненный цикл современных радиоэлектронных средств (РЭС), делается акцент на необходимости более глубокой автоматизации этапа сопровождения и дополнения этапа проектирования для повышения эффективности дальнейшего сопровождения РЭС. Предлагаются пути автоматизации процессов контроля и диагностирования технического состояния РЭС на стадии сопровождения, а также шаги по обеспечению диагностируемости РЭС еще на стадии их проектирования*

*Ключевые слова: жизненный цикл, этап сопровождения, техническое состояние, диагностирование, функция чувствительности*

# ПРОГРАММНАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА ЭТАПЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

**К. Н. Касьян**  
Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: konst\_k@yahoo.com

**Н. Н. Касьян**  
Кандидат технических наук\*  
E-mail: ivga47@mail.ru

\*Кафедра компьютерных систем и сетей  
Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

## 1. Введение

Для обеспечения согласованной работы всех предприятий, участвующих в проектировании, производстве и эксплуатации сложной техники, используется соответствующая информационная поддержка этапов жизненного цикла промышленных изделий. Такая поддержка получила название CALS (Computer Aided Logistics Support – компьютерная поддержка логистических процессов или Continuous Acquisition and Lifecycle Support – компьютерное сопровождение и поддержка жизненного цикла изделия) [1].

CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы в единую многофункциональную систему. Целью такой интеграции является повышение эффективности создания и использования современной сложной техники. Кроме того, развитие CALS-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых участниками жизненного цикла конкретного изделия могут стать территориально не связанные друг с другом предприятия.

Жизненный цикл радиоэлектронных средств (РЭС) включает в себя все этапы развития от возникновения потребности в РЭС определенного целевого назначения до полного прекращения его использования и утилизации (рис. 1).

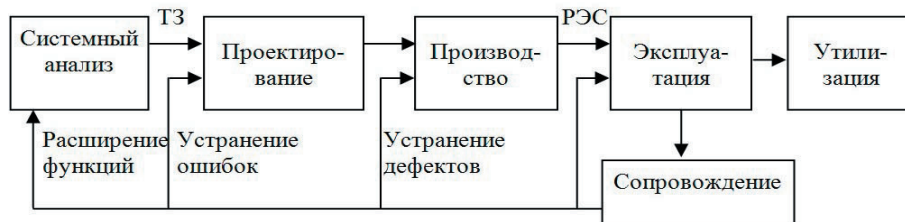


Рис. 1. Жизненный цикл радиоэлектронных средств

Наиболее специфическим, трудно формализуемым и тесно связанным с функциональным назначением РЭС является этап системного анализа, в ходе которого формулируются его назначение и основные показатели качества.

Решаемые задачи практически полностью определяются предметной областью системного анализа, поэтому на данном этапе трудно обобщать технологические процессы и критерии качества при создании различных типов РЭС.

Сопровождение играет роль необходимой обратной связи от этапа эксплуатации. Так, при испытаниях или в процессе эксплуатации РЭС может возникать необходимость их модернизации, например, для расширения функций. В этом случае процедура сопровождения выводит жизненный цикл РЭС на этап системного анализа. В процессе функционирования РЭС возможно обнаружение ошибок проектирования и дефектов как производственных, так и эксплуатационных и появляется необходимость их устранения.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Появление и развитие микроэлектроники стимулировало развитие методов и средств автоматизированного проектирования. Первые системы автоматизированного проектирования в электронике (САПР-Э или ECAD – Electronic Computer Aided Design) были созданы именно для нужд микроэлектронной промышленности. Современные САПР-Э состоят из большого числа программ, различающихся ориентацией на различные проектные процедуры (электрический и тепловой анализ, расчет конструкций на вибропрочность, анализ электромагнитной совместимости компонентов в конструктивах и т. д.) и разные типы схем, и являются системами сквозного проектирования РЭС [2 – 5].

Моделирование технологических процессов изготовления СБИС относят к технологическому проектированию, поддерживаемому соответствующими программами ECAD. Технологическое проектирование печатных плат заключается в преобразовании результатов конструкторского проектирования в файлы управляющей информации для фотоплоттеров и сверлильных станков с ЧПУ.

Этап сопровождения, с точки зрения автоматизированной поддержки жизненного цикла РЭС, остается либо неохваченным вообще, либо охваченным недостаточно [6 – 9]. Хотя этот этап является очень важным во всем жизненном цикле РЭС.

## 3. Цель и задачи исследования

Сопровождение – это обычный процесс изменения системы после ее поставки заказчику. Существует три вида сопровождения:

- сопровождение с целью исправления ошибок,
- сопровождение с целью адаптации к специфическим условиям эксплуатации,
- сопровождение с целью изменения функциональных возможностей.

Соотношение между величинами средств на сопровождение и на разработку могут быть разным в зависимости от предметной области, где эксплуатируется система. Например, для встроенных систем реального времени затраты на сопровождение могут в несколько раз превышать стоимость самой разработки. Можно получить значительную общую экономию средств, если заранее потратить финансы и усилия на создание системы, не требующей дорогостоящего сопровождения.

Основной задачей, которую приходится решать в процессе эксплуатации и сопровождения РЭС, является контроль их технического состояния, выявление, диагностирование и устранение дефектов, которые обязательно возникают в аппаратуре под действием таких объективных факторов как, например, старение, изменение температуры, радиация и т. д. [10 – 13]. Кроме того, могут иметь место и скрытые производственные дефекты, которые могут быть не выявлены по выходным характеристикам РЭС в процессе их испытания.

Таким образом, целью исследований является повышение надежности и качества РЭС, которые закладываются на этапе проектирования и контролируются на этапе сопровождения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- автоматизировать процесс диагностирования технического состояния элементов и РЭС в целом на этапе сопровождения,
- обеспечить диагностируемость РЭС на этапе проектирования.

## 4. Пути автоматизации этапа сопровождения жизненного цикла РЭС

Задачу диагностирования технического состояния РЭС с точки зрения системного подхода можно сформулировать следующим образом (рис. 2) – по измеренным выходным характеристикам системы  $Y$  необходимо определить значения ее внутренних параметров  $q$ , сравнить их с предельно-допустимыми значениями  $q_{\text{ниж}}$  и  $q_{\text{верх}}$ , на основании чего сделать вывод о техническом состоянии системы.

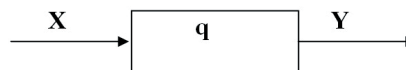


Рис. 2. Диагностируемая система

При этом глубина диагностирования может быть различной в зависимости от того, что выступает в качестве внутренних диагностируемых параметров системы.

Это могут быть как характеристики и параметры определенных подсистем и узлов, так и параметры комплектующих РЭС электрорадиоэлементов [14, 15].

По сути, эта задача является обратной задаче проектирования, когда задаются входные воздействия  $X$  и внутренние параметры  $q$ , по которым для выбранной схемы определяются выходные характеристики  $Y$ . Соответственно для ее решения могут быть использованы САПР, которые были уже задействованы в жизненном цикле данного РЭС на стадии его проектирования [16].

Значения параметров  $q$  необходимо определять таким образом, чтобы расчетные выходные характеристики системы  $Y_{\text{расч}}$  как можно точнее совпали с экспериментально измеренными  $Y_{\text{изм}}$ . Эту задачу можно решить методом параметрической оптимизации с использованием известного критерия минимума среднеквадратической ошибки [17]:

$$f(q) = \sum_{k=1}^N [Y_{k \text{ изм}}(q) - Y_{k \text{ расч}}(q)]^2 \quad (1)$$

Принимая во внимание то, что выходные характеристики могут быть совершенно разными зависимостями (напряжения, тока, коэффициента передачи и т. д.), то целесообразно в критерии (1) использовать не абсолютные значения величин, а относительные:

$$f(q) = \sum_{k=1}^N \left[ 1 - \frac{Y_{k \text{ расч}}(q)}{Y_{k \text{ изм}}(q)} \right]^2 \quad (2)$$

где  $Y_{k \text{ расч}}(q)$  – расчетное значение k-той выходной характеристики, которое зависит от вектора параметров элементов схемы  $q$ , а  $Y_{k \text{ изм}}(q)$  – измеренное значение этой же выходной характеристики.

Для минимизации функции среднеквадратической ошибки используется метод оптимизации. Методы, которые применяются сейчас для решения задач оптимизации, достаточно многочисленны. Среди них отсутствует универсальный метод, который был бы наилучшим во всех или большинстве случаев.

Выбор метода, связанного с особенностями конкретной задачи, повышает вероятность ее успешного решения с минимальными затратами.

В основе диагностической модели лежит выпуклый функционал, который является композицией выпуклых функций. Для таких функций наилучшими по скорости сходимости и устойчивости являются градиентные методы второго порядка, например, метод Ньютона. Однако этот метод требует вычисления матрицы Гессе вторых частных производных и ее обращения [18].

Наиболее целесообразно использовать метод Давидона-Флетчера-Пауелла, который не требует на каждом шаге вычисления обратного гессиана  $G^{-1}(q_i)$  потому, что направление поиска на шаге  $i$  является направлением  $-H_i g(q_i)$ , где  $H_i$  – положительно определенная симметричная матрица, которая обновляется на каждом шаге. В пределе матрица  $H$  становится равной обратному гессиану. Этот метод использует как идеи метода Ньютона, так и свойство сопряженных градиентов, и при использовании для минимизации выпуклых квадратичных функций сходится достаточно быстро. Он, как и метод Ньютона, основан на соотношении:

$$q_{i+1} = q_i - \lambda_i G^{-1}(q_i) g(q_i), \quad (3)$$

где  $q$  – вектор диагностируемых параметров;  $i$  – номер итерации оптимизации;  $\lambda$  – параметр шага оптимизации;  $g$  – вектор функций чувствительности целевой функции к изменению значений параметров (градиент);  $G$  – матрица функций чувствительности второго порядка, так называемая матрица Гессе.

Поиск минимума целевой функции (2) начинается из начальной точки  $q_0$  (обычно номинальные значения

диагностируемых параметров), при этом за начальную принимается единичная матрица  $H_0$ .

Информационные потоки процесса диагностирования могут быть представлены так, как это показано на рис. 3.

Естественно, для однозначного определения значений внутренних параметров  $q$  системы выходных характеристик, контролируемых только при испытании системы в штатных режимах, недостаточно. Поэтому наиболее сложной, трудно формализуемой и тесно связанной с конкретным РЭС является задача выбора тестовых входных воздействий  $X$  и дополнительных контрольных точек измерения выходных характеристик  $Y$ , достаточных для однозначного определения параметров  $q$ , т. е. обеспечения одноэкстремальности целевой функции (2).

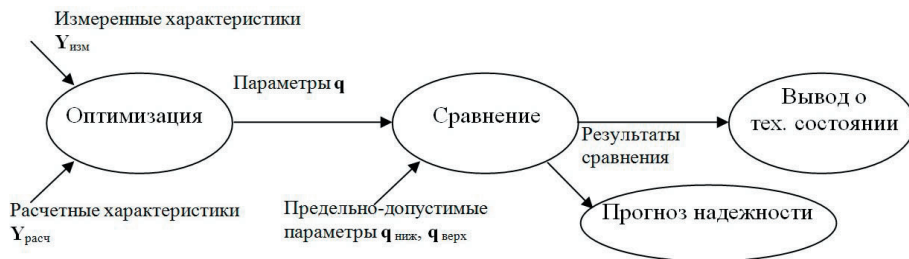


Рис. 3. Информационные потоки процесса диагностирования

Другими словами, для каждого конкретного РЭС необходимо иметь:

- набор, образуемый такими входными воздействиями  $X$ , которые обеспечивают диагностируемость РЭС;

- набор, образуемый такими выходными характеристиками  $Y$ , которые позволяют однозначно определять значения параметров  $q$  (рис. 4).

Во многих случаях определение таких тестовых входных воздействий и контрольных точек измерения выходных характеристик может основываться на предыдущем опыте диагностирования подобного класса систем. Тем не менее, систематический подход к выявлению тестовых воздействий и выходных характеристик позволяет более эффективно обеспечивать диагностируемость и проводить само диагностирование РЭС.

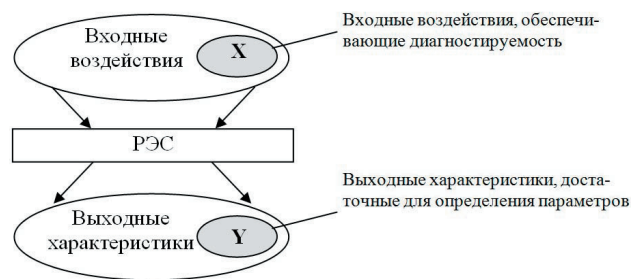


Рис. 4. Диагностирование РЭС

Обязательным фактором, который следует учитывать при этом, является способность САПР, используемых на этапе проектирования, определять функции чувствительности выходных характеристик РЭС к изменению значений его внутренних параметров:

$$A_{q_n}^{Y_k} = \frac{\partial Y_k(q)}{\partial q_n}, \tag{4}$$

где  $A_{q_n}^{Y_k}$  – абсолютная функция чувствительности  $k$ -й выходной характеристики к изменению значения  $n$ -го внутреннего параметра.

Кроме того, при построении адаптивных систем диагностирования в настоящее время перспективным является использование нейронных сетей, которые обладают такими свойствами как способность к обучению, универсальность и способность аппроксимировать любые вычислительные функции [19]. Это позволяет использовать их для классификации, оценки значений параметров и построения математических моделей сложных процессов и объектов.

В процессе обеспечения диагностируемости может потребоваться обеспечение доступа к каким-либо внутренним узлам схемы для подачи на них тестовых воздействий или измерения выходных характеристик. Очевидно, что такая возможность должна учитываться еще на этапе проектирования РЭС и ее конструкции. Это еще раз подчеркивает тот факт, что диагностируемость или в более общем случае удобство сопровождения должно учитываться еще на ранних этапах жизненного цикла РЭС при его проектировании. Т. е. этап проектирования РЭС необходимо дополнить стадией обеспечения его диагностируемости, в ходе которой и проводится моделирование, целью которого является определение тестовых воздействий и выходных характеристик, необходимых для успешного диагностирования, предельно-допустимых значений диагностируемых параметров и методики самого диагностирования.

Исходя из этого, для более эффективного проектирования и эксплуатации РЭС часть этапов их жизненного цикла требует существенного дополнения и расширения выполняемых на них функций, а также соответствующей программной, информационной и методической поддержки. Прежде всего, это касается автоматизации этапа сопровождения, а также дополнения этапа проектирования для обеспечения успешного и эффективного процесса сопровождения (рис. 5).

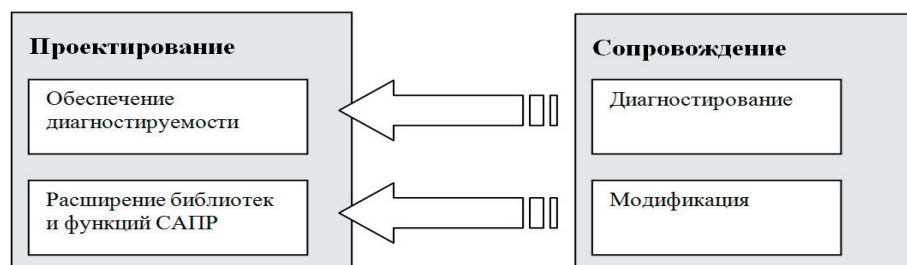


Рис. 5. Дополнение этапа проектирования для эффективного сопровождения РЭС

Также в процессе сопровождения может решаться задача модернизации РЭС. При этом может потребоваться как адаптация РЭС к специфическим условиям эксплуатации (например, повышенная температура окружающей среды, влажность или радиация), так и изменение функциональных возможностей РЭС (например, увеличение радиуса действия, повышение

чувствительности и т. д.). Это приводит к необходимости соответствия используемых САПР, новым выдвигаемым к РЭС требованиям. Т. е. САПР должны быть в состоянии перепроектировать систему с минимальными дополнительными затратами. В ряде случаев для достижения новых требований может потребоваться переход на новую элементную базу, причем это могут быть как элементы схемы, так и конструкции. Соответственно САПР должна обеспечить возможность использования этих новых элементов, т. е. иметь в своей библиотеке их математические модели. В последнее время для получения моделей нужных элементов все чаще можно использовать соответствующие поисковые системы, позволяющие обновлять и дополнять библиотеки моделей конкретной САПР с использованием практически неограниченных возможностей, которые предоставляют сетевые технологии, прежде всего, глобальной сети Internet.

Эту задачу могли бы решать сетевые системы [20, 21], имеющие открытую распределенную архитектуру, базирующиеся на кроссплатформенной технологии распределенных вычислений CORBA (рис. 6).

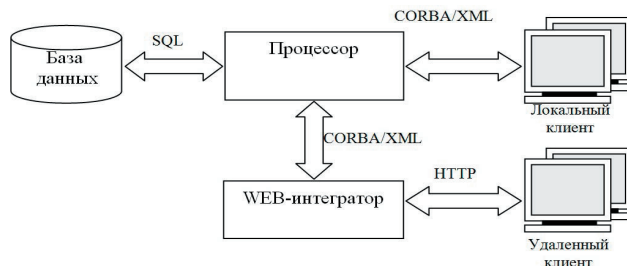


Рис. 6. Архитектура САПР

Подобная архитектура позволяет обеспечить многопользовательский доступ к ресурсам системы через локальную сеть и сеть Internet, создать общее информационное пространство для всех пользователей системы, выполнять распределение вычислений в рамках локальной сети, а также поддерживать полную интеграцию с внешними САПР.

## 5. Выводы

Таким образом, для автоматизации диагностирования технического состояния РЭС на этапе сопровождения предлагается использовать те же САПР, которые используются для проектирования этих РЭС. При этом диагностирование будет проводиться до уровня параметров модели РЭС. Это могут быть либо непосредственно параметры моделей радиоэлементов схемы либо параметры макромоделей. Очевидно, точность моделей, используемых САПР, будет определять и точность диагностирования, поэтому важным условием является возможность оперативно пополнять библиотеку элементов посредством использования сетевых распределенных САПР.

Также в процессе сопровождения может решаться задача модернизации РЭС. При этом может потребоваться как адаптация РЭС к специфическим условиям эксплуатации (например, повышенная температура окружающей среды, влажность или радиация), так и изменение функциональных возможностей РЭС (например, увеличение радиуса действия, повышение

При этом диагностирование будет эффективным, если предварительно обеспечена диагностируемость РЭС.

Эта задача должна решаться на этапе проектирования и ее результатом будет являться методика

диагностирования, которая определяет необходимые контрольные точки, подаваемые входные воздействия и измеряемые выходные характеристики, которых будет достаточно для однозначного определения параметров.

## Литература

1. Норенков, И. П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии [Текст] / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
2. Fitzpatrick, D. Analog Design and Simulation using OrCAD Capture and PSpice [Text] / D. Fitzpatrick. – Newnes, 2012. – 344 p.
3. Attia, J. O. SPICE and MATLAB for Electronics: An Integrated Approach, Second Edition [Text] / J. O. Attia. – CRC Press, 2010. – 356 p.
4. Кеун, Дж. OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей [Текст]: пер. с англ. / Дж. Кеун. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 640 с.
5. Сабунин, А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств [Текст] / А. Е. Сабунин. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 432 с.
6. Wang, L. Electronic Design Automation: Synthesis, Verification, and Test [Text] / L. Wang, Y. Chang, K. Cheng. – Morgan Kaufmann, 2009. – 971 p.
7. Maheswari, L. K. Analog electronics [Text] / L. K. Maheswari, M. M. S. Anand. – PHI Learning Pvt. Ltd, 2009. – 704 p.
8. Sedra, A. S. Microelectronic Circuits (Oxford Series in Electrical and Computer Engineering) (6th Edition) [Text] / A. S. Sedra, K. C. Smith. – Oxford University Press, 2010. – 1456 p.
9. Wilson, P. Model-Based Engineering for Complex Electronic Systems [Текст] / P. Wilson. – Elsevier Science, 2013. – 536 p.
10. Palade, V. Computational Intelligence in Fault Diagnosis [Text] / V. Palade, C. D. Bocaniala, L. Jain. – Springer, 2006. – 362 p.
11. Blanke, M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control [Text] / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze. – Springer, 2006. – 691 p.
12. Witczak, M. Modelling and Estimation Strategies for Fault Diagnosis of Non-Linear Systems [Text] / M. Witczak // From Analytical to Soft Computing Approaches. – Springer, 2007. – 223 p.
13. Ding, S. X. Model-based Fault Diagnosis Techniques [Text] / S. X. Ding. – Springer, 2008. – 493 p.
14. Halderman, J. D. Diagnosis and Troubleshooting of Automotive Electrical, Electronic, and Computer Systems (6th Edition) [Text] / J. D. Halderman. – Pearson Education, Inc, 2012. – 528 p.
15. Mazur, G. A. Troubleshooting Electrical [Текст] / G. A. Mazur, T. E. Proctor // Electronic Systems. – АТР, 2010. – 592 p.
16. Kasyan, K. Diagnosing of the radio-electronic equipment with the help of traditional systems of the automated designing [Text] / K. Kasyan, N. Kasyan. – International conference TCSET, 2006. – P. 33–35.
17. Касьян, К. Н. Разработка метода диагностирования электрорадиоэлементов аналоговых функциональных узлов на этапе производства [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.12.17 / К.Н. Касьян // Московский государственный ин-т электроники и математики (технический ун-т). – М., 1998. – 21 с.
18. Банди, Б. Методы оптимизации: Вводный курс [Текст]: пер. с англ. [Текст] / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
19. Назаров, А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем [Текст] / А. В. Назаров, А. И. Лоскутов. – М.: Наука и техника, 2003. – 384 с.
20. Петров, Д. В. Мережева система теплового проектирования МЭП, багатоваariantних стосовно конструктивно-технологічного виконання [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.12 / Д.В. Петров // Національний ун-т "Львівська політехніка". – Львів, 2002. – 20 с.
21. Анисимов, Д. А. Исследование и разработка методов построения распределенных систем автоматизированного проектирования на основе технологий веб-сервисов [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.12 / Д. А. Анисимов // Санкт-Петербургский государственный электротехнический ун-т „ЛЭТИ”. – Санкт-Петербург, 2013. – 18 с.