УДК 519.7+681.51

Т.Л. Качанова, К.А. Туральчук

МЕТОД ОТБРАКОВКИ НЕГОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ФИЗИКИ СИСТЕМ

Разработан набор правил, позволяющих отбраковывать негодные изделия по значениям всех параметров производственного процесса. Базой для построения правил служит системное знание, автоматически извлекаемое технологиями физики открытых систем из данных измерений процесса.

Физика систем, технологии генерации системного знания, правила классификации, модель идентификации

В области производства полупроводниковых изделий важной задачей является идентификация годных и негодных изделий. Современные полупроводниковые производства оснащены оборудованием, позволяющим осуществлять мониторинг на разных этапах технологического процесса. Число измеряемых показателей может достигать сотен и тысяч. Решение задачи своевременного обнаружения негодных изделий требует анализа многомерных массивов данных, выявления доминирующих факторов, определяющих надежность полупроводниковых изделий (ППИ), установления перечня параметров, обеспечивающих индивидуальную оценку их годности.

Решение задачи связано с разработкой модели идентификации классов ППИ, позволяющих с достаточной точностью различать изделия приемлемого и неприемлемого качества. Основные требования к модели идентификации: минимальный набор показателей, точность и надежность классификации, простая форма представления.

Наибольшее распространение при автоматической идентификации получили методы классификации (статистические методы, деревья решений, байесовские модели, искусственные нейронные сети). Применение таких методов затруднено большим числом показателей (сотни и тысячи), неравной представительностью объектов разных классов пригодности (в пропорции 1:10 и меньше). В статье решение задачи идентификации ППИ получено на базе системного знания, сгенерированного технологиями физики открытых систем (ФОС) [1] – [4].

Задача идентификации годных и негодных ППИ решена применительно к системе данных SECOM (представлена McCann et al [5]; находится в открытом доступе). Общее число изделий – 1567, из них 104 – ненадлежащего качества. Число измеряемых показателей – 561. Показатели с неизменными значениями не рассматривались (всего таких показателей – 87). Для решения задачи использовано 474 показателя. В системе данных отсутствует информация о предметных описаниях показателей и технологических этапах, на которых производились измерения их значений.

Системное знание о производственном процессе раскрывает внутренние закономерности, характеризующие этот процесс как единую целостную систему. Системное знание также содержит в себе знание о внутрисистемных механизмах, ответственных за формирование качества ППИ, оцениваемое множественными показателями. Идея метода решения задачи идентификации пригодности ППИ заключается в генерации полного системного знания о процессе, выделении той части знания, которая обеспечивает решение проблемы, оформлении полученного решения.

Построение модели идентификации годных и негодных ППИ осуществляется за три этапа, каждый из которых состоит из последовательности шагов (рис. 1).

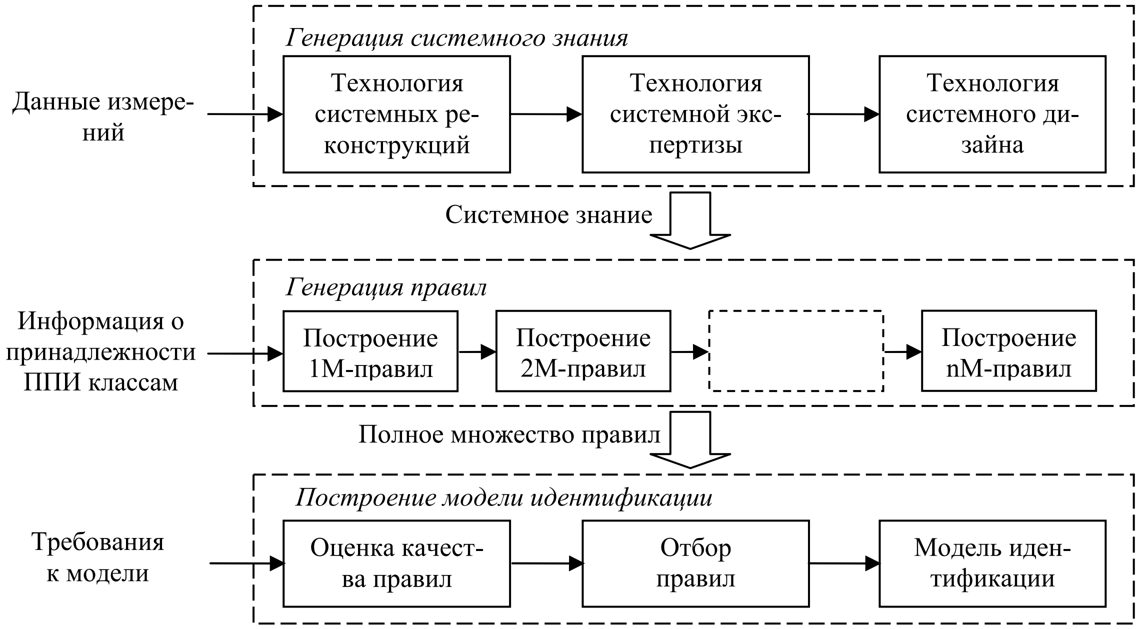


Рис. 1

На первом этапе работают технологии аналитического ядра ФОС [6], извлекающие из данных измерений производственного процесса системное знание в виде реконструктивных семейств формальных моделей механизмов системогенеза и состояний исследуемой производственной системы.

Технология системных реконструкций порождает полное множество системных моделей, раскрывающих внутреннее разнообразие присущих системе качеств и механизмы их системной организации. Технология системной экспертизы характеризует системные модели с позиций их применимости для различения годных и негодных изделий. Технология системного дизайна строит научные реконструкции состояний объектов наблюдения (ППИ), объясняющие системные закономерности их формирования, детерминирующие изменчивость наблюдаемых показателей.

Системное знание извлекается из совокупности описаний ППИ, содержащих числовые значения их свойств, измеренных на всех технологических этапах производства. Для построения формальных системных моделей отобраны 425 из 474 показателей (49 показателей исключены в связи с их структурным подобием и системной идентичностью). При генерации знания не использована информация о классе изделия (годен/не годен). Технологии ФОС производят системное знание о свойствах и различающих признаках всех ППИ. Это знание представлено семейством моделей форм воплощения эталонов системы и реконструкциями состояний объектов наблюдения.

Каждая *модель форм воплощения эталона* воспроизводит структурный инвариант, выражающий различные формы реализации в наблюдениях какого-то одного уникального качества системы. В каждой модели форм воплощения определены: ключевые показатели; системные роли показателей; оценки значимости показателей; допустимые области значений показателей; кластер объектов наблюдения, выступающих носителями раскрытого системного качества; оценки степени интенсивности воплощения эталона в объектах кластера.

Реконструкции состояний выступают носителями знания о состояниях производственного процесса и его эмерджентных свойствах в этих состояниях. Состояния процесса раскрываются в реконструкциях через механизмы, характеризующие и детерминирующие эти состояния. Реконструкция каждого конкретного состояния задает системно обусловленные уровни значений всех его показателей, наделяет показатели атрибутами предопределенности, важности, подвижности.

Для базы SECOM получено 1445 моделей форм воплощения эталонов системы. Большое число моделей свидетельствует о значительной неоднородности данных измерений, выражающей многообразие внутрисистемных механизмов, объясняющих изменчивость показателей ППИ.

Для базы SECOM построены реконструкции состояний всех ППИ. Один объект наблюдения (один отдельно взятый ППИ) в среднем является носителем 109 различных системных качеств производственного процесса как системы. Множество системных качеств характеризует сложность задачи идентификация пригодности объекта оценивания.

На втором этапе разрабатывается полное множество классификационных правил, посредством которых устанавливается класс годности каждого ППИ в имеющейся системе данных. Для построения правил используется системное знание с привлечением информации о принадлежности ППИ тому или иному классу.

Каждая модель форм воплощения эталона системы задает определенную *область в признаковом пространстве системы*, координаты которой отвечают ключевым показателям модели. Эта область включает объекты, принадлежащие *кластеру модели*. Ключевые показатели модели характеризуют внутреннюю общность объектов кластера через *системный механизм*, свойственный только этим объектам.

Если модель форм воплощения эталона соответствует объектам только одного класса годности, то она прямо выражает характерные черты этого класса и может напрямую быть использована для идентификации этого класса ППИ. Классификационное правило (правило класса 1М), генерируемое на базе такой модели, содержит логическое выражение для ключевых показателей модели. Логическое выражение состоит из логических операций, связывающих операции отношений, задающих ограничения на допустимую область изменчивости показателей.

Если модель форм воплощения эталона соответствует объектам разных классов годности, то использование показателей только этой одной модели недостаточно для построения правила. На множестве реконструкций состояний выявляются наборы моделей форм воплощения эталонов (двойки, тройки моделей и т.д.). Набор моделей служит основой для построения классификационных правил (правил классов 2М, 3М и т.д.), если для моделей этого набора можно построить область признакового пространства, охватывающую объекты только одного класса годности. Условием построения области служит *полная согласованность по уровням значений ключевых показателей моделей, как в пределах набора, так и в реконструкциях состояний объектов, принадлежащих этой области*. Уровни значений показателей (H – высокий, L – низкий) устанавливаются независимо для каждой отдельно взятой модели. В реконструкции состояния каждого ППИ показатели получают уровень значения как результат согласованного взаимодействия всего множества внутрисистемных механизмов, раскрытых для этого состояния. Итоговое ограничение на область изменчивости каждого показателя в реконструкции устанавливается исходя из *требования минимального размера области признакового пространства*. *Классификационное правило* для набора включает логическое выражение для всех ключевых показателей моделей из этого набора. В табл. 1 представлено соответствие уровней и границ допустимой изменчивости восьми показателей для набора из класса 2М, построенного на основе двух моделей форм воплощения эталонов с именами P5_2 и P9_3.

Таблица 1

Ключевые показатели	Модель P5_2			Модель P9_3			Уровень в реконструкции	Итоговое отношение
	Уровень	Отношение	Вес	Уровень	Отношение	Вес		
P9	–	–	–	L	<=1.44	1	L	<=1.44
P5	H	>=1.39	1	–	–	–	H	>=1.39
P418	H	>=8.142	0.9	H	>=8.142	0.9	H	>=8.142
P453	H	>=5.584	0.898	H	>=4.911	0.888	H	>=5.584
P145	H	>=0.107	0.9	H	>=0.119	0.9	H	>=0.119
P280	H	>=0.037	0.9	H	>=0.037	0.9	H	>=0.037
P181	H	>=18.69	0.9	H	>=17.46	0.84	H	>=18.69
P31	L	<=0.187	0.899	L	<=0.2	0.785	L	<=0.187

В табл. 2 представлены результаты второго этапа.

Таблица 2

Оценки класса правил	Класс правил			
	1М	2М	3М	Всего
Число правил	6	1215	3780	5001
Число ППИ 1-го класса	98	1365	–	1463
Число ППИ 2-го класса	0	0	104	104

Правила классов 1М и 2М охватывают 1463 объектов (94%). Все такие объекты относятся к 1-ому классу годности ППИ. Для идентификации ППИ второго класса требуются правила класса 3М. Их достаточно для идентификации всех объектов 2-ого класса годности (6%). Эти факты свидетельствуют о бо́льшем разнообразии внутрисистемных механизмов, объясняющих изменчивость показателей негодных ППИ. Примеры классификационных правил приведены в табл. 3.

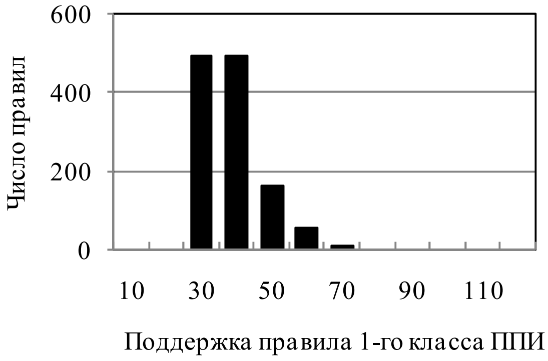
Таблица 3

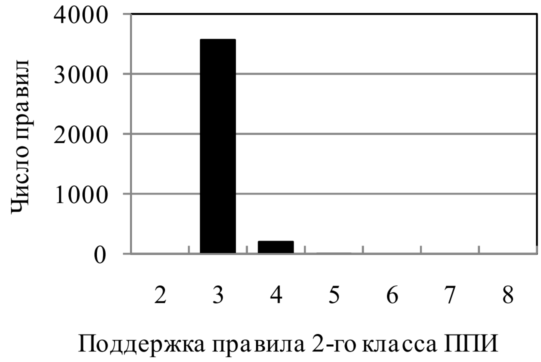
Классификационное правило	Класс правил	Класс ППИ	Точность правила	Поддержка правила	Длина правила
P544 >0.0078 & P9 <=1.5149 & P239 <=0.0056 & P240 <=0.0043 & P378 <=0.0014 & P85 <=0.1362	1M	1	1.0	97	6
P543 >=0.1075 & P549 <=74.032 & P133 <=2.349 & P544 >=0.0078 & P184 <=30.306 & P320 <=9.1321 & P456 <=4.1185 & P491 <=47.5376 & P469 >=54.5 & P475 >=27.4138 & P219 <=3.63 & P74 >=466.1976	1M	1	1.0	19	12
P544 <=0.0078 & P9 >=1.412 & P239 >=0.0038 & P240 >=0.0046 & P378 >=0.002 & P85 >=0.1299 & P558 <=1.525 & P418 <=7.3735 & P280 <=0.0371	2M	1	1.0	42	9
P29 >69.15 & P377 <0.0016 & P378 <0.0015 & P46 >136.3836 & P52 <183.2842 & P286 <1.8747 & P151 <6.94775	2M	1	1.0	26	7
P209 >73.2395 & P59 >4.5727 & P367 >0.0043 & P491 <48.5571 & P76 >-0.0063 & P135 >38.9026 & P363 <0.0125 & P588 >0.0148 & P164 >0.12	3M	2	1.0	4	9
P22 >-5523.25 & P435 >10.19315 & P393 >0.0049 & P527 >0.658775 & P497 <25.82115 & P363 <0.01855 & P225 <0.0398 & P494 <2.5291 & P523 >10.18115 & P389 >24.38232 & P360 <0.0229 & P388 <=0 & P91 <9065.17 & P298 <819.6416 & P163 <1782.5 & P205 >0.1142 & P341 >0.0346 & P568 >0.0382 & P204 <33.506 & P570 >15.4662 & P563 <264.272	3M	2	1.0	3	21

Основными характеристиками классификационных правил являются: *поддержка правила* – число объектов, соответствующих всем условиям, входящим в правило, *точность правила* – доля объектов доминирующего класса от общего числа объектов, соответствующих условиям правила, *длина правила* – число показателей, участвующих в идентификации. При формировании правил учитываются следующие критерии: поддержка правила не меньше установленного порога (разного для различных классов в связи с неравномерностью представительности объектов в классах); точность правила (100%).

На третьем этапе для каждого правила вычисляется итоговая оценка – *сила правила*, учитывающая: поддержку правила; оценку качества модели, на базе которой построено правило; среднюю оценку выраженности модели в объектах, соответствующих правилу. Итоговые оценки силы правил используются для ранжирования правил и для сокращения полученного полного множества правил.

Применение полного множества правил (5001) обеспечивает идентификацию всех объектов с точностью классификации, равной 1.0. При этом для объектов первого класса выявляется в среднем 32 классификационных правила, для объектов второго класса – 111. На рис. 2 представлено распределение классификационных правил по величине поддержки для первого (рис. 2, *а*) и второго (рис. 2, *б*) классов ППИ.

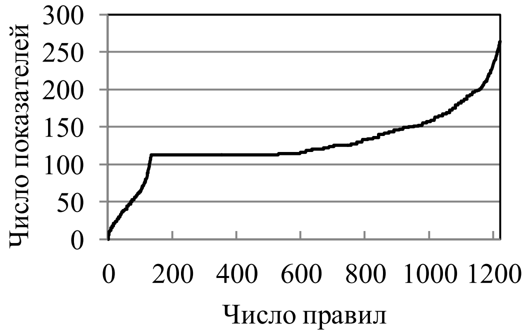


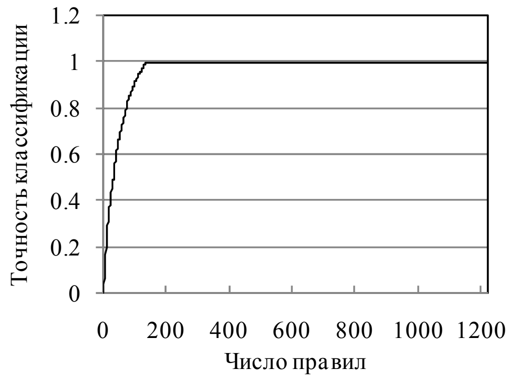


а *б*

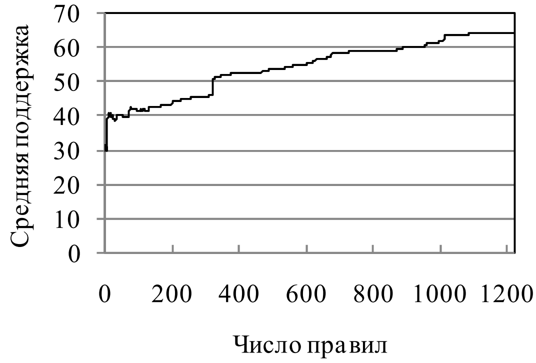
Рис. 2

Отбор правил осуществляется с целью уменьшения числа показателей, участвующих в процедуре идентификации. Алгоритм отбора заключается в последовательном исключении правил из набора, построенного на втором этапе для каждого класса ППИ. На каждом шаге алгоритма по реконструкциям состояний устанавливается правило, удаление которого из полного набора правил приводит к уменьшению общего числа показателей в наборе, но не уменьшает число верно идентифицированных объектов.





а *б*



в *г*

Рис. 3

В результате работы алгоритма отбора найдено минимальное число показателей (109), обеспечивающих однозначную классификацию объектов первого класса. Число классификационных правил в этом случае равно 133. На рис. 3 представлены графики зависимости от числа правил: числа показателей в таких наборах правил (рис. 3, *а*); точности классификации, обеспечиваемой такими правилами (рис. 3, *б*); среднего числа правил на один ППИ (рис. 3, *в*); средней поддержки правил на объект (рис. 3, *г*). На рис. 4 представлены графики аналогичных зависимостей, построенных для второго класса ППИ.

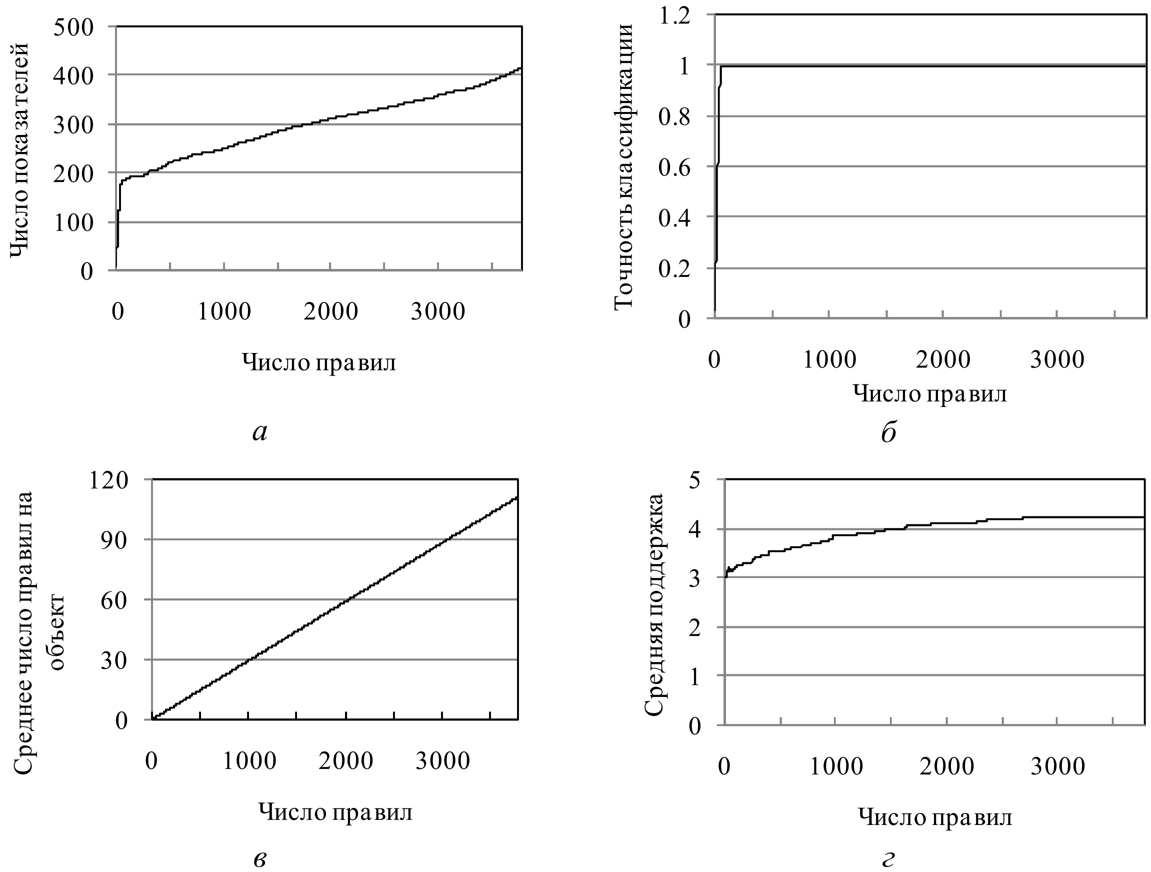


Рис. 4

На базе отобранных правил построена итоговая модель идентификации годности ППИ и процедура ее применения. В табл. 4 представлены общие характеристики этой модели.

Таблица 4

Характеристики модели идентификации	Класс 1 ППИ	Класс 2 ППИ
Число классификационных правил	133	50
Число показателей, участвующих в правилах	109	188
Средняя длина правила	6	13
Среднее число правил, соответствующих объекту	3	1.5
Среднее поддержка правил, соответствующих объекту	42	3
Среднее число показателей, участвующих в идентификации объекта	19	19
Минимальная поддержка по правилам, соответствующим объекту	25	3

Отбраковка ППИ осуществляется на базе модели идентификации классов годности ППИ. Построение модели идентификации выполнено на базе системного знания о процессе производства ППИ, выраженного через данные мониторинга процесса. Системное знание автоматически генерируют технологии ФОС по данным мониторинга. Методы ФОС преодолевают размерность и гетерогенность исходной системы данных. Эти методы раскрывают внутренние структуры отношений и объясняют системные механизмы формирования изменчивости показателей производственного процесса.

Предложенная модель идентификации позволяет установить: минимальный набор показателей; необходимый и достаточный набор правил, обеспечивающих надежную идентификацию каждого класса годности ППИ. Модель идентификации представляется в удобной для использования форме – в виде структурированного набора классификационных правил и простой процедуры их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fomin, Boris F., Kachanova, Tamara L. Physics of Systems is a postcybernetic paradigm of systemology // Intern. Sympos. “Science 2.0 and Expansion of Science: S2ES” in the context of The 14th World-Multi-Conference “WMSCI 2010”, June 29th–July 2nd, 2010 / Orlando, Florida, USA. P. 244–249.
2. Качанова, Т.Л., Фомин, Б.Ф. Физика систем – посткибернетическая парадигма системологии // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №3 (121) 2011. С. 29–36.
3. Fomin, Boris F., Kachanova, Tamara L. Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge // The 3rd International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2012, IIIS, March 25th-28th, 2012 / Orlando, Florida, USA. P. 41–48.
4. Качанова, Т.Л., Фомин, Б.Ф. Физика открытых систем: генерация системного знания // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2-1 (147) 2012. С. 291–299.
5. McCann, M., Li, Y., Maguire, L., Johnston, A. Causality challenge: benchmarking relevant signal components for effective monitoring and process control // Proc. JMLR Workshop, December 12, 2008 / Canada, 2008. P. 277–288.
6. Качанова Т.Л., Фомин Б.Ф. Методы и технологии генерации системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.

T. L Kachanova., K.A. Turalchuk

METHOD FOR REJECTING THE DEFECTIVE SEMICONDUCTOR PRODUCTS ON THE BASE OF THE TECHNOLOGIES OF PHYSICS OF SYSTEMS

Set of the rules, which allow rejecting defective products in accordance with the values of all parameters of the production process, is developed. The system knowledge automatically taken by the technologies of Physics of Open Systems from these measurements of the process is the base for constructing the rules.

Physics of systems, technologies of system knowledge generation, classification rules, identification model