

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

УДК 681.5

DOI: 10.17587/it.26.116-127

Ю. Б. Кузьмин, аспирант, e-mail: info@data-analytic.org,
ИПУ РАН, Москва

Шкалирование уровня автоматизации на производстве

Статья посвящена обзору проблемы оценки уровня автоматизации в зарубежной и отечественной литературе. Даны классификация задач автоматизации и сравнительная характеристика некоторых шкал — их сходство и различие. Приводится ряд стандартов и методов определения уровня автоматизации в сравнении с классической шкалой Т. Шеридана и В. Вепланка, с другим типом оценки — вектором приоритетов коэффициента автоматизации K_a . Обсуждается уровень автоматизации для систем технологических процессов, бизнес-процессов, подготовки производства и др. Рассматривается принцип объединения шкал с различными классами задач автоматизации и дальнейшее исследование в целях оптимизации уровня автоматизации в зависимости от стоимости и других показателей производства. Отмечена возможность дальнейшего исследования при формализации различных процессов производства и учета уровня автономности динамических систем.

Ключевые слова: уровень автоматизации, LOA, коэффициент автоматизации, степень автоматизации, шкала автоматизации, шкала Т. Шеридана и В. Вепланка, классификация автономности

Введение

Проблема оценки уровня автоматизации недостаточно раскрывается на страницах русскоязычной печати, хотя в иностранной литературе этому вопросу уделяется немало внимания в журналах, монографиях и книгах. Существует постоянное развитие этого понятия, начиная с середины прошлого века, когда Р. М. Fitts в 1951 г. обратил внимание на распределение задач между человеком, машиной и компьютером — отмечается в обзорной работе "Levels of Automation in Manufacturing" [1]. С 1978 г. за рубежом получила широкое распространение десятиуровневая шкала Т. Шеридана и В. Вепланка (ШиВ) [6], также другими исследователями рассматриваются шкалы как с более, чем десятью уровнями, так и с меньшим числом уровней [1]. Немаловажным моментом является создание новых методик и подходов для расчета уровня автоматизации в различных сферах деятельности. В настоящий момент некоторые организации, одна из них международная — сообщество автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE), уже стандартизовали шесть уровней автономности (Standard J3016) [2], так как понимание уровня автоматизации (уровня автономности) опреде-

ляет класс выпуска автоматизированных или автоматических машин, это становится неотъемлемой частью производства для автомобилестроения, аэрокосмической индустрии и др.

Среди стандартов также есть упоминания об уровне автоматизации при проектировании (в ГОСТ 23501.108—85) и об уровне автоматизации технологических процессов в ГОСТ 23004—78 (ГОСТ 14.309—74 — старая версия) [7, 14], где приведены числовые оценки для восьми уровней и даны краткие методические пояснения по расчету. В отечественной литературе часто встречается понятие коэффициента автоматизации [17, 18].

В РФ в связи с уменьшением производства, отсутствием комплексного перевооружения предприятий и, как следствие, отсутствием аудита программно-технических средств (ПТС) и исследований автоматизации с количественными результатами такие оценки и методики не очень востребованы. В академической среде такие исследования не прекращались, так как вопросы модернизации на основе оценки текущего и планируемого состояния систем подразумевают эффективное использование ресурсов, более четкую постановку целей и, в конечном итоге, конкретное отражение изменения заданных показателей с обоснованием

повышения эффективности. Для системы автоматизированной технологической подготовки производства (ТПП) российские исследователи предлагают метрики в пространстве автоматизации (ПА) по трем координатам, позволяющие всесторонне оценивать проект системы по числу автоматизируемых задач, объемам видов обеспечения и этапам проекта [3]. Для систем управления производством в общепринятых нотификациях применяется оценка уровня автоматизации бизнес-процессов [4], в работе [12] приводится описание информационной модели АСУ ТП в диаграммах UML-нотаций [12]. Для оценки уровня автоматизации иерархических систем управления, в частности на производстве для систем АСУ ТП, используется расчетный показатель K_a [5], а для автоматизированных информационных систем (АИС) — интегральный показатель [24].

В настоящее время отраслевыми холдингами часто применяются свои разработанные стандарты, но, как правило, решения о выборе автоматизированной системы принимаются на интуитивном уровне при рекламной поддержке производителями своих разработок, а не на основании сравнительных характеристик предлагаемых продуктов. Формальные методы оценки с применением ранжирования, а тем более количественные шкалы — интервальные, отношений и др. — используются крайне редко. Хотя шкалы с более возможными допустимыми (математическими) преобразованиями отражают более высокий уровень измерений и учитывают не только то, в каком отношении находятся измеряемые объекты, но и степень их различия [22, 23]. Тип шкалы также предопределяет, какие методы статистического анализа можно будет использовать [23]. Более того, такого рода градации используют как атрибуты для векторизации данных и дальнейшей обработки.

Поэтому при приближении хотя бы в перспективе производства к цифровым технологиям СЮ-руководителям и ИТ-менеджерам необходимо иметь первоначальный инструмент оценки состояния и влияния на уровень автоматизации как программно-технических средств с описанием когнитивных задач (человек—компьютер), так и механического/технического оборудования с описанием физических задач (человек—машина). Объединение этих понятий в данной работе при шкалировании уровня автоматизации будет являться продолжением работы в этом направлении.

Шкала уровня автоматизации (LOA)

Шкалирование, или оценка уровня автоматизации Level of Automation (LOA), как отмечается в работах [1, 10], исследуется с 50-х годов прошлого столетия многими авторами и основные концепции представлены в работах Т. В. Sheridana, Н. Kerna & М. Schumanna, С. E. Billingsa, М. R. Endsley & D. B. Kabera, Р. Satchella, R. Parasuramana, М. P. Groovera, Т. J. Williamsa.

Уровень автоматизации (LOA) — это распределение физических и когнитивных (информационных) задач между людьми и техникой, описываемое как непрерывный процесс от полностью ручного до полностью автоматизированного [1]. При количественном подсчете уровень автоматизации можно охарактеризовать как формализованную, выраженную числом степень роботизации выполняемых операций или, по-другому, независимость автоматизированного комплекса от человека [4].

В своей работе 1978 г. Т. Шеридан и В. Веспланк (Массачусетский технологический институт) [6] предложили ставшее классическим 10-уровневое шкалирование по уровню компьютеризации и оценивали степень автоматизации в зависимости от того, кто принимает решение, вида операции и того, кто ее выполняет — человек или техническая система/компьютер (табл. 1) [1, 4]. Каждая операция по Т. Шеридану и В. Веспланку (ШИВ) может выполняться в абсолютно ручном режиме человеком — уровень автоматизации "1" или полностью автоматически компьютером (роботизированный режим), без участия человека — уровень автоматизации "10". Промежуточные уровни автоматизации оцениваются от 1 до 10.

Систематизация ШИВ включает вопросы обратной связи, определение и выбор вариантов, связанных с распределением задач между человеком и технической системой, компьютером. Эта шкала также является одной из наиболее подробных классификаций, которые можно найти в литературе с точки зрения определения того, **что** оператор (человек) и техническая система (компьютер для информации и контроля) должны выполнять на разных уровнях LOA, и **как** они должны взаимодействовать [1].

Чтобы сделать производственную систему максимально надежной, необходимо решить вопрос не только о том, как определить правильное функционирование элементов системы при решении определенных задач, но и о том, какие человеческие ресурсы и автомати-

Таблица 1

10 уровней автоматизации (LOA)
по Т. Шеридану и В. Вепланку [1]

LOA	Описание
10	Компьютер решает все и действует автономно, игнорируя человека
9	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если он (компьютер) решит
8	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если компьютер "спросит"
7	Компьютер выполняет операции автоматически, обязательно информируя человека
6	Компьютер предлагает одну альтернативу и выполняет это предложение, если человек в течение ограниченного времени не накладывает вето на автоматическое выполнение операции
5	Компьютер предлагает одну альтернативу и автоматически выполняет это предложение, если человек соглашается
4	Компьютер предлагает одну альтернативу
3	Компьютер предлагает полный набор решений/действий, альтернативы и сужает выбор до нескольких вариантов
2	Компьютер предлагает человеку полный набор решений /действий, альтернативы
1	Компьютер не предлагает помощь: человек должен принимать решения и выполнять все действия сам

зированные элементы могут поддерживать друг друга на разных уровнях автоматизации, чтобы сделать производственную систему максимально удобной и гибкой [1]. К примеру, в случае предоставления оператору ручных или автоматических инструментов (например, гаечного ключа или гидравлического болта) повышается уровень технической поддержки. При дальнейшей замене электрического или гидравлического ручного инструмента машиной или роботом можно достигнуть почти полной автоматизации. Важно понимать, что концепция оценки уровня автоматизации лежит в плоскости понятий: техника—человек—компьютер и учитывает степень их взаимодействия при распределении функций (что делает человек, что машина и как осуществляется контроль).

Автоматизацию в производстве можно разделить на два основных класса: механизацию и компьютеризацию [1, 10]. Под компьютеризацией понимается решение когнитивных (познавательных) задач, возникающих в результате чувственных процессов и умственной деятельности человека. Примером могут быть сбор, хранение, анализ и использование информации для управления производственным

процессом. Механизация аналогично связана с компьютеризацией, но определяется как замена физического труда человека механизмами с преобразованием материала и энергии, а уровень механизации можно определить как технический уровень производственной системы [1]. Механический/физический уровень LOA определяет, **чем** производить, собирать, обрабатывать и т. п., в то время как когнитивный уровень LOA — **как** производить (на нижних уровнях) и как управлять ситуацией (на более высоком уровне) [10]. Рост уровня автоматизации возрастает по мере того, как все больше задач выполняется автоматически. Поэтому по мнению западных исследователей [1, 10] представляется целесообразным выделить следующие уровни автоматизации:

а) автоматизация физических задач, связанных с технологией производства;

б) автоматизация информационных задач контроля, мониторинга и поддержки принятия решений;

в) автоматизация при комбинировании задач (совместное распределение) между машинами/технологией и информированием/контролем человеком.

В РФ не так давно, согласно ГОСТ 23004—78 [7], как уже упоминалось, выделяли восемь категорий механизации и автоматизации технологических процессов в зависимости от диапазона изменений временного уровня механизации средств технологического оснащения (СТО) $K_{\text{СТО}}$ (табл. 2). Расчет базировался на отношении машинного времени ко всему штучному времени (включает основное, вспомогательное

Таблица 2

Категории механизации и автоматизации технологических процессов согласно ГОСТ 23004—78

Номер категории	Наименование категории	Диапазон изменений временного уровня механизации (автоматизации) СТО
0	Нулевая	0 — при отсутствии механизации (автоматизации) процесса
1	Низшая	0,0...0,25
2	Малая	0,25...0,45
3	Средняя	0,45...0,60
4	Большая	0,60...0,75
5	Повышенная	0,75...0,90
6	Высокая	0,90...0,99
7	Завершенная	1,00

и время на обслуживание и отдых). Интерес в этом стандарте представляет тот факт, что устанавливалась взаимосвязь единства двух подсистем: качественных и количественных характеристик.

Очевидно, что рост уровня автоматизации связан и коррелирует с повышением технической поддержки или механического оснащения и с добавлением средств управления. Техническое оснащение автоматизированной производственной системы, к примеру АСУ ТП, которая управляет механическими устройствами технологического процесса (ТП), тесно связано с программно-техническим обеспечением (ПТО) и программно-техническими средствами (ПТС) — функциональностью и числом контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), которые непосредственно связаны с оборудованием. Какая это связь, и как они коррелируют? Вопрос, который предстоит исследовать.

Следует отметить, что некоторые западные специалисты базируются в своих оценках на экспертных мнениях, основанных на шкалировании и описании когнитивных задач и их связи с физическим трудом [1, 10]. В отечественной литературе часто встречается понятие коэффициента автоматизации, либо используют другой расчетный показатель, на основе которых делается вывод о различных уровнях автоматизации [7, 17, 18]. Из этого можно сделать вывод — существуют два подхода, которые рассматривают проблему с разных сторон: учет степени участия человека путем экспертных оценок по определенным градациям (уровням), либо учет машинного времени (самого распространенного показателя) по отношению ко всему времени, либо какого-либо другого функционального показателя.

Связь интегрального коэффициента уровня автоматизации K_a и LOA

В работе [5] уровень автоматизации для систем типа АСУ ТП ассоциирован как с уровнем (функциональностью) ПТС, так и со степенью автоматизации функций контроля и управления на основе сигналов, поступающих непосредственно с агрегатов. Представление о степени автоматизации таких функций основано на учете числа сигналов и задействованных приборов и средств автоматики. Эти параметры нашли свое отражение в интегральном коэффициенте автоматизации согласно формуле

$$K_a = \sum_l v^l K_a^l, \quad (1)$$

где v^l — вектор приоритетов (весов) для l -уровней, $v = (v^0, v^1, \dots, v^l)$, $\sum_l v^l = 1$; K_a^l — с одной стороны отражает для всех уровней функциональность ПТС, ПО и технологичность решений, и с другой, только для 0-го уровня — степень полноты автоматизации, т. е. доли сигналов для контроля и управления от возможного числа [5]. Подобная формула для среднего интегрального показателя уровня автоматизации, основанная на оценках ИТ-аспектов АИС, приводится в работе [24].

Таким образом, была формализована концепция оценки уровня автоматизации в количественном виде от 0 до 100 % с учетом функциональности применяемых ПТС и числа функций контроля/управления.

Если говорить подробнее, то были получены численные оценки вклада в уровень автоматизации для АСУ ТП, построенной по четырехуровневой иерархии: 0-й уровень — уровень КИПиА; 1-й уровень — уровень ПЛК; 2-й уровень — уровень диспетчерского управления и сбора данных (уровень SCADA от англ. Supervisory Control and Data Acquisition); 3-й уровень — уровень системы исполнения производства (MES от англ. Manufacturing Execution System). Среднее значение вектора приоритетов уровней $v_{cp} = (0,53; 0,26; 0,13; 0,08)$ [5]. Диапазон изменения вклада всех уровней в общий показатель автоматизации был равен: 0-го уровня (КИПиА) — 50...56 %; 1-го (ПЛК) — 23...29 %; 2-го (SCADA) — 12...15 %; 3-го (MES) — 6...10 %. Значения вектора приоритетов были получены в работе [5] по двум методикам: уровневой модели весовых коэффициентов, предложенной в работе, и методом анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. Эти значения соответствовали, по мнению экспертов, идеализированному уровню — самой высокой степени вклада каждого уровня автоматизации, если бы они оставались без изменения в окончательной формуле (1) для K_a . Другими словами, идеализированная оценка ПТС и число автоматизируемых функций контроля и управления технологических элементов, связанных с КИПиА, отвечает самому высокому уровню автоматизации при использовании в системе управления последних достижений науки и техники, что также косвенно подтверждается увеличением возлагаемых функций на ПТС, которые ранее мог выполнять человек (этот уровень в работе [5] указан как перспективный).

При другом подходе, как упоминалось в предыдущем разделе, согласно стандарту [7] рассматривается коэффициент $K_{СТО}$ как доля машинного времени от всего штучного времени, который принимает значение также от 0 до 1 (0—100 %). Иными словами, вычисляется сразу прямая величина относительно распределенного времени, связанная с уровнем средств технологического оснащения для каждой операции, учитываемой при автоматизации. К примеру, для категорий "повышенного" и "высокого" уровней автоматизации доля машинного времени $K_{СТО}$ должна составлять 75...90 % и 90...99 % соответственно (табл. 2).

Интересно было сопоставить численные значения коэффициентов K_a с градациями LOA шкалы ШИВ и с описанием в стандарте уровней автоматизации. Для этого мы привели шкалу ШИВ к значениям от 0 до 1 и записали степень уровня автоматизации, взяв десятичный логарифм $\lg(LOA)$ от номера LOA, преобразовав ранговую (порядковую) шкалу в относительную (интервальную). Это означает, что мы рассматриваем отношение текущего уровня автоматизации к уровню, когда автоматизация

отсутствует, т. е. к $LOA = 1$ (табл. 3). Для перехода к количественной шкале также часто используют математический аппарат нечетких множеств.

Заметим, что первые этапы автоматизации (модернизация при внедрении ПТС) вносят более значительный вклад в изменения по сравнению с последующими. При сопоставлении преобразований (см. выше) со значениями K_a мы также сможем убедиться в их корректности или в каких-либо расхождениях в оценках.

Из описания уровней шкалы ШИВ видно, что с уровня LOA5 появляется автоматическое исполнение операций, т. е. система становится автоматизированной и при обязательном участии человека может уже работать самостоятельно. Мы можем говорить, что с уровня LOA5 (70 %-ного уровня автоматизации) у нас появляется АСУ, ЧПУ, машина с вычислителем и т. п. с набором всех технических средств и далее, с ростом LOA идет только их совершенствование.

Чтобы связать когнитивное понимание уровня автоматизации с уровнем ПТО и функциями контроля и управления, выражаемыми

Таблица 3

Шкалирование уровней АСУ ТП по шкале Т. Шеридана и В. Вепланка

Уровень автоматизации (LOA)	Степень LOA $\lg(LOA)$	Описание по ШИВ	КИПиА + ПЛК	SCADA	MES
1	0	Компьютер/система не предлагает помощь: человек должен принимать решения и выполнять все действия сам			
2	0,3	Компьютер/система предлагает человеку полный набор решений/действий, альтернативы (пример — работа с электронным справочником)			✓
3	0,48	Компьютер/система предлагает полный набор решений /действий, альтернативы и сужает выбор до нескольких вариантов			✓
4	0,6	Компьютер/система предлагает одну альтернативу			✓
5	0,7	Компьютер/система предлагает одну альтернативу и автоматически выполняет это предложение, если человек соглашается		✓	✓
6	0,78	Компьютер/система предлагает одну альтернативу и выполняет это предложение, если человек в течение ограниченного времени не накладывает вето на автоматическое выполнение операции			
			Ручное управление		
			Автоматическое управление		
7	0,84	Компьютер/система выполняет операции автоматически, обязательно информируя человека	✓	✓	✓
8	0,9	Компьютер/система выполняет операции автоматически и информирует человека, только если компьютер "спросит"	✓	✓	
9	0,95	Компьютер/система выполняет операции автоматически и информирует человека, только если он (компьютер) решит	✓	✓	
10	1	Компьютер/система решает все и действует автономно, игнорируя человека		✓	

через K_a , в табл. 3 в соответствии с уровневым построением АСУ ТП, мы отметили типичную функциональность системы для данных уровней в терминах ШИВ. Затем отметили полученный диапазон значений для вектора приоритетов K_a жирной стрелкой.

На уровнях КИПиА — ПЛК осуществляется измерение, автоматический контроль и управление ТП в реальном времени, как правило, без участия человека, в зависимости от настроек ПТС (отмеченные, как LOA-7...9 в терминологии ШИВ). Вклад, оцененный по сумме средних значений вектора приоритета v_{cp} по методике расчета для K_a , этих двух уровней (КИПиА—ПЛК) в конечную автоматизацию равен 79 % ($v^0 + v^1 = 0,53 + 0,26 = 0,79$) [5], что практически попадает на границу уровней LOA-6...7 (верхняя отметка стрелки табл. 3).

Следующий уровень SCADA соответствует добавлению функций автоматического сбора, регистрации, хранения в БД, представления информации, формирования отчетов и взаимодействия с другими сетями. Этот уровень отмечен в шкале ШИВ как LOA-6...9 (табл. 3). Для всех трех уровней, с 0-го по 2-й, оценка вклада по сумме средних значений вектора приоритета v_{cp} равна 92 % ($v^0 + v^1 + v^2$) [5], что шкалируется по LOA-9 (нижняя отметка для стрелки). Функция диспетчерского управления SCADA (отмеченная как LOA-5), что соответствует, к примеру, случаям нештатных ситуаций или редкой подстройки параметров для достижения оптимальной производительности малоинформативно для нас в контексте общей автоматизации. Полученные выше оценки показаны в табл. 3 в диапазоне 79...92 %.

Далее видно, что уровень MES, описанный функциональной моделью из 11 функций (8 функций с 2004 г.), разработанной MESA International, отвечает данному шкалированию для типовых задач управления производством [13] (к примеру, составление расписаний LOA-2...3, управление людскими ресурсами LOA-2...3, управление качеством LOA-3...4, управление производственными процессами LOA-5...7, сбор и хранение данных LOA-7 и т. д.). На уровне MES могут решаться некоторые вопросы оптимизации для принятия более эффективных решений [9] как при участии человека (LOA < 6), так и без участия человека (LOA > 5). Рассматривая MES как уровень автоматизации бизнес-процессов оперативного управления производством, путем логирования (отражение логики бизнес-процесса) всей цепочки операций можно применять оцен-

ку уровня автоматизации, при этом каждая операция должна быть формально описана и должна получить свой номер LOA [4]. В целом, при описании таких процессов уровень автоматизации может устанавливаться по самому минимальному LOA [4], или, как показано далее, по соотношению числа операций с соответствующим LOA и затем суммированием по средневзвешенному числу операций. В общей иерархии АСУ ТП говорится о вкладе этого уровня в автоматизацию, составляющим 6...10 %, и доля этих процессов в формуле (1) для интегрального K_a не велика [5]. Уровень MES повышает функциональность для решения когнитивных задач и в данном шкалировании при вкладе в общий уровень автоматизации ТП практически незначителен и может только дополнять существующий уровень путем автоматизации производственных процессов. Вместе с тем в результате внесения новых функций оптимизации процессов производства, их учета и применения дополнительных ПТС уровень автоматизации по шкале ШИВ снижается из-за привлечения дополнительных ресурсов и необходимости контроля исполнения. В данном случае для уровня MES шкалирование по ШИВ более информативно, чем при подсчете в K_a , и есть расхождение в оценках, поэтому в дальнейшем уровень MES мы не принимаем во внимание.

Несмотря на это идеализированная оценка для K_a по значению вектора приоритетов v_{cp} рассмотренных выше трех уровней с 0-го по 2-й корректно согласуется со шкалой ШИВ. Также при расчете коэффициента автоматизации K_a дается более точная информация в количественном выражении об уровне автоматизации данной системы. Таким образом, учет функциональности ПТС и ПО в K_a коррелирует со шкалированием LOA для информационных задач (взаимодействия человек—компьютер), а учет доли сигналов говорит о числе приборов для контроля/измерения и средств автоматизации (наличие механических устройств). Такой же механизм рассмотрения двух типов задач: механизации и информационно-управляющих отражена в объединенной шкале по работе [1] (см. следующий раздел).

Также рассмотренные выше уровни автоматизации АСУ ТП на основе оценки K_a , лежащей, как показано выше, в диапазоне 79...92 %, будут соответствовать количественным оценкам по шкале ШИВ степени LOA-6...9 (0,78...0,95), а также предпоследним уровням автоматизации "5—6" (75...99 %) в вышеупомянутой шкале из

ГОСТ 23004—78 (табл. 2) [7]. В качественном описании, в соответствии с ГОСТ 23004—78 эти уровни отражены как "повышенный" (75...90 %) уровень автоматизации для КИПиА — ПЛК и как "высокий" (90...99 %) для всех трех уровней. Отметим, что соответствие оценок по вектору приоритетов уровней КИПиА — ПЛК "повышенному" уровню автоматизации и "высокому" вместе с уровнем SCADA в соответствии с ГОСТ 23004—78 действительно отвечает комплексной автоматизации и высокому уровню АСУ ТП на производстве. Оснащение трех выше перечисленных уровней автоматизации по последнему слову техники современными ПТС с реализацией на нем ПО, выполняющего требуемые функции согласно ТП, о чем, помимо высокого показателя K_a , косвенно еще может говорить шкалирование по уровням LOA-7...9 шкалы ШИВ (табл. 3), действительно позволит реализовать передовой и высокий уровень автоматизации.

Заметим, что в формуле (1) для интегрального K_a напрямую не учитывается оценка работы алгоритмов и контуров управления, но косвенно также учитывается управление по числу задействованных точек контроля и регулирования коэффициентом полноты автоматизации для 0-го уровня КИПиА по всем агрегатам ТП. При проектировании АСУ ТП в качественном описании отмечают до четырех степеней развитости информационных функций по типу контроля и измерения, включая распознавание ситуаций, и до семи степеней развитости управляющих функций по типу регулирования и управления до самообучения и изменения алгоритмов [19]. Очевидно, что высокий технический уровень ПТС, связанный с определенными затратами, подразумевает реализацию как достаточно устойчивых и надежных алгоритмов, не приводящих к авариям, так и надежных конфигураций безопасности. Оценка надежности работы алгоритмов и программной конфигураций ПТС выходит за рамки данного исследования. Недостатком расчета K_a является отсутствие показателей, учитывающих эти функции, и в большей степени качество управляющих функций — тип регулирования, интеллектуальные функции алгоритмов. Также не всегда корректен принцип аккумуляции уровня автоматизации в формуле (1), как было показано выше на примере с уровнем MES.

Теперь рассмотрим пример количественного выражения уровня автоматизации АСУ процессами производства (АСУПП) с использова-

нием показателя LOA по шкале ШИВ. Путем присвоения всем операциям соответствующего LOA и затем разделения всех операций была проведена количественная оценка бизнес-процессов в процентном отношении с ручным ($LOA < 6$) или автоматическим ($LOA > 5$) исполнением операций [4]. Результатом явилось получение в процентах числа операций АСУПП с ручным и автоматическим исполнением. Следует отметить, что результаты не уточнялись по разным LOA, а учитывались только по двум группам, как $LOA > 5$ и $LOA < 6$. Уровень автоматизации не коррелировал с оценкой для операций рядом стоящих LOA в каждой из групп и был одинаковым для LOA-6, LOA-7 и LOA-8. При детальном рассмотрении АСУПП видно, что показатель LOA в одной группе отличается по разным функциям контроля и рискам взаимодействия, которые возлагаются на человека и компьютер. Возможным выходом из данной ситуации может быть присвоение значения степени автоматизации $\lg(LOA)$ для каждого уровня согласно табл. 3. (0; 0,3; 0,48; 0,6; 0,7; 0,78; 0,84; 0,9; 0,95; 1) и/или присвоение веса каждому LOA аналогично вектору приоритетов, рассмотренному выше, т.е. с увеличением LOA будет рост автоматизации на какую-то определенную долю при расчете в итоговом K_a . К примеру, по LOA-7 устанавливается уровень автоматизации, равный 0,84 (84 %), а по LOA-8 — уровень 0,9 (90 %) при суммировании в интегральном показателе по средневзвешенным значениям числа операций по каждому LOA. Это позволит точнее представлять уровень автоматизации, в результате будет более точным представление уровня автоматизации для систем с процессами, имеющими близкий уровень LOA.

Еще один подход для получения оценок коэффициента автоматизации K_a и коэффициента готовности G_a , учитывающего готовность к запуску автоматизированных систем в трехмерном ПА по соответствующим координатам (задачи, этапы проекта, виды обеспечения) для ТПП при проектировании, приводится в работе [3]. Помимо сопоставления полученных значений с ГОСТ 23501.108—85 [14], где $K_a < 25$ % соответствует низкому, K_a от 25 до 50 % — среднему, а $K_a > 50$ % — высокому уровню автоматизации, авторы предлагают оценивать и планировать стратегию развития и функционирования автоматизированной системы ТПП [3]. В основе метода лежит получение вектора развития системы и введение весов для различных элементов ПА по трем

координатам при суммировании в интегральном показателе готовности G_a . Интегральный показатель готовности G_a отражает ближайшую перспективу автоматизации предприятия и учитывает не только действующие системы, но и все незавершенные проекты.

Можно отметить, что показатели функциональности и степень полноты автоматизации, представленные в формуле (1) для K_a , нормированные вектором приоритетов v_{cp} , согласуются численно со шкалой ШИВ, соответствуя когнитивному описанию функций для данных уровней в табл. 3. Качественные и количественные оценки из ГОСТ 23004—78 находят свое подтверждение в сравнении с численными значениями вектора приоритетов v_{cp} идеализированной оценки. Таким образом, два типа рассмотренных шкал и оценка значения K_a взаимосвязанны, характеризуют уровень автоматизации для производства с различных сторон и соответствуют близким как качественным описаниям, так и количественным значениям. Также оценка по шкале LOA производственных операций может являться основой для количественного расчета и вывода об уровне автоматизации. Трехмерное представление систем автоматизации с показателем G_a может послужить перспективой для отражения на цифровой платформе перспективы развития систем предприятия.

Другие шкалы, выбор LOA и оптимизация затрат

Как говорилось выше, существует множество различных шкал и подходов к оценке уровня автоматизации. В работах [1, 16] было приведено объединение в одной семиуровневой шкале физического и когнитивного понимания уровня автоматизации, т. е. задач, описывающих механизацию — применение технического оборудования, и задач информации/контроля. Описание этих задач использовалось в качестве основы для оценок от полностью ручного управления и контроля до полностью автоматического или автономного (табл. 4). Объединение двух типов шкал позволяет рассматривать процесс автоматизации с точки зрения выполнения задач из двух классов одновременно, определяя величину физических возможностей и информационной поддержки [1]. Начиная с уровня LOA = 4 (предупреждение), затем LOA = 5 (контроль), и LOA = 6 (вмешательство) и т. д. видно сходство перечисленных задач для уровней КИПиА — ПЛК — SCADA по аналогии с рассмотренной выше системой АСУ ТП (LOA-5...9) (табл. 3).

Далее было замечено, что для каждой рабочей операции (рабочего места) существуют максимальный и минимальный пределы автоматизации, их можно варьировать, подбирая

Таблица 4

Объединенная семиуровневая шкала LOA для информационных задач и механизации производства [1]

LOA	Механизация и оборудование	Информация и управление
1	Полностью ручная работа, никаких инструментов не используется, используется только собственная сила мышц, например собственная сила	Полностью ручной уровень: пользователь создает свое собственное понимание ситуации и развивает свой курс действий на основе его/ее более раннего опыта и знаний
2	Статический ручной инструмент — ручная работа с поддержкой статического инструмента, например отвертки	Уровень принятия решения: пользователь получает информацию о том, что делать, или предложение о том, как задача может быть достигнута. Пример — рабочий заказ
3	Гибкий ручной инструмент — ручная работа с поддержкой гибкого инструмента, например регулируемого гаечного ключа	Уровень обучения: пользователь получает инструкции о том, как выполнить задачу, например, инструкции, руководства
4	Автоматический ручной инструмент — ручная работа с поддержкой автоматизированного инструмента, например гидравлического болта	Уровень предупреждения: техническая система выдает запрос, если исполнение отклоняется от подходящего режима. Пример — проверка перед действием
5	Статическая машина / рабочая станция — автоматическая работа машины, предназначенной для конкретной задачи, например токарного станка	Уровень контроля — техника требует внимания пользователей и указывает на проблему. Пример — сигнализация
6	Гибкая машина / рабочая станция — автоматическая работа машины, которая может быть переконфигурирована для различных задач, например станка с ЧПУ	Уровень самовмешательства — техника берет на себя и корректирует действие, если исполнение отклоняется от варианта, который техника считает подходящим. Пример — термостат
7	Полная автоматизация — полностью автоматическая работа, машина решает все проблемы, которые возникают. Пример — автономные системы	Уровень полная автоматизации — вся информация и управление обрабатываются техникой. Пользователь никогда не участвует. Пример — автономные системы

различные уровни при непосредственном выполнении (табл. 5). Эти пределы отображаются в матрице LOA 7x7 (с физическими и когнитивными задачами), образуя площадь возможных улучшений Square of Possible Improvements (SoPI) [10]. SoPI иллюстрирует диапазон возможностей, где данные задачи и сборочные операции могут быть успешно автоматизированы или выполнены вручную. Данная методика получила название DYNAMO [10, 16].

Также исследователи обратили внимание на сборочном типе производства на различную стоимость мероприятий по автоматизации и других затрат в зависимости от уровня LOA [1, 11]. Поэтому в дальнейшем переключились на поиск оптимального баланса между затратами и автоматизацией, т. е. варианта, когда стоимость инвестиций не должна превышать ценность преимуществ, достигаемых посредством автоматизации (при высоком LOA система становится жесткой и не гибкой) (см. рисунок). Соответствующий минимум LOA определялся как благоприятный, когда работа может быть выполнена в подходящем темпе по приемлемой цене без ущерба для здоровья

Таблица 5

Градации уровня автоматизации (LOA) от минимального до максимального для каждой рабочей операций ТП [1]

LOA	Механизация и оборудование						
	Рабочие операции						
	1	2	3	4	5	6	7
7							
6	max	max		max		max	
5				min			
4					max	min	max
3							
2	min		max		min		
1		min	min				min

LOA	Информация и управление						
	Рабочие операции						
	1	2	3	4	5	6	7
7							
6							
5	max	max	max	max		max	max
4		min		min			
3					max	min	
2			min		min		
1	min						min

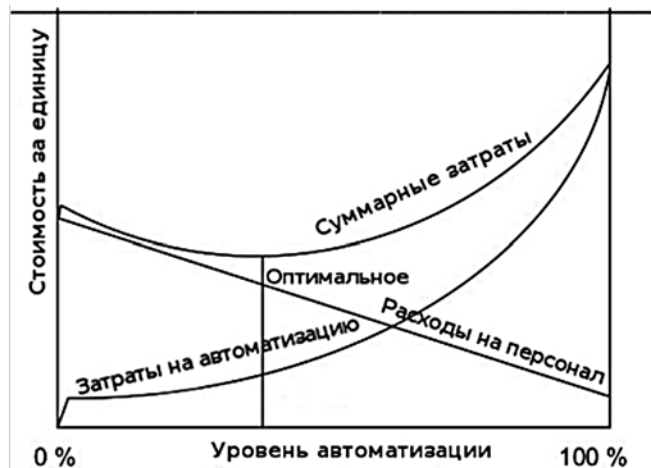


График зависимости стоимости от уровня автоматизации [11]

работника. Достигают этого путем разбиения технологического процесса каждого рабочего места на выполняемые операции с возможным максимальным и минимальным уровнями автоматизации в рамках принятых уровней объединенной шкалы и затем детальным рассмотрением каждой операции (табл. 5) [1].

При дальнейшем рассмотрении сборочного производства автомобилей из-за различий в используемых рабочей силе и оборудовании на одной и той же сборке будут разные общие затраты для разных уровней автоматизации (табл. 6) [11]. Самый оптимальный исходя из стоимости LOA будет не обязательно самым высоким. Различные значения LOA будут также для показателей "качество" и "производительность/гибкость" на различных участках сборки (УС) автомашин, как показано в табл. 7 по сравнению с фактическим уровнем автома-

Таблица 6

Затраты (€) на автоматизацию по участкам в зависимости от LOA по [11]

Уровень автоматизации (LOA)	Сборочный участок		
	1	2	3
1	1,30	1,20	1,30
2	1,20	1,30	1,20
3	1,00	1,10	1,10
4	1,10	1,00	1,00
5	1,40	1,40	1,40
6			1,50
7			1,60

Выбор оптимального LOA по ряду критериев [11]

Показатель	Модель автомобиля								
	Гольф А5, г. Вольфсбург			Туран 5000, г. Вольфсбург			Гольф А5, г. Эйтенхахе		
	УС1	УС2	УС3	УС1	УС2	УС3	УС1	УС2	УС3
Стоимость	1	4	4	3	4	4	5	5	7
Качество	3	4	4	3	4	1	3	4	1
Производительность/гибкость	1	2	4	2	3	4	4	4	6
Фактический LOA	1	1	1	4	4	4	5	5	7
Рекомендованный LOA	1	4	4	3	4	3	5	5	7

тизации. Определение оптимального LOA исходя из показателей "стоимость", "качество" и "производительность", на каждом участке сборки с рекомендованным уровнем автоматизации как минимум по двум показателям, главным из которых является "стоимость", не представляет трудностей. Окончательный выбор LOA в табл. 7 указан как "Рекомендованный LOA".

В итоге автоматизация производства только выигрывает от дифференцированного подхода, а полуавтоматическое исполнение становится неотъемлемой частью производства и резервом для повышения производительности [10, 11].

Перспективы шкалирования

Вышеупомянутым международным сообществом SAE international была стандартизована шестиуровневая шкала для определения уровня автономности в транспортной сфере от ручного до полностью автоматического контроля и управления, включая сценарии интеллектуального поведения движущихся объектов [2]. Уровень автономности не является уровнем автоматизации на производстве, но по смыслу эти понятия очень близки, и рост уровня автоматизации является прямым следствием повышения уровня ПТС, используемых для беспилотных машин и устройств. Основанная на современной методологии надежного техобслуживания Reliability-Centered Maintenance (RCM), своевременная диагностика этих средств позволит в оперативном режиме говорить о поломках и изменившемся уровне автономности [20]. Если говорить о производстве, то это могут быть роботизированные средства предприятия с текущим K_a , характеризующим изменившийся уровень автоматизации, аналогично показателю автономности выпускаемых изделий. В бизнес-системах

можно говорить о программах-роботах для роботизированной автоматизации процессов Robotic Process Automation (RPA), для которых характерна имитация взаимодействия человека с информационными системами при исполнении процессов [15]. В перспективе оценка систем предприятия, диагностика изделия, устройства и т. п. с предписанным уровнем автоматизации (автономности) по любой предложенной шкале аналогично Standard J3016, ГОСТ 23004—78 или табл. 3 даст более краткую и содержательную характеристику класса, к которому относится рассматриваемый объект. Это также будет являться дополнительной информацией для систематизации информационного пространства по соответствующему уровню автоматизации при создании цифровой платформы предприятия, оперативно информирующей об изменившемся уровне автоматизации. Иными словами, применение более современных ПТС, ПО и технологических решений позволяет говорить о более высоком уровне автоматизации по шкале LOA, а в количественном выражении об этом будет свидетельствовать соответствующий коэффициент автоматизации K_a . Увеличение K_a говорит о том, что данные средства и ПО выполняют больше функций, и оценка может занять более высокое место в шкале LOA, а стоимость ПТС, как и проекта, будет повышаться в соответствии с нормативными документами [19]. Данная информация может быть использована для обоснования инвест-проектов по модернизации систем [5] и сведена в более общую шкалу.

Дальнейшее исследование задачи определения уровня автоматизации АСУ ТП может идти путем формализации процессов подобно описанию информационной модели в диаграммах UML-нотаций [12], а для бизнес-процессов уровня MES и выше — в диаграммах функциональной модели по методологии IDEF0 [4]. Это

позволит выявить отдельные процессы и соответствующие ПТС на которых они запущены с возможным значением K_a . Выбор уровня автоматизации от максимального до минимального может дать дополнительную информацию с точки зрения оптимизации затрат.

Заключение

В работе был сделан анализ по систематизации вопросов, связанных с уровнем автоматизации, рассмотрены и сопоставлены различные шкалы. Показаны основные принципы деления, которые распространены в западной научной литературе, в некоторых подходах отечественных авторов и в нормативных документах. В качестве основной шкалы рассматривалась известная шкала Шеридина — Вепланка с введенным понятием уровня автоматизации LOA в применении к технологическим и производственным процессам автоматизации, в сравнении с коэффициентом автоматизации K_a и затем с показателем машинного времени средств оснащения $K_{СТО}$ шкалы ГОСТ 23004—78. Был сделан вывод, что шкалы и коэффициенты описывают процесс автоматизации с различных сторон и соответствуют близким по смыслу качественным и количественным описаниям. Расчетное значение K_a также может дать дополнительную более точную информацию при определении уровня автоматизации как при проектировании, так и при оценке бизнес-процессов, и может найти свое применение в обосновании инвест-проектов по модернизации систем. В дальнейшем существуют возможность оптимизации затрат в зависимости от уровня автоматизации (LOA), как и возможность определения изменения уровня автономности для динамических и других систем в зависимости от их состояния и применяемых ПТС. При развитии информационного пространства описанные методы определения уровня автоматизации могут сыграть свою положительную роль для сравнения и описания новых и существующих систем, послужить основой для разработки методик оценки различных типов процессов, а также могут использоваться для классификации систем и их стандартизации при создании цифровой платформы предприятия.

Список литературы

1. Frohm J., Stahre J. O., Winroth M. P. Levels of Automation in Manufacturing // International Journal of Ergonomics and Human Factors. 2008. Vol. 30, Iss. 3.

2. SAE international, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems // Standard J3016. 2018. 35 p.

3. Куликов Д. Д., Яблочников Е. И. Применение оценочных метрик для анализа технологической подготовки производства // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 6. С. 109—112.

4. Кораблев И. Г. Оценка уровня автоматизации бизнес-процессов предприятия // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 1. С. 17—24.

5. Кузьмин Ю. Б. Моделирование степени автоматизации иерархических систем управления на примере АСУ ТП предприятия // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 6. С. 13—22.

6. Sheridan T. B., Verplank V., William L. Human and computer control of undersea teleoperators. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, Man-Machine Systems Laboratory, 1978.

7. ГОСТ 23004—78. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении. Основные термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1978. 29 с.

8. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993, 278 с.

9. Кузьмин Ю. Б. Мессирование как оно есть. Непрерывные процессы в газовой отрасли // ERPnews. 2008. № 1. С. 54—59.

10. Asth Å., Stahre J., Dencker K. Level of Automation Analysis in Manufacturing Systems. Chalmers University of Technology, Gothenburg, SE-41296, Sweden-2010.

11. Gortlach I. A., Wessel O. Optimal Level of Automation in the Automotive Industry // Engineering Letters. 2008. № 16.

12. Зорина К. В., Соколыч П. Ю. Описание АСУТП как изделия для разработки систем управления ЖЦ АСУТП // ВЕСТНИК ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 1. С. 53—60.

13. Загидуллин Р. Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.

14. ГОСТ 23501.108—85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1985. 15 с.

15. Лавров В. С., Петюк С. И. Роботизированная автоматизация процессов // Научные записки молодых исследователей. 2017. № 6. С. 43—45.

16. From J. Levels of automation in production systems. Thesis // Chalmers University of Technology, SE-412 96, Göteborg, Sweden, 2008.

17. Королев М. А., Фигурнов Э. Б. Статистика и экономический анализ в управлении народным хозяйством. М.: Экономика, 1985.

18. Власов А. В., Мартынов А. П., Кудояров Г. Ш. Экономика, организация управления и планирования нефтепродуктов. М.: Недры, 1975. 280 с.

19. СБЦП 81-2001-22. Государственный сметный норматив. Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП). М. 2016. 34 с.

20. SAE international, A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM). Standard JA1012. 2011. 62 p.

21. Панцагль И. Теория измерений. М.: Мир, 1976. 165 с.

22. Мицкевич А. А. Управленческая теория измерений. Ч. 2. Шкалы и накладываемые ими ограничения // Управляем предприятием. 2016. № 5 (65). URL: <http://upr.ru>.

23. Елисеева И. И., Курьшева С. В., Костеева Т. В. и др. Эконометрика. М.: Финансы и статистика, 2007. 576 с.

24. Камшилов С. Г. Определение уровня автоматизации бизнес-процессов на промышленном предприятии // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 1 (356). Управление. Вып. 10. С. 56—61.

Taxonomy the Level of Automation in Production

The article is devoted to a review of the problem of assessing the level of automation in foreign and domestic literature. The analysis of classification of automation tasks and comparative characteristics of some taxonomies, their similarity and difference are given. Give a range of standards and methods for determining the level of automation are compared with the classical scale of T. Sheridan and V. Veplanka, with a another type of estimation — the vector of priorities of the automation ratio. Discussed is the level of automation for process control systems, business processes, production preparation and etc. The principle of combining taxonomy with different classes of automation tasks and further research with the purpose of optimizing the level of automation depending on the cost and other indicators of production are considered. The possibility of further research in formalizing various production processes and taking into account the level of autonomy of dynamic systems.

Keywords: level of automation, LOA, ratio of automation, degree of automation, taxonomy of automation, taxonomy of T. Sheridan and V. Veplank, taxonomy of autonomy

DOI: 10.17587/it.26.116-127

References

1. Frohm J., Stahre J. O., Winroth M. P. Levels of Automation in Manufacturing, *International Journal of Ergonomics and Human Factors*, 2008, vol. 30, iss. 3.
2. SAE international, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, Standard J3016, 2018, 35 p.
3. Kulikov D. D., Yablochnikov E. I. The use of assessment metrics for the analysis of technological preparation of production, *Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 6, pp. 109–112 (in Russian).
4. Korablev I. G. Assessment of the level of automation of business processes of an enterprise, *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2016, no. 1, pp. 17–24 (in Russian).
5. Kuzmin Yu. B. Modeling the Degree of Automation of Hierarchical Control Systems by the Example of the Enterprise Process Control System, *Promyshlennye ASU i kontrolyery*, 2017, no. 6, pp. 13–22 (in Russian).
6. Sheridan T. B., Verplank V., William L. Human and computer control of undersea teleoperators. Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology, Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
7. GOST 23004–78. Mechanization and automation of technological processes in mechanical engineering and instrument making. Basic terms, definitions and designations, Moscow, Publishing house of standards, 1978, 29 p. (in Russian).
8. Saati T. Making decisions. Method for analyzing hierarchies, Moscow, Radio i svyaz, 1993, 278 p. (in Russian).
9. Kuzmin Yu. B. Mesirovanie as it is. Continuous processes in the gas industry, *ERPnews*. 2008, no. 1, pp. 54–59 (in Russian).
10. Fasth Å., Stahre J., Dencker K. Level of Automation Analysis in Manufacturing Systems. Chalmers University of Technology, Gothenburg, SE-41296, Sweden-2010.
11. Gorlach I. A., Wessel O. *Optimal Level of Automation in the Automotive Industry*, *Engineering Letters*, 2008, no. 16.
12. Zorina K. V., Sokol'chik P. Yu. Description PCS as products for the development of control systems life cycle PCS, *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya i biotekhnologiya*, 2017, no. 1, pp. 53–60 (in Russian).
13. Zagidullin R. R. Management of machine-building production using systems MES, APS, ERP, Stary Oskol, TNT, 2011, 372 p. (in Russian).
14. GOST 23501.108–85. Computer aided design systems. Classification and designations, Moscow, Izdatelstvo standartov, 1985, 15 p. (in Russian).
15. Lavrov V. S., Petyuk S. I. Robotic automation of processes, *Scientific notes of young researchers*, 2017, no.6, pp. 43–45 (in Russian).
16. From J. Levels of automation in production systems. Thesis, Chalmers University of Technology, SE-412 96, Göteborg, Sweden, 2008, 200 p.
17. Korolev M. A., Figurnov E. B. Statistics and economic analysis in the management of the national economy, Moscow, Economics, 1985, 235 p. (in Russian).
18. Vlasov A. V., Martynov A. P., Kudoyarov G. Sh. Economics, organization of management and planning of petroleum products, Moscow, Nedra, 1975, 280 p. (in Russian).
19. SBCEP 81-2001-22. State estimated norm. Reference book of basic prices for design work in construction. Automated process control systems (APCS), Moscow, 2016, 34 p. (in Russian).
20. SAE international, A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM), Standard JA1012, 2011, 62 p.
21. Pfanzagl J. Theory of measurement, Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).
22. Mitskevich A. A. Management Theory of Measurement Part 2. Scales and restrictions imposed by them, *We manage the enterprise*, 2016, no. 5 (65), available at: <http://upr.ru> (in Russian).
23. Eliseeva I. I., Kurysheva S. V., Kosteeva T. V. et al. Econometrics, Moscow, Finance and statistics, 2007, 576 p. (in Russian).
24. Kamshilov S. G. Determining the level of automation of business processes in an industrial enterprise, *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2015, no. 1 (356), *Control*, vol. 10, pp. 56–61 (in Russian).