



ОЦЕНКА УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

И.Г. Кораблев (ПАО «НПМК»), И.С. Решетников («MES Центр»)

Рассматривается метод оценки уровня автоматизации систем оперативного управления производственными процессами (MES) в разрезе моделей MESA и стандарта ISA-95. Предлагается методика, применимая, в принципе, к любому классу информационных систем или процессу. Анализ процессов и автоматизированных систем делается в предположении, что одни и те же операции могут выполнять как люди, так и автоматизированные/роботизированные системы.

Ключевые слова: оценка уровня автоматизация, оперативное управление производственными процессами, контекстная функциональность.

Введение

Рыночные условия диктуют свои жесткие требования и среди них — постоянная борьба за эффективность, повышение производительности, оценка и снижение уровня потерь и т.п. Сегодня любое конкурентоспособное предприятие должно активно применять современные инструменты на всех уровнях управления, в частности, системы оперативного управления производственными процессами (системы класса MES).

Контур MES современного предприятия представляет собой сложный комплекс систем, подсистем и компонентов, направленных на реализацию операционных целей и задач [1], этот контур не статичен, а постоянно развивается в контексте общего развития компании [2].

Современный тренд «цифровизации» (в общем случае оптимизации) бизнес-процессов де факто подразумевает повышение уровня автоматизации всех производственных цепочек операций. Без автоматизации невозможна цифровизация. Общая тенденция развития всех систем управления заключается в повышении уровня оперативности и объективности, что выражается снижении роли человека как в технологических, так и в управленческих процессах.

Важной становится оценка текущего состояния процессов предприятия, их эффективность, поиск отсутствия или недостаточного уровня автоматизации. Проблематикой методов измерения уровня автоматизации занимались несколько групп исследователей и разработчиков в авиакосмической и военных отраслях [3–5]. Общепризнанных стандартизированных методик по определению степени автоматизации производственных процессов пока нет.

По своей сути показатель уровня автоматизации производства и системы управления производством относятся к категории бизнес-метрик и стратегических показателей компании, которые должны рассчи-

тываться максимально объективно по формальным критериям. В связи с этим необходимо перед началом оценки формализовать методики и основные подходы к выбору метрик и алгоритмов расчета показателей.

Методы и способы измерения степени автоматизации

Ключевой вопрос оценки эффективности производственных процессов — это выбор метрик, эталонов, показателей, которыми можно достаточно полно охарактеризовать степень автоматизации и правильный фокусный выбор объектов для анализа.

Начнем с эталона: «как», «чем» измерять уровень автоматизации. Для данной шкалы измерения начальной, самой низкой точкой отсчета, очевидно, является полностью ручной труд, а далее степень автоматизации может быть каким-то образом определена снижением доли вовлечения человека, вплоть до полностью роботизированных, независимых от человека бизнес-процессов.

Таблица 1. Шкала уровней автоматизации Т.Шеридана

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

В части технологических операций ГОСТ 23004 предлагает достаточно простые метрики, которые сводятся к соотношению длительностей операций ручных с механизированными и автоматизированными. Такая шкала субъективна по своей сути и не является равнозначной для всех операций.

Более эффективной является шкала уровня автоматизации (Level of Automation, LOA), предложенная Т. Шериданом [6], оценивающая уровень автоматизации от 1 до 10 баллов (таблица 1), где минимальный уровень автоматизации 1 относится к полному отсутствию таковой, а максимальный 10 — к полной автономности при выполнении операции.

Для операций с уровнем автоматизации LOA 5 по данной шкале Т. Шеридана в системе могут присутствовать исполнительные механизмы: гидропривод, электропривод, звуковая сигнализация и т. п. Операции со степенью автоматизации уровня 6 выполняются автоматически, но человек выступает в роли диспетчера, для возможности контроля со стороны оператора процесс должен опираться на ограничения человека: скорость реакции, разрешающая способность зрения, острота слуха, способность наблюдения за несколькими объектами и т. д. Автоматизированный комплекс, имеющий в своем составе все цепочки операции с уровнем автоматизации 7 и выше, работает с максимально возможной скоростью, с предельными объемами информации и числом объектов управления независимо от физиологических ограничений человека.

Классификация по шкале Т. Шеридана в определенной мере носит субъективный характер, но по совокупности соотношения простоты, полезности и эффективности является хорошим выбором как минимум на начальных этапах анализа.

Существенным ограничением модели Т. Шеридана является оторванность от контекста, комплексной оценки уровня сложности решаемых системой задач. Преодолеть данную проблему позволяет методика оценки уровня автономности для «беспилотных» систем — Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) [7]. Методика ALFUS была разработана под конкретные задачи, но заложенные в ней универсальные принципы применимы для оценки степени автономности любых систем, в том числе и производственных. В модели ALFUS анализ степени автономности рассматривается в трех аспектах, которые обычно отражают в виде радиальной диаграммы в трех шкалах измерения (рис. 1):

1. Human Independence (HI) — возможность программно-аппаратного комплекса функционировать без участия человека;

2. Mission Complexity (MC) — сложность, изменчивость целей и решаемых задач;

3. Environmental Complexity (EC) — сложность и изменчивость внешней среды.

Диаграмма состояния ALFUS строится в двух разрезах: текущий уровень и целевое значение, которое

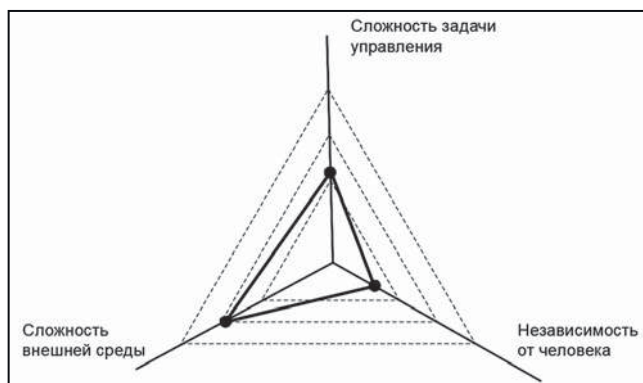


Рис. 1. Уровни оценки степени автономности в модели ALFU

необходимо достигнуть исходя из целей и задач организации. Для понимания оценки степени автономности по методике ALFUS приведем примеры.

Пример 1. Беспилотный летательный аппарат управляется по телеметрии оператором с земли, но в случае обрыва радиосвязи или в условиях соблюдения радио-тишины или радиопомех аппарат должен сам, автономно выполнить заложенную в него программу. Чем выше способность аппарата выполнять задачи без участия человека, тем выше его оценка по шкале HI. Оценка HI идентична, по сути, оценке LOA по шкале Т. Шеридана.

Пример 2. Беспилотный аппарат может иметь множество изменяемых в ходе выполнения миссии задач, требующих больших вычислительных ресурсов. К таким задачам может относиться идентификация цели, расчет и оптимизация маршрутов, траекторий и т. д. Чем шире и сложнее функциональные возможности аппарата, тем выше оценка по шкале MC.

Пример 3. Беспилотный аппарат может выполнять задачи в статичной среде или же в постоянно изменяемой обстановке: появление преград, новых неизвестных обстоятельств. Способность аппарата гарантированно выполнять свои задачи в постоянно и существенно изменяемой среде характеризуются шкалой EC.

Таким образом, оценка уровня автономности по методике ALFUS становится комплексной задачей, охватывающей процессы управления и интеграционные связи через сложность задач и изменчивость внешней среды. Авторы модели ALFUS предполагают, что оси сложности миссии MC и изменчивости среды EC могут быть совмещены в одну шкалу измерения «функциональность», и вводят понятие «контекстной функциональности», то есть функциональности, зависящей от назначения системы, присущей именно системам данного класса.

В целом многокритериальный подход ALFUS более точно характеризует уровень автоматизации/автономности системы, нежели подход, основанный исключительно на анализе степени использования компьютерной техники и автоматизации отдельных операций — LOA по шкале Т. Шеридана. Для оценки

производственного предприятия методике ALFUS не хватает «контекстного» описания требуемой функциональности именно для производственных систем.

Объект оценки — контекстная функциональность

Рассмотрим теперь проблему оценки уровня автоматизации производственного предприятия.

Всем производственным предприятиям, независимо от их отрасли и типа производства, присущи в целом однотипные бизнес-процессы, операции, модели управления. Например, все производства в той или иной мере работают с управлением ресурсами, складами, планированием производства, контролем качества и т.д. Таким образом, можно выделить общую контекстную функциональность, присущую именно для производственных предприятий, максимальное общее «поле» всех возможных на предприятиях процессов и операций. Другими словами, выделить типовые объекты, для которых можно применить оценку уровня автоматизации — «что» измерять.

Модели управления операциями предприятия лучше всего и полно систематизированы в серии стандартов ANSI/ISA-95 (www.isa.org), в РФ принятых как стандарты серии ГОСТ Р 62264 [8]. В стандартах рассматривается понятие управления операциями в целом и производственными, в частности, и вводится термин Manufacturing Operations Management (MOM).

Согласно рекомендациям серии стандартов ANSI/ISA-95, для всех видов операционного управления используется единая модель, определяющая стандартные функции предприятия — закупки, планирование, диспетчеризация, отслеживание и пр. Для модели в части производственных операций выделяется свой блок функций: календарное планирование производства, контроль расхода материалов и энергии, управление запасами, обеспечение качества, управление производством, управление техническим обслуживанием. Эта функциональная модель MOM может быть использована как основа для оценки уровня автоматизации процессов управления LOA.

Для шаблона описания функциональности производственных систем уровня MES близким альтернативным подходом является выбор модели ассоциации MESA (www.mesa.org). Есть две разновидности:

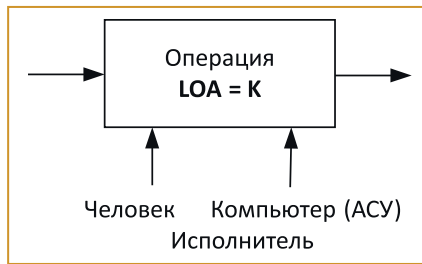


Рис. 2. Оценка уровня автоматизации отдельной операции

модель MESA-11, рассматривающая MES как обособленный блок и модель с-MES, рассматривающая MES в системном контексте предприятия [9]. Эти модели похожи по составу функций и пересекаются с моделью MOM.

Неоспоримым преимуществом модели ANSI/ISA-95 является возможность достаточно детального и универсального раскрытия

и описания эталонной контекстной функциональности производственных систем предприятия любой отрасли.

Для оценки уровня автоматизации список исследуемых производственных процессов может быть уменьшен или расширен в зависимости от целей и фокуса внимания аудита, варьироваться для разных предприятий на разных этапах развития.

Методы численной оценки уровня автоматизации

Суть метода численной оценки уровня автоматизации состоит в акцентировании фокуса исследования на производственных процессах и операциях. Цель такого исследования — сделать выводы, в каком режиме работает, на сколько автоматизирована та или иная производственная цепочка, насколько операции могут выполняться в ручном режиме или автономно, найти пробелы в автоматизации. Полное «поле» всех возможных и рекомендуемых к автоматизации операций, как было указано выше, дает шаблон MOM ANSI/ISA95. Предметом исследования могут быть не одна автоматизированная система, а несколько цеховых, локальных АСУ или MES, используемых в производстве, и люди, которые могут выполнять операции в ручном или автоматизированном режиме.

В рамках обследования предполагается, что производственные операции в общем случае могут быть выполнены компьютером или человеком (рис. 2) [11]. Уровень детализации операций и подопераций для анализа должен позволить однозначно оценить каждое действие по шкале автоматизации LOA. Если процесс рассматривается слишком укрупненно, то это может вызывать затруднения при оценке уровня автоматизации.

Для удобства визуального восприятия различных уровней автоматизации выделим цветом операции: автоматические, с LOA>6 — белым; требующие



Рис. 3. Визуализация цепочек операций по уровням LOA, где операции 1, 7, N выполняются автоматически, операция 5 требует контроля со стороны человека, операции 2 и 3 требуют участия человека

Таблица 2. Численная оценка уровня автоматизации по блокам контекстной функциональности MOM

Раздел	Функция по ISA95.3	АСУ	Суммарное число операций в блоке с указанным LOA, ед.									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	Управление производством (Production operations management)	АСУ1, АСУ2, ...	157	184	201	236	306	175	181	124	7	5
6.4	Определение характеристик продукции (Definition management)	АСУ1	15	5	8	3						
6.5	Управление производственными ресурсами (Resource management)	АСУ2				9	16	20	18	4		
6.6	Детальное календарное планирование производства (Detailed scheduling)	АСУ2	20	15	14	2						
6.7	Диспетчирование производства (Dispatching)	АСУ2		5	15	8	10	12	3			
6.8	Выполнение производственного плана (Execution management)	АСУ2				10	75	39	49	38	7	5
6.9	Сбор производственных данных (Data collection)	АСУ3	20	15	7	14	1					
6.10	Отслеживание производства (Production tracking)	нет	19									
6.11	Анализ производственных показателей (Production performance analysis)	АСУ4		35	44	24						
7	Управление обслуживанием (Maintenance operations management)	CMS	59	86	68	42	35					
8	Управление качеством (Quality operations management)	LIMS				20	68	96	32	27		

контроля (роли диспетчера) со стороны человека, с LOA= 6 — темносерым; выполняемые человеком, с LOA<6 — черным, рис. 3 [11].

По всему возможному «полю» автоматизации или по выбранному процессу в рамках поставленной задачи функционального охвата (отдельные функции MOM, интеграционные потоки, контур операционного управления и пр.) считается общее число операций с заданным уровнем LOA, результат сводится в итоговый шаблон, пример приведен в табл. 2.

В табл. 2 названия функций и их блоков приведены в соответствии с рекомендациями стандарта ANSI/ISA-95 и могут детализироваться. Столбец АСУ справочный и содержит список информационных систем, используемых в автоматизации функционального блока.

Если операция может альтернативно выполняться в различных режимах (ручном и автоматизированном), используется вероятностная модель, при этом одна функция может относиться, например, к уровню LOA 1 с вероятностью 0,2 и к уровню LOA 4 с вероятностью 0,8. Эта опция описывает возможные ситуации, например, кратковременного отказа систем управления [10].

Отметим, что оценка уровня автоматизации делается не только по функциональности блоков, но и по автоматизации информационных потоков по ANSI/ISA-95 между смежными системами и подсистемами как внутри, так и вне MES. Комплексная автоматизация предприятия возможна только при автоматизации всех информационных потоков, наличии у MES автоматизированных стыков с ERP и с си-

стемами технологической автоматики. Наиболее интересным, перспективным и сложным представляется акцентирование внимания на операциях детального календарного планирования производства с уровнем автоматизации LOA<6 с целью повышения уровня автоматизации процессов детального планирования и оперативного управления.

По результатам оценки могут выводиться интегральные коэффициенты по функциональным блокам или по уровням автоматизации. Эти показатели могут использоваться как реперные в вопросах оценки динамики развития цифровых технологий на предприятии вкупе с динамикой показателей операционной эффективности.

Пример поиска пробелов в автоматизации и повышения интегрального коэффициента автоматизации

Для демонстрации изложенного метода приведем пример анализа и контроля проекта технического обслуживания и планирования ремонтов. Предположим, имеется производство, где осмотр и ремонт оборудования происходит периодически, по расписа-

Таблица 3. Пример анализа уровня автоматизации ДО начала проекта

Раздел	Функция по ISA95.3	АСУ	Суммарное число операций в блоке с указанным LOA, ед.									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	Управление обслуживанием											
7.3.9	Данные об исправности оборудования (информационный поток с датчиков L1 в MES)	нет	15	5								
7.6	Детальное календарное планирование технического обслуживания	АСУ ТОиР					2	5				
7.7	Диспетчирование технического обслуживания	АСУ ТОиР				12	5					

Таблица 4. Пример анализа уровня автоматизации ПОСЛЕ начала проекта

Раздел	Функция по ISA95.3	АСУ	Суммарное число операций в блоке с указанным LOA, ед.																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
7	Управление обслуживанием																			
...	...																			
7.3.9	Данные об исправности оборудования (информационный поток с датчиков L1 в MES)	АСУТП1										13	7							
7.6	Детальное календарное планирование технического обслуживания	АСУ ТОиР					1	3	3											
7.7	Диспетчирование технического обслуживания	АСУ ТОиР				5	4	3	5											
...	...																			

нию. Осмотр оборудования производится визуально, датчиков сбора информации о состоянии оборудования и передачи информации в MES нет. Персонал планирует и проставляет факт выполнения работ в некой АСУ ТОРО. Таблица уровня автоматизации до начала проекта представлена в табл. 3.

Из табл. 3 видно большое число операций, требующих участия человека, выделенных черным и серым цветом (44 ед.), а блок функций п. 7.3.9 не автоматизирован вовсе и обеспечивается персоналом в ручном режиме.

Предположим, что в результате установки дополнительных датчиков автоматизируется процесс идентификации неисправностей оборудования и передачи информации в АСУ ТОРО. Результатом будет автоматический сбор информации, формирование и планирование работ по ремонтам оборудования, изменение уровня автоматизации производственных операций (табл. 4).

Из табл. 4 следует, что число операций, требующих участия человека, снизилось до 16 ед, а блок операций п. 7.3.9. теперь выполняется автоматически и не требует наличия персонала.

Заключение

Приведенные в статье методы оценки функциональности систем класса MES и оценки уровня автоматизации производственных процессов, с одной стороны, достаточно просты, а с другой — достаточно информативны и могут быть с успехом применены на практике. Это может быть и оценка степени успешности проекта, анализ «пробелов» в автоматизации предприятия, сравнения различных подразделений или процессов и даже критерий вектора развития в направлении Industry 4.0.

Авторами статьи на практике использовалась шкала оценки уровня автоматизации при внедрении проектов уровня MES, что позволяло оценивать состояние автоматизации до начала проекта и отслеживать повышение уровня автоматизации по логам операций во внедряемых автоматизированных системах после развертывания программных комплексов.

Современная концепция управления рассматривает MES как инструмент достижения стратегических целей компании [12], в связи с чем задача объективной оценки контекстной функциональности в разрезе целей имеет большое практическое значение. Использование рекомендаций стандартов серии ANSI/ISA-95 позволяет унифицировать и стандартизировать процесс оценки уровня автоматизации производственных операций в рамках единой информационной

модели, способствовать комплексной автоматизации предприятия, строить долгосрочные планы, не упустив из поля зрения критичные для бизнеса функции, планировать и развивать ландшафт программного обеспечения предприятия.

Список литературы

1. Слэк Н., Льюис М. Операционная стратегия. М.:НГСС, 2019.
2. Решетников И.С. Системный ландшафт современной ИУСПП // Автоматизация в промышленности. 2019. №8. с. 14-18.
3. National Research Council. 2005. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11379>.
4. Clough B.T. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway? In: Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2002. Gaithersburg. P. 12-20.
5. Ryan W. Proud, Jeremy J. Hart, and Richard B. Mrozinski. Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle: A Function Specific Approach, 2003.
6. Sheridan Th. B., Verplank, W.L. Human and computer control of undersea teleoperators. Cambridge, Massachusetts, 1978.
7. Hui-Min Huang, Elena R. Messina. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) Framework Volume II: Framework Models Initial Version. NIST Special Publication 1011-II-1.0. 2007.
8. Козлецов А.П., Решетников И.С. Применение стандарт ISA-95 для интеграции информационных систем на производственном предприятии // Автоматизация в промышленности. 2012. №10.
9. MESA WP 09. Collaborative Manufacturing – объединенное производство. В сб. MES - теория и практика. Вып. 1, М.:НГСС, 2009.
10. Mark A. Nash. Mapping the Total Value Stream: A Comprehensive Guide for Production and Transactional Processes, Productivity Press, 2011.
11. Кораблев И.Г. Оценка уровня автоматизации бизнес-процессов предприятия // Вестник ЧГУ. 2016. №1.
12. Решетников И.С. MES: стратегическая инициатива. М.: НГСС. 2019.

Кораблев Игорь Геннадьевич — эксперт Дирекции по стратегии и архитектуре ИТ ПАО «НЛМК»,

Решетников Игорь Станиславович — канд. техн. наук, руководитель проекта MEScenter.ru.

Контактный телефон (916) 671-19-74.

E-mail: i.reshetnikov@mescenter.ru