УДК 338.45

РЕИНЖИНИРИНГ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

[1]Орлов В.И., [1,2]Казаковцев Л.А., [2]Казаковцева О.Б., [1]Машинец Е.Е., [1]Кусташев П.А.

[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва», Красноярск, e-mail: kazakovtsev@sibsau.ru;

[2]ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: levk@bk.ru

Увеличение продолжительности сроков активного существования космических аппаратов (КА) на орбите – наиболее перспективный способ повышения эффективности функционирования орбитальной группировки и снижения затрат на ее восполнение. Увеличение сроков повышает общий уровень готовности космических систем (КС), снижает количество производимых космических аппаратов, необходимых для поддержания пропускной способности КС, а также потребность в ракетах-носителях их выведения на соответствующие орбиты и упрощает управление функционирующими КА орбитальной группировки. Повышение надежности и срока активного существования КА на основе развития методов прогнозирования работоспособности, обеспечения качества и надежности электронной компонентной базы (ЭКБ) в КА длительного функционирования позволит решить важную научную и хозяйственную задачу обеспечения аппаратуры космического и другого специального назначения ЭКБ с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также повысить эффективность её применения. Отклонения технологического процесса могут привести к существенным ошибкам в оценке качества и физических характеристик ЭКБ. В работе представлен подход к организации процесса формирования специальных партий ЭКБ космического применения с использованием на одном из этапов метода интеллектуального анализа данных. Представленный подход открывает путь к достижению параметров партий ЭКБ, близких по своим характеристикам к уровню качества Space.

Ключевые слова: реинжиниринг, бизнес-процессы, космическая электроника, отбраковочные испытания, интеллектуальный анализ данных

REENGINEERING OF THE PROCESS OF FORMATION OF SPECIAL PRODUCTION BATCHES OF SEMICONDUCTOR DEVICES WITH THE USE OF DATA MINING METHODS

[1]Orlov V.I., [1,2]Kazakovtsev L.A., [2]Kazakovtseva O.B., [1]Mashinets E.E., [1]Kustashev P.A.

[1]Reshetnev Siberian State University of Space and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: kazakovtsev@sibsau.ru;

[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: levk@bk.ru

The increase in the duration of the spacecraft existence in orbit is the most promising way to improve the efficiency of the orbital group of satellites and reduce the cost of its replenishment. The increase in terms increases the overall level of readiness of space systems (SS), reduces the number of the produced spacecrafts which is needed to maintain the capacity of the space systems, as well as the need for launch vehicles to their corresponding orbits and simplifies the management of the spacecraft of the orbital group. Increasing the reliability and duration of active life of the spacecraft based on methods for predicting the operability, quality and reliability of the electronic components in long-term spacecraft allows us to solve the important scientific and economic problem of providing the spacecraft equipment and other special equipment with electronic components with improved performance characteristics, and to increase its efficiency. Fluctuations of the manufacturing process can lead to significant errors in the evaluation of the quality and physical characteristics of the electronic parts. This paper presents an approach to the organization of the process of formation of special production batches of electronic components for space industrywhich includes stages of data mining methods implementation. The presented approach opens the way to the achievement of parameters of production batches which are close to characteristics of the Space quality level production.

Keywords: reengineering, business processes, space electronics, rejection tests, data mining

Технологический уровень электронной компонентной базы (ЭКБ) – основной фактор, обусловливающий продолжительность срока активного существования современных КА в условиях воздействия факторов космического пространства [1].

В современных КА функционируют 100–200 тысяч единиц различных ЭКБ (интегральные схемы, транзисторы, диоды, реле, конденсаторы, резисторы и т.д.), которые должны обеспечивать надежную длительную работоспособность бортовых систем. Обеспечение надежности ЭКБ в течение САС КА является сверхважной научной и практической задачей.

Повышение надежности и срока активного существования КА на основе развития методов прогнозирования работоспособности, обеспечения качества и надежности ЭКБ в КА длительного функционирования

позволит решить важную научную и хозяйственную задачу обеспечения аппаратуры космического и другого специального назначения ЭКБ с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также повысить эффективность её применения.

Одной из важных задач при работе над повышением надежности космических аппаратов и увеличения срока их службы является выявление однородных партий электрорадиоизделий, поставляемых изготовителем. Кроме того, выделение однородных партий и проведение разрушающих тестов над выбранными элементами из каждой такой однородной партии ведет к повышению качества и достоверности результатов разрушающих тестовых испытаний. Задача выявления по данным тестовых испытаний однородных партий может быть решена как задача разделения смеси сферических гауссовых распределений с применением EM-алгоритма с жадной агломеративной эвристикой [2]. Основные характеристики долговечности в условиях воздействия факторов окружающей среды, в том числе факторов космического пространства, определяются в процессе производства. В комплектации КА используются ЭКБ высшего качества, существующего на сегодняшний день в РФ (ВП, ОС). Затем проводится работа по индивидуальной отбраковке потенциально ненадежных компонентов, не удовлетворяющих ужесточенным требованиям КА.

Российские производители ЭКБ производят продукцию, которая зачастую не удовлетворяет требованиям космического уровня качества. В связи с чем работа с производителями по выпуску партий ЭКБ для космической промышленности (спецпартий) является актуальной. Для формирования дополнительных требований к спецпартиям предложено провести по американским стандартам [3] и в соответствии с требованием стандартов РФ сравнительный анализ последовательности испытаний для полупроводниковых приборов [4] и интегральных схем космического применения.

Выявлены три основных отличия: оценка дрейфа параметров отдельных электрорадиоизделий в ходе дополнительных отбраковочных испытаний и контроль посторонних частиц в подкорпусном пространстве (PIND). При этом уровень качества «Space» выдвигает еще одно важное требование: партия уровня качества «Space» должна быть изготовлена из единой партии кремниевого сырья, без чего не обеспечивается возможность распространить результаты тестирования на наличие посторонних частиц на всю партию. Данное требование российскими стандартами не предусмотрено и технологическим процессом заводов-изготовителей не обеспечивается. В связи с этим весь необходимый комплекс тестовых испытаний, включая оценку дрейва и тестирование PIND, проводятся в испытательном техническом центре АО «ИТЦ-НПО ПМ». Таким образом, поставляемая спецпартия – совместный продукт производителя и АО «ИТЦ-НПО ПМ». Данное предприятие занимается комплектованием спутниковых систем и других объектов с длительным сроком активного существования и повышенными требованиями надежности электронной компонентной базой соответствующего качества.

Требования космической отрасли делают невозможной комплектацию бортовых электронных систем без серьезного изменения бизнес-процесса изготовления ЭКБ. Если требования контроля PIND и оценки дрейфа параметров в ходе неразрушающих испытаний электрорадиоизделий уже сейчас успешно реализуются в АО «ИТЦ НПО-ПМ», то требование строгой однородности партий по условиям производства и исходному сырью невозможно реализовать без глубокой перестройки существующих процессов с использованием технологий интеллектуального анализа данных. В ИТЦ-НПО ПМ с этой целью разработана и успешно реализована программно-аппаратурная система контроля и испытаний ЭКБ, позволяющая выявить потенциально ненадежные и с аномально низкой стойкостью ЭКБ до установки их в аппаратуру. Процент забракования в партиях ЭКБ при проведении ОИ и ДНК для различных классов составляет ~ 10 % от общего числа проверенных, при этом входной контроль проходят без замечаний практически все ЭКБ. Кроме того, специализированный тестовый центр проводит такие операции, как входной контроль (ВК), дополнительные отбраковочные испытания (ДОИ), в основном сводящиеся к многократной электротермотренировке, и разрушающий физический анализ (РФА) отдельных изделий из каждой партии ЭКБ [5].

Поскольку поставщик не гарантирует однородности поставляемых партий продукции, эффективность РФА весьма условна: от каждой партии выбираются случайным образом 2–3 опытных образца, которые проходят РФА. Если партия неоднородна по своему составу и состоит фактически из нескольких производственных партий, некоторые из этих партий с высокой вероятностью не будут подвергнуты РФА, что делает его проведение бессмысленным.

Цель исследования: разработка подхода к организации производства специальных партий электрорадиоизделий космического применения, являющихся аналогом продукции класса Space, путем внедрения технологий интеллектуального анализа данных в процесс отбраковочных испытаний, проводимых в специализированном тестовом центре.

Материалы и методы исследования

В работе проведен сравнительный анализ требований к отечественной продукции и продукции зарубежного производства, соответствующей уровню качества Space. В работе применены методы моделирования бизнес-процессов, методы интеллектуального анализа данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Сложившийся на практике процесс контроля партий ЭКБ космического применения приведен на рис. 1. Совокупность методов контроля качества ЭКБ основана на контроле информативных параметров (выраженных в основном электрическими величинами). При этом предполагается, что отказы бортовой аппаратуры обусловливаются физико-химическими процессами деградации полупроводниковых и других материалов, влияющими на измеряемые параметры.

Применение отбраковочных испытаний обусловливается следующими предпосылками:

– форсированная электрическая нагрузка не должна приводить к появлению новых отказов;

– каждый из видов отбраковочных испытаний направлен на активирование лишь определенных типов дегрессивных процессов.

Минимально необходимый объем ДОИ включает:

– измерение электрических параметров с классификацией по ужесточенным нормам;

– электротермотренировку с классификацией по дрейфу параметров;

– испытания на наличие посторонних частиц в подкорпусном объеме;

– диагностические виды испытаний (контроль побитовых токов, токов потребления по шине питания в момент переключения, m, n-характеристик и др.);

– выборочный разрушающий физический анализ.

Необходимо отметить, что применение в составе ДОИ выборочного РФА у потребителя ЭКБ позволяет значительно лимитировать отбраковочные испытания для выявления отказов, связанных с дефектами кристаллов ИС, со сборкой кристалла в корпусе.

К видам испытаний, которые проводятся на этапе заводских отбраковочных испытаний на ста процентах ЭКБ, относятся проверка герметичности и испытание на воздействие изменения температуры окружающей среды, в том числе под нагрузкой (электротермотренировка). В процессе изготовления после операции герметизации до нанесения на корпус защитных покрытий проводят контроль герметичности [6]. Известно, что для выявления дефектов корпуса проводят испытание на воздействие изменения температуры среды [7].

На заводе-изготовителе при проведении приемосдаточных испытаний проводят испытания на воздействие изменения температуры среды на выборке, которая не подлежит поставке потребителю [8]. Данный вид испытаний относится к разрушающим, в связи с чем опасно не только повредить элемент и отбраковать его, но и внести дефекты, которые могут проявиться при эксплуатации.

Для оценки достаточности принятых мероприятий на этапе ДОИ важна информация о фактической надежности ЭКБ. Оперативность и сама возможность получения такой информации из сферы эксплуатации (с орбиты) чрезвычайно низка, чем обусловлено применение специальных методов прогнозирования надежности ЭКБ.

Выявление однородных партий электрорадиоизделий требует внедрения не просто информационных технологий, которые в ОАО «ИТЦ – НПО ПМ» весьма активно применяются практически на всех участках работы, но и методов интеллектуального анализа данных. Применение этих методов позволит приблизиться к уровню качества, аналогичному уровню «Space» за счет гарантированной однородности тестируемых партий.

Формирование выборок должно производиться из ЭКБ, прошедших ДОИ и РФА, так как после этих процедур отсеиваются экземпляры, не удовлетворяющие требованиям к аппаратуре, и результаты оценки не искажаются изделиями с потенциальными дефектами.

Кластеризация – выявление однородных групп ЭКБ – важна с точки зрения обеспечения надежности и, в еще большей степени, радиационной стойкости, которая, в свою очередь, сильно зависит от флуктуаций технологического процесса и числоты кремниевого сырья, из которого изготовляется партия. Ионизирующие излучения как физический фактор космической среды во

многом определяют срок активного существования космических аппаратов [9]. При оценке радиационной стойкости кластеров ЭКБ однотипной продукции необходимо ориентироваться на требования ГОСТ РВ 20.39.414.2.

Современные методы кластерного анализа предлагают широкий выбор средств выявления разнородных по совокупности параметров групп. Наиболее распространенным из подобных методов является метод к-средних (k-means) [10]. Алгоритмы, реализующие данный метод, являются алгоритмами глобальной оптимизации и зависят от выбора начальных значений (усредненных параметров центров групп – кластеров). В то же время метод выявления различных по параметрам групп изделий должен давать воспроизводимые результаты. Существенно повысить точность методов классификации позволяют алгоритмы, предложенные в [2, 11], которые могут стать основой автоматизированной системы по выявлению различных по параметрам групп изделий.

ОАО «ИТЦ – НПО ПМ» проводит контроль партий ЭКБ согласно схеме на рис. 1, минуя решение задачи обеспечения однородности партий ЭКБ, поскольку, несмотря на высокий уровень автоматизации всех процессов и информатизации, не имеет инструментальных средств контроля однородности партий. Таким образом, все, что компания может сделать для повышения качества ЭКБ, – выполнять контроль отдельных экземпляров ЭКБ по ужесточенным требованиям. Целью же компании является организация процесса формирования партий ЭКБ, близких по своим характеристикам к уровню качества Space, что невозможно без внедрения инструментов контроля однородности.

В нашем случае дальнейшее увеличение количества выполняемых тестов над ЭКБ и ужесточение и без того чрезмерных требований к ним лишь повысит процент отбраковки, не влияя радикально на качество продукции. Требуется внедрение принципиально нового процесса.

Задача выявления однородных партий ЭРИ по своей сути является задачей кластеризации – обучения без учителя [2]. При этом исходными данными для этой задачи могут являться данные неразрушающего тестирования (ДОИ и электротермотренировки).

Отметим, что наиболее популярная процедура кластеризации – k-means – является крайне неустойчивой к выбору начального решения. Гораздо более стабильные результаты достигаются с применением алгоритмов [11]. Разбиение эталонной сборной партии ЭКБ, состоящей из двух эталонных, с применением данных методов дает весьма точные результаты [6] (таблица).

Результаты разбиения экзаменационных выборок ИС

Показатель	ИС 140УД25АС1ВК	ИС 140УД17АВК
Партия № 1	30	26
Партия № 2	26	24
Всего	56	50
По результатам работы алгоритма классификации		
Партия № 1	27	26
Партия № 2	26	24
Неклассифицированные	3 (8,9%)	0 (0%)
Ошибочные	0	0

Таким образом, методы, предложенные в [11], являются достаточными для решения нашей задачи выявления однородных партий ЭРИ, которая, в свою очередь, является необходимым этапом процесса формирования специальных партий ЭКБ.

Далее опишем внедряемый в настоящее время процесс формирования специальной партии с применением методов кластерного анализа однородности. Предложенные методы в [11], а именно – MDS-визуализация состава партии и применение критерия силуэта, также позволяют определить количество однородных партий в составе сборной партии.

Обновленная BPMN-схема принятия решения о приемке спецпартии изображена на рис. 2.

Основным отличием от схемы на рис. 1 является построение модели однородной партии ЭРИ на основе данных проведенных неразрушающих тестов, реализация этой модели выявления однородных партий с дальнейшим анализом результатов. Как видно из схемы, на РФА по отдельности отправляются выбранные экземпляры из каждой однородной партии-кластера,

что обеспечивает полный PIND-контроль и другие виды разрушающего физического анализа образцов из всех фактических производственных партий и приближает партии на выходе процесса к уровню качества Space. В [11] показано, что применение методов контроля однородности снижает вероятность необнаружения дефектов, выявляемых при РФА, с 40 % до 10 % для сборной партии, состоящей из трех однородных партий.

Более того, такой подход позволяет обеспечить дополнительной информацией лицо, принимающее решения при приемке партий и при направлении их экземпляров на разрушающий физический анализ.

Выводы

Отметим, что схема на рис. 2 не требует внедрения никаких дополнительных видов контроля каждого из экземпляров ЭРИ: данные неразрушающего тестирования являются не только достаточными, но и избыточными для выявления однородных партий методами интеллектуального анализа данных. При этом существенно меняется порядок выполнения задач по контролю ЭРИ. В новой схеме меняется порядок отбора элементов для проведения РФА. Предусмотрен случай, когда для принятия решений об однородности/неоднородности партии недостаточно данных – в этом случае вся информация предоставляется заказчику, который принимает решение, принимать ли такую партию, которая в этом случае заведомо не соответствует уровню качества Space. При этом качество продукции на выходе остается прежним – как было до перестройки процесса, но такое положение вещей теперь является исключительной ситуацией, а не нормальным течением процесса.

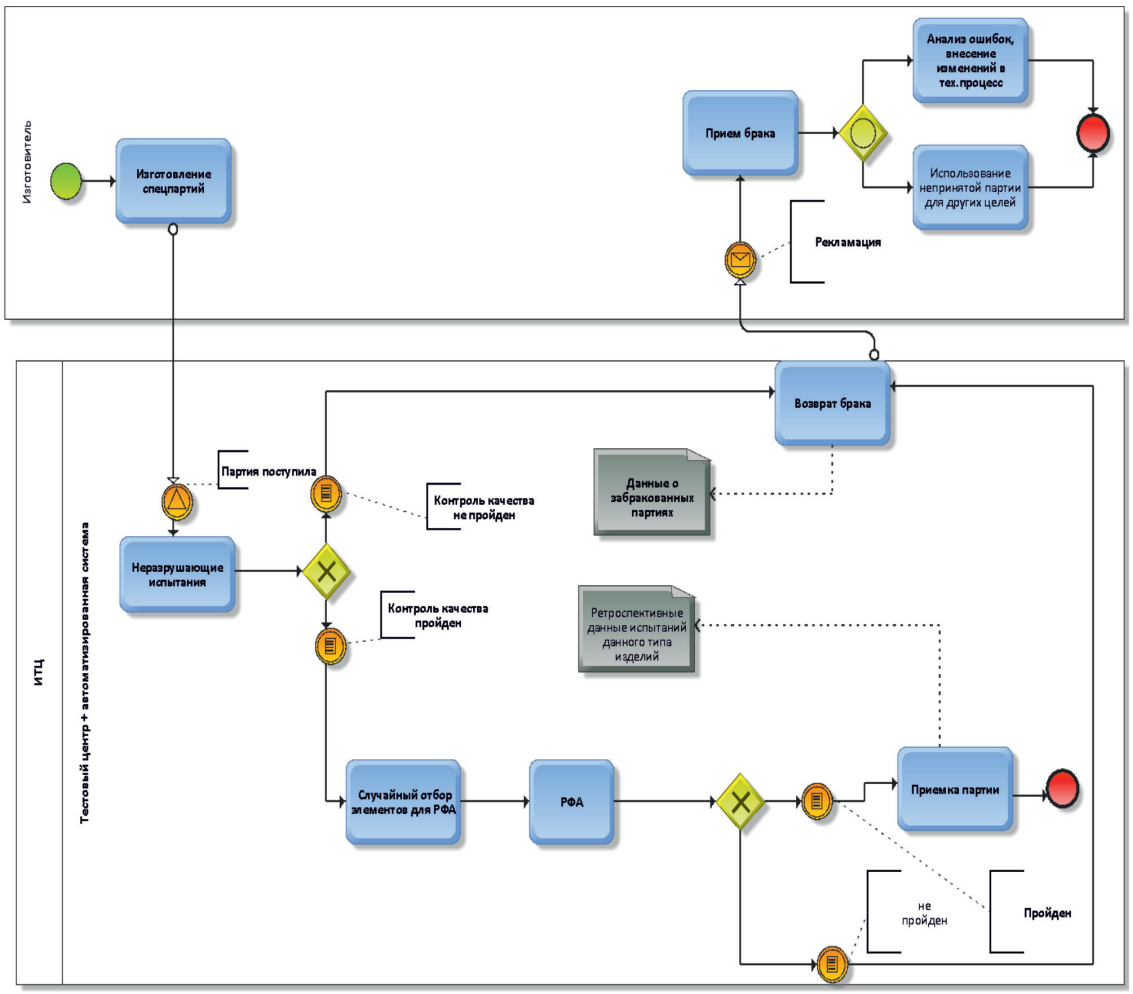

Рис. 1. Схема сложившегося бизнес-процесса контроля партий ЭКБ космического применения

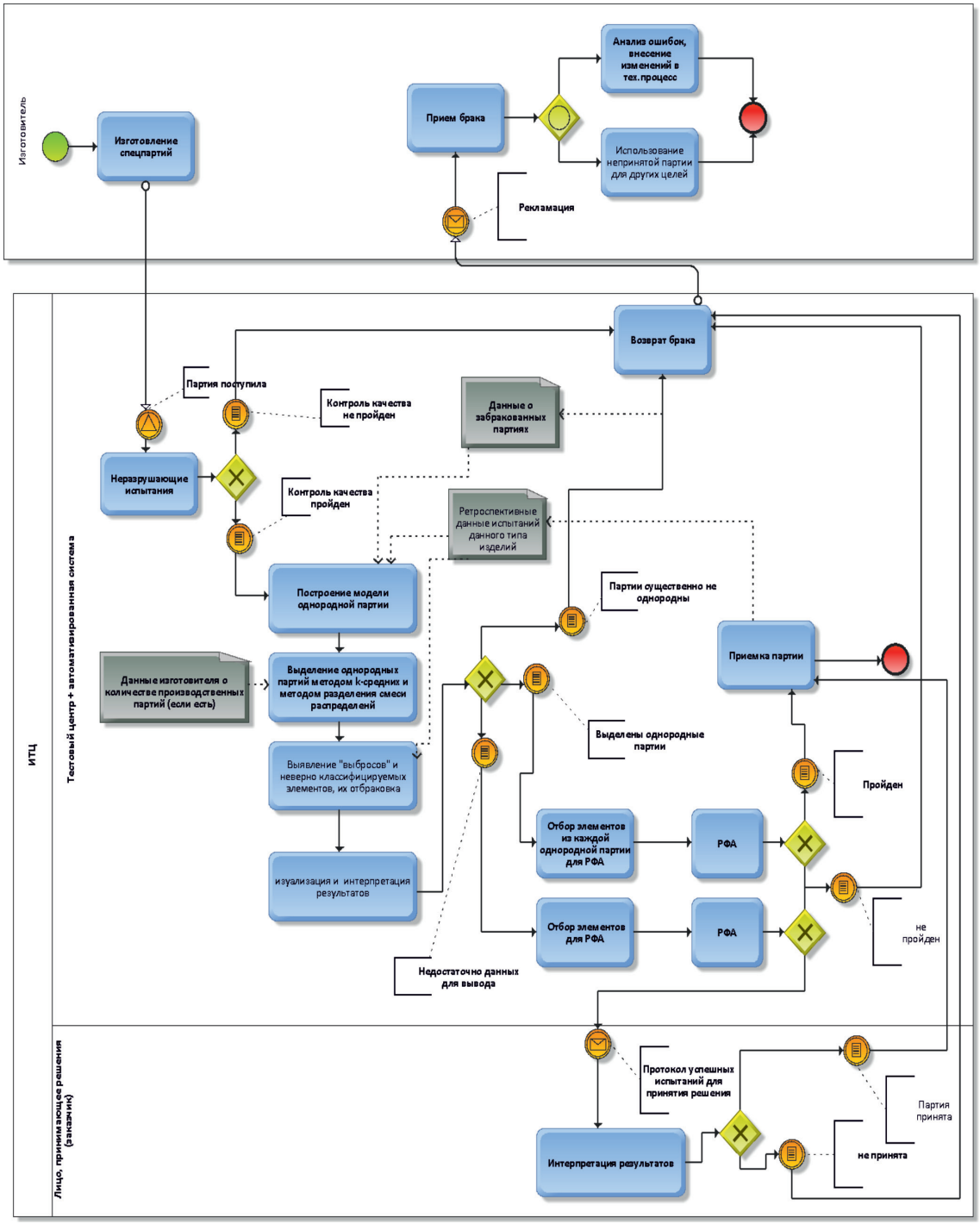

Рис. 2. Обновленная BPMN-схема процесса формирования спецпартии электронной компонентной космического применения (ЭКБ)

Заключение

Таким образом, в статье представлен новый процесс формирования специальных партий ЭКБ специального назначения из продукции отечественного производства, обеспечивающий качество продукции, близкое к уровню качества Space. Рассмотрены основные аспекты обеспечения качества ЭКБ специального назначения. Показано, что анализ партий ЭКБ на однородность становится актуальной задачей. Особенно для ЭКБ с высоким уровнем слияния, где отклонения технологического процесса

могут привести к существенным ошибкам в оценке качества и физических характеристик ЭКБ. Показано, что создание спецпартий с применением методов контроля однородности партий – путь к достижению параметров партий ЭКБ, близких по своим характеристикам к уровню качества Space.

Список литературы

1. Федосов В.В. Вопросы обеспечения работоспособности электронной компонентной базы в аппаратуре космических аппаратов. Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2015. 65 с.

2. Казаковцев Л.А., Сташков Д.В., Рожнов И.П., Казаковцева О.Б. Дальнейшее развитие метода жадных эвристик для задач автоматической группировки объектов // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 4 (70). С. 34–40.

3. Горлов М., Строгонов А., Шацких Д. Технологические тренировки интегральных схем // Компоненты и технологии. 2009. № 4. С. 196–199.

4. Надежность электрорадиоизделий. Справочник. МО России. 2006. 641 с.

5. Лукьяненко М.В., Чурляева Н.П., Федосов В.В. Надежность изделий электронной техники в аппаратуре космических аппаратов. Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2016. 185 с.

6. ГОСТ Р 57394-2017 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность. М.: Стандартинформ, 2017. 42 с.

7. Горлов М.И., Данилин Н.С. Физические основы надежности интегральных схем. М.: МАКС Пресс, 2008. 404 с.

8. ОСТ В11 0998-99. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. Изд-во Минобороны, 1999. 139 с.

9. ОТ 510-5608-05. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности и готовности к целевому использованию космических аппаратов народнохозяйственного назначения по результатам изготовления и эксплуатации в 2005 году. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2005 гг. Железногорск: НПОПМ, 2005. 176 с.

10. Bahmani B., Moseley B., Vattani A., Kumar R., Vassilvitskii S. Scalable K-means++. Proceedings of the VLDB Endowment. 2012. P. 622–633.

11. Орлов В.И., Федосов В.В., Казаковцев Л.А., Масич И.С., Проценко В.В., Сташков Д.В. Алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений по отбору изделий микроэлектроники для космического приборостроения [под общ. ред. В.И. Орлова]. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017. 225 с.