

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: polalek562@gmail.com

## ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ СБОРКИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Рассмотрены особенности линий сборки как производственных систем. Поскольку сложные сборочные системы являются дорогостоящими для внедрения, запуска, контроля и обслуживания, а их сложность влияет на производительность, качество и надежность, при проектировании любой сборочной системы необходимо искать компромисс между особенностями ее функционирования, стоимостью и сложностью. В работе предложена модель, пригодная для работы с усложненными многопредметными линиями, которая позволяет в некоторой степени количественно оценивать сложность и может быть адаптирована под изделия электронной техники.*

*Ключевые слова: сложность производства, многопредметные сборочные линии, модели, социально-технические системы, количественные методы.*

Сегодня системное мышление необходимо как никогда, потому что всё переполняется сложностью. Модель системы всегда включает минимум три элемента: технологическую подсистему, персонал в качестве подсистемы и подсистему проектирования. Целью проектирования является формирование технологической подсистемы (для достижения требуемой эффективности производства и создания социальных условий труда персонала, что может привести к росту внутренней мотивации и дополнительному росту эффективности). Линия сборки как производственная система — это комбинация оборудования и людей, связанная общими материальным и информационным потоками. На входе производственной системы — установочные детали, энергия, информация (например, потребительский спрос на изделия); на выходе — материальный (готовая продукция и отходы) и информационный (например, показатели производительности системы) продукт. Линия — это производственная система, в которой незавершенное производство уменьшается, перемещаясь от одного рабочего места к другому, в результате чего получается готовый продукт.

В условиях простой задачи имеется формула, которая проверяется и даже может быть стандартизована. Чтобы следовать этой формуле, опыт не требуется, и поэтому результат предсказуем, а если обращение к формуле аргументированно — то и позитивен. Если проблема усложненная, то формулой (алгоритмом) решения может пользоваться лишь персонал с определенным опытом, при этом вероятность позитивного результата высока. Сложная же проблема не может быть описана с помощью сколько-нибудь точной формулы (четкого алгоритма). Следование имеющейся формуле не гарантирует успех, т. е. существует высокая неопределенность исхода, однако в этом случае

наличие опыта может повысить вероятность успеха. Это означает, что каждая сложная проблема уникальна.

Правомерен вопрос — к системам какой степени сложности относятся линии сборки? При всей многовариантности технических заданий на проектирование линии сборки содержат много сходных (типовых) черт, что не позволяет отнести их к уникальным. Остается отнести их к усложненным системам. Тем не менее, последние десятилетия сложность как производственных линий сборки, так и собираемых на них изделий непрерывно возрастала. И сегодня увеличение сложности является одной из самых больших проблем в производстве [1, 2]. Прогрессирующая кастомизация под влиянием рыночного спроса приводит к дополнительному усложнению рабочих мест ручного производства и рабочих станций автоматизированного из-за уменьшения размеров партий и увеличения вариативности задач сборки. Сложность влияет на качество и надежность [3—5], уменьшает производительность, из-за нее окончательную сборку изделий можно автоматизировать лишь частично или даже выполнять вручную [6], что повышает затраты. Чем выше сложность, тем выше стоимость исправления ошибок [7, 8], затраты на гарантийный ремонт. В результате сохраняется потребность в совершенствовании моделей, описывающих сложность объектов сборки, структуры и балансировки сборочных линий. Система сборки — важнейшая часть производственного предприятия, в том числе с точки зрения стоимости. Около трети производственных рабочих занимаются сборкой [9] и 25—50% от общей стоимости изделия приходится на сборку [7]. Поэтому насущной задачей стало выявление и, по возможности, устранение причин повышенной сложности. Если предприятие сможет управлять сложно-

стью производства, оно повысит конкурентоспособность своей продукции, но для этого, прежде всего, нужно уметь ее оценивать.

Задача настоящей статьи — классификация методов анализа и оценивания сложности производственных систем и построение модели оценки сложности сборки узлов электронной аппаратуры.

### Теория сложности и оценивание производственных систем

Теория сложности дает понимание того, как система может расти, развиваться, адаптироваться к изменяющимся требованиям, к новым задачам. Она, как и производственная система, также не должна быть излишне сложной, чтобы быть применимой к описанию реального производства. Принцип бритвы Оккама, называемый еще законом экономии мышления, призывает упростить сложность везде, где это представляется возможным.

Критерием выбора из возможных вариантов системы в первую очередь служит показатель эффективности (с учетом остальных свойств, важных для создаваемой системы), а облегчить сравнение вариантов может оценка сложности. То есть: если существуют варианты, эквивалентные с точки зрения эффективности, преимущество получает наименее сложный из них. Поэтому сложность должна иметь и относительную оценку.

Конструктивно-технологическая сложность изделия, с одной стороны, есть мера затрат производственных ресурсов на его изготовление, а с другой, она является неотъемлемым атрибутом самого изделия, комплексно учитывающим его структурные и субстантные характеристики в соответствии со сложившимся уровнем средств производства.

Принятие решений в отношении производственных систем — довольно сложная процедура, осуществляемая не по одному критерию, самые важные из которых, по-видимому, — стоимость, качество, гибкость и производственный цикл. При этом сложность можно рассматривать как дополнительный критерий, облегчающий принятие решений.

Интуитивное представление о сложности системы и процесса сборки связывает это свойство с объемом оборудования (число элементов, их масса, габариты и проч.), разветвленностью связей между элементами и степенью их взаимодействия, способом доставки элементов на сборку, с количеством вариантов рабочих мест, направлений движения объектов сборки, требуемой квалификацией персонала, обслуживающего рабочие места, стоимостью изготовления системы, стоимостью и удобством ее обслуживания и т. д. Однако одной интуиции здесь недостаточно. Использование критерия сложности при принятии решений в процессе проектирования, планирования, эксплуатации и анализа производственных систем требует не только субъективного личного опыта и интуиции, но ко-

личественной оценки сложности для более точного сравнения альтернативных решений. Поэтому возникла необходимость в получении более объективных оценок, но задача оказалась достаточно трудной. Основной задачей в создании метрик производственной сложности является повышение их эффективности за счет лучшего понимания реальных проблем, с которыми сталкиваются производители.

Оценивание систем по разным критериям производится с помощью шкал. Это относится и к критерию сложности, однако проблема в том, что шкала сложности отсутствует. Кроме того, отсутствует также определение нулевой сложности и единицы сложности, без чего шкалу построить невозможно.

Очевидно, что суждения о сложности и попытки ее оценки должны опираться на естественные аксиомы теории сложности по аналогии с теорией полезности сложных систем [10]: аксиомы измеримости, сравнимости, транзитивности, коммутативности, независимости. В таком случае в теорию можно включить положение, в соответствии с которым считать, что при выполнении всех пяти аксиом в ходе оценки сложности существует функция сложности, определенная на множестве всех возможных исходов оценки, или иначе — сложность измеряется по шкале интервалов. Конечно, можно использовать и менее точные шкалы — дихотомическую, шкалу наименований, шкалу порядков (ранговую), но трудно использовать шкалу отношений и невозможно — абсолютную шкалу.

Понятие сложности применительно к системам имеет несколько смыслов, это может быть структурная (статическая) сложность, динамическая, вычислительная. Не существует понятия сложности системы вообще — сложность может характеризовать систему с разных сторон. Различают такие виды сложности:

- анализ существующей системы;
- синтез новой системы;
- функционирование созданной системы (управления);
- тиражирование созданной системы;
- репродукция существующей системы.

Нас в рамках темы статьи интересует сложность разработки (синтеза) новой системы и сложность ее функционирования. Под синтезом будем понимать процесс создания системы, соответствующей требованиям спецификаций, технического задания на разработку. Очевидно, что созданная система лишь в некоторой степени будет соответствовать требованиям. Это типичная ситуация для сложных систем.

После того как требуемая система создана, следует оценить сложность ее освоения (анализа) для пользователей. Уменьшение сложности освоения достигается созданием разработчиками адекватной модели системы (документации, инструкций).

Если степень сложности оценивается количеством информации, необходимой для описания реальной

системы, то сложность ставится в зависимость от наблюдателя (в нашем случае — от разработчика системы сборки). Мы будем различать сложность и как свойство системы, и как свойство самой задачи, то есть проектирования или разработки системы сборки.

Вне зависимости от вида сложности можно выделить два принципа оценки сложности систем. Первый связан с понятием количества информации и состоит в том, что сложность системы должна быть пропорциональна объему информации, необходимой для описания этой системы (дескриптивная сложность). Одним из способов оценки дескриптивной сложности является подсчет числа элементов, входящих в систему (переменных, состояний, компонентов), и разнообразия взаимосвязей между ними. Второй принцип связан с понятием энтропии и заключается в том, что сложность системы должна быть пропорциональна объему информации, необходимой для достаточного уменьшения неопределенности в системе (сложность изучения и разработки). Оба принципа дополняют друг друга — для изучаемой системы при увеличении одной сложности другая уменьшается и наоборот. При переходе от одной системы к другой, более сложной, и дескриптивная сложность, и сложность разработки увеличиваются.

Восприятия сложности могут быть сгруппированы и связаны с оформившимися методами анализа. Методы, в свою очередь, удобно группировать, опираясь на их происхождение. Предлагаемая в табл. 1 классификация методов анализа сложности следует этой концепции.

Первая группа состоит из методов и концепций, вытекающих из теории хаоса (хотя возникновение хаоса в реальных промышленных условиях — под вопросом) и теории нелинейной динамики. Сюда относятся методы реконструкции пространства, использования экспонент Ляпунова и бифуркационные диаграммы.

Вторая группа включает фундаментальную меру энтропии Шеннона. Отдельно от нее стоит сложность Колмогорова. Сюда же входят алгоритм Зива и эpsilon-машины — детерминированные автоматы, состоящие из системы причинных состояний и переходов между ними. Эта категория опирается на подходы теории информации.

Третья группа — это гибридные методы. Они пытаются подобраться к сложности путем объединения подходов теории информации с системой кодирования оборудования и изделий.

В четвертой группе собраны методы, основанные на подсчете количества ресурсов, процессов, продуктов и их видов, включенных в производственную систему.

В пятой колонке таблицы собраны некоторые методы, происхождение которых не позволяет включить их в первые четыре группы.

В то время как проблемы балансировки линий активно исследуются на протяжении уже длительного времени, сложность в производстве стала растущей областью исследований значительно позже. Авторы [11] предположили, что помимо трех основных типов сложности — изделия, технологической и эксплуатационной — сложность также непосредственно связана с количеством, разнообразием и содержанием информации. Кроме того, авторы приходят к выводу, что сложность возрастает с увеличением количества вариантов продукции, намеченной к производству, и количества технологических действий, участвующих в производственном процессе. Оценка сложности, изложенная в [12], отличается общностью и применимостью к различным производственным системам. Она исходит из определения сложности производства как «суммы всех аспектов и элементов, которые делают задачу или набор задач трудными для решения, чреватые ошибками, требующими осмысления, бдительности и умственного напряжения, приводящего к стрессу». Слишком длинно для определения, но содержание совпадает с определениями других авторов, которые так или иначе сводят сложность в системе к тому, что трудно понять, описать, предсказать или контролировать.

Вопросы сложности исследовались и в других работах, например в [13—17], но даже несмотря на разные предложенные подходы к сложности линий сборки, в них, насколько нам известно, не рассматривалась специфика сборки узлов электронной аппаратуры, разве что в [17]. Здесь исследованы вопросы управления сложностью производства электронных узлов путем уменьшения чувствительности параметров полосковых линий к дестабилизирующим фак-

Таблица 1

Методы анализа сложности производственных систем

| Хаос и теория нелинейной динамики   | Информационная теория   | Гибридные методы  | Перечисление  | Другие методы  |
|---|---|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Бифуркационные диаграммы</li> <li>• Фазовые портреты</li> <li>• Экспоненты Ляпунова</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Энтропия Шеннона</li> <li>• Сложность по Колмогорову</li> <li>• <math>\epsilon</math>-машины</li> <li>• Алгоритм Зива</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Эвристические индексы + теория информации</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Количество альтернатив</li> <li>• Куб сложности</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Анкеты</li> <li>• Аналогии динамики жидкостей</li> <li>• Технические метрики</li> </ul> |

торам. Построенная ниже модель отчасти заполняет этот пробел. Она касается смешанных сборочных линий, на которых могут изготавливаться различные варианты изделий в произвольной последовательности.

**Модель сложности сборки изделия**

Представленная в [11] модель сложности касалась процессов обработки деталей и зависела от материала и конструкции детали, учитывала разнообразие деталей, возможность сборки механических узлов и влияние крепежа на сложность сборки. Основным тут было выразить меру усилий, необходимых для достижения требуемого результата. Эту модель можно модифицировать для численной оценки сложности печатных узлов изделий электроники, сохранив структуру, но изменив расчет индекса сложности и учитывая сложность монтажа пайкой.

Очевидно, что понятие сложности системы должно учитывать как структуру, так и реализуемые функции. Наиболее простое и весьма узкое формальное понятие сложности системы строится следующим образом. Пусть в нашем распоряжении имеются  $n$  типов элементов, и для каждого типа на основании накопленного опыта устанавливается величина сложности  $c_i$  элемента  $i$ -го типа. Принимаем, что мера сложности должна обладать таким свойством: статическая сложность возрастает с увеличением количества элементов. Сложностью системы, состоящей из элементов со сложностью  $c_p$ , естественно назвать величину

$$c = \sum_{i=1}^n c_i q_i,$$

где  $q_i$  — число элементов  $i$ -го типа в системе.

Конечно, величина  $c$  никак не учитывает сложность функций системы и весьма узко, без учета взаимосвязей между элементами, характеризует ее структуру, однако ее применение даже в таком простом виде себя оправдывает.

Для того чтобы учесть структуру системы, целесообразно поставить сложность в зависимость от числа связей между элементами. Можно поступить следующим образом. Пусть число элементов системы

$$N_p = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Тогда максимальное число связей между элементами будет равно  $N_p(N_p - 1)$ . Если фактическое число связей, реализуемых в системе, обозначить через  $M$ , то величина  $M / [N_p(N_p - 1)]$  будет характеризовать относительное число реализованных связей. Модель, учитывающая такие связи, будет выглядеть так:

$$c = \left[ \left( 1 + \frac{\zeta M}{N_p(N_p - 1)} \right) \sum_{i=1}^n c_i q_i + \frac{n_p}{N_p} \right] \log_2(N_p + 1) + \frac{n_n}{N_n} \log_2(N_n + 1), \tag{1}$$

где  $n_n$  — количество паек и соединений, которые по заключению технологов наибольшим образом влияют на сложность сборки;

$N_n$  — общее количество паек и соединений при сборке;

$n_p$  — количество элементов, новых для цеха сборки;

$n$  — количество типов элементов;

$\zeta$  — коэффициент, учитывающий сложность связей по сравнению со сложностью элементов.

В формуле (1) первое слагаемое отражает сложность системы: число элементов, сложность отдельных элементов, число и сложность связей между ними; второе оценивает сложность монтажа.

Следует отметить, что формула (1) не относится к сложности работы оператора на поточной линии сборки. Показатели, учитывающие нагрузку на оператора, представлены в **табл. 2** вместе с краткими пояснениями по каждому показателю.

И сложности показателей из **табл. 2**, и величины  $c_i$  в формуле (1) удобно выражать численно, пользуясь шкалой Лайкерта. Она представляет собой пятибальную шкалу (реже — семибальную), позволяющую эксперту выразить степень своего согласия с определенным утверждением. Шкала Лайкерта предполагает, что степень уверенности эксперта линейна в диапазоне от „полностью согласен“ до „категорически не согласен“, и на этом основании числа между любыми соседними оценками отличаются на единицу, хотя по смыслу интервалы между оценками нельзя считать равными. По этой причине при подведении итогов оценок не следует пользоваться средними значениями.

Применительно к сложности возможны два опросника. Первый (универсальный) предполагает, что сформулирован вопрос: «Согласны ли вы с тем, что некий показатель оценивается как сложный?», на которые даются ответы: полностью не согласен (1); не согласен (2); скорее не согласен (3); согласен (4); полностью согласен (5). Второй вариант опросника, более прямой, тут вопрос не ставится, эксперт оценивает некоторый показатель из **табл. 2** или  $c_i$  из формулы (1): очень сложно (5); сложно (4); умеренно сложно (3); немного сложно (2); не сложно (1).

Сильные стороны шкалы следующие:

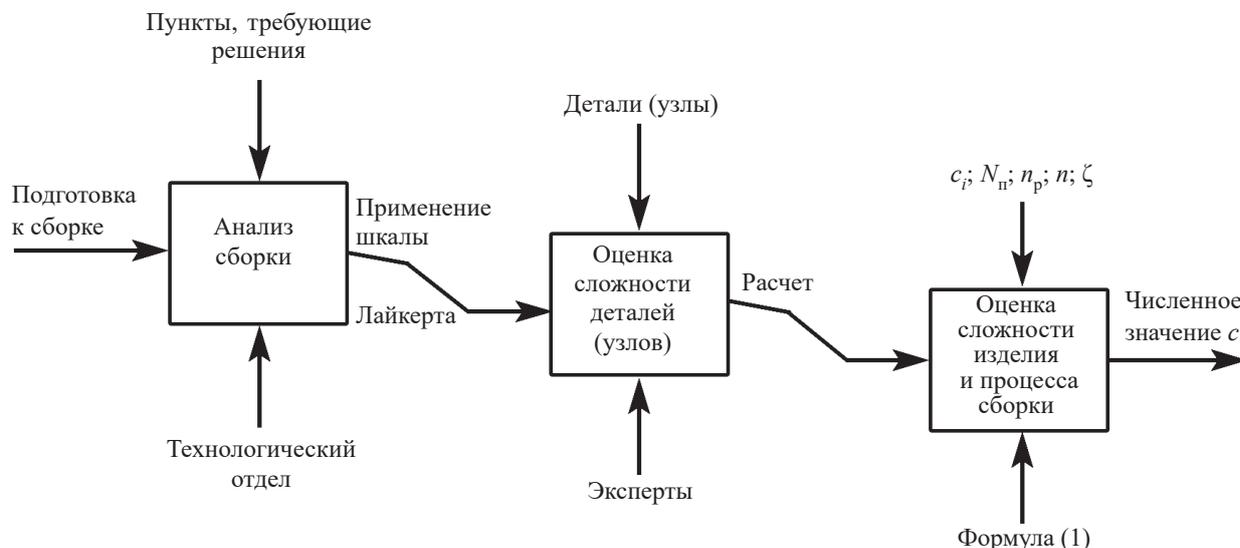
— шкала не предполагает простой ответ „да/нет“, а предполагает выражение степени уверенности или даже отсутствие мнения вообще, и таким образом получают количественные данные, которые относительно легко могут быть проанализированы;

— использование шкалы для оценки производственных показателей практически исключает социальное давление и вместе с ним предвзятость социальной желательности.

IDEF0-диаграмма, изображенная на **рисунке**, отражает главные составные части процесса анализа и расчета сложности сборки.

Показатели сложности работы оператора

| Показатель сложности             | Описание показателя   |
|----------------------------------|---|
| Нагрузка оператора               | Распознавание простой информации (символы, цвета).<br>Работа с подробной информацией руководств.<br>Получение комплектующих на оптовом складе или выделенном месте в цехе.                              |
| Подача деталей и узлов на сборку | Детали и узлы находятся в своих упаковках и подаются на сборку в комплекте и в нужной последовательности.   |
| Типы упаковок                    | Общее количество типов упаковок.  |
| Инструменты на рабочем месте     | Количество инструментов, которые оператору нужно использовать для выполнения всех предусмотренных вариантов сборки (автоматические инструменты не учитываются).   |
| Оборудование на рабочем месте    | Оборудование, выполняющее автоматизированные операции без помощи оператора, с автоматическим или ручным запуском.   |
| Методы работы                    | Набор уникальных для оператора методов работы, которые он должен освоить на этом рабочем месте (методом считается последовательность из нескольких действий).   |
| Количество позиций оператора     | Количество различных позиций, которые понадобятся оператору для завершения цикла действий на рабочем месте (учитывается позиционирование верхней части тела и ступней, не учитываются перемещения рук). |
| Расстояние до детали (узла)      | Наибольшее расстояние между нормальной позицией оператора (или центром рабочего места) и деталью на допустимой граничной линии.   |
| Варианты конструкций деталей     | Количество вариантов конструкций деталей, устанавливаемых на рабочем месте.   |



IDEF0-диаграмма предлагаемой методики оценки сложности сборки

**Заключение**

Таким образом, проведенные исследования позволили классифицировать методы анализа сложности и предложить модель оценки сложности сборки узлов электронной аппаратуры. В отличие от подхода, сторонники которого ратуют за невнимание к деталям, чтобы сосредоточить внимание на поведении всей системы, предложенный подход к оценке сложности заключается в суммировании сложности как объекта производства, так и отдельных специфиче-

ских операций технологического процесса сборки. Более того, предлагается рассматривать предприятие не просто как сложно организованную статическую систему, но как набор самоорганизующихся компонентов, состоящих из сотрудников, цехов, линий сборки, ресурсов, заказчиков и проч.

Продолжение исследований в данной предметной области нами видится с учетом следующих проблем. Изначально проектировать сборку желательно с учетом человеческого фактора, принимая во вни-

мание взаємозв'язку технологічних операцій, інструментів та рекомендацій ергономіки. Це пов'язано з тим, що на ручних і напівавтоматичних робочих місцях роль людини-оператора має вирішальне значення, оскільки його дії безпосередньо впливають на час операційного циклу, якість та саму виконаність операцій, а також на його особисту безпеку та здоров'я. Важливо встановити зв'язок між рівнем ергономічності та складності та на цій основі зменшити ймовірність перепроектування процесу збирання. Очевидно, цю задачу необхідно вирішувати з використанням функції корисності, методів нечіткої логіки, комп'ютерних експериментів з манекеном людини.

У контексті управління складністю отримані результати дозволяють технологам встановлювати адекватну складність для оператора, робочого місця та всього процесу збирання.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ElMaraghy W., Elmaraghy H., Tomiyama T., Monostori L. Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61, iss. 2, p. 793–814. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
2. Schuha G., Rudolfa S., Riesener M. et al. Product production complexity research: developments and opportunities. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 60, p. 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.006>
3. Falck A.-C., Rosenqvist M. Relationship between complexity in manual assembly work, ergonomics and assembly quality. *Ergonomics for Sustainability and Growth, NES 2012*, Stockholm, Sweden.
4. Fässberg T., Fåsth Å., Hellman F. et al. Interaction between complexity, quality and cognitive automation. In: *4<sup>th</sup> CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2012, Ann Arbor, MI, USA.
5. D'Addona D. Emergent synthetic approach for management of complexity in production systems. *Cogent Engineering*, 2019, 20 p.
6. Papakostas N., Efthymiou K., Chryssolouris G. et al. Assembly process templates for the automotive industry. In: *3<sup>rd</sup> CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2010, Trondheim, Norway, p. 151–156.

7. ElMaraghy H., Samy S.N., Espinoza V. A classification Code for Assembly Systems. In: *3<sup>rd</sup> CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2010, Trondheim, Norway, p. 145–150.

8. Vogel W., Lasch R. *Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review*. Springer.com, 2016, 66 p.

9. Alkan B., Vera D. A., Ahmad M., et al. Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European J. Industrial Engineering*, 2018, vol. 12, no. 1, p. 115–151.

10. Соколов В.В. Подход к оценке сложности систем. *АИТ*. [Електронний ресурс] Режим доступу: [http://www.ait.org.ua/pub\\_podhod.html](http://www.ait.org.ua/pub_podhod.html) (Дата звернення 25.02.2021)

11. ElMaraghy W. H., Urbanic R. J. Assessment of manufacturing operational complexity. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, vol. 53, iss. 1, p. 401–406. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4)

12. Zeltzer L., Limere V., Aghezzaf E.-H., Van Landeghem H. Measuring the objective complexity of assembly workstations, *Int. Multi-Conf. on Computing in the Global Information Techn.*, Venice, Italy, 2012.

13. Efthymiou K., Pagoropoulos A., Papakostas N. et al. Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, vol. 7, iss. 4, p. 324–334.

14. Brinzer B., Schneider K. Complexity assessment in production: linking complexity drivers and effects. *53<sup>rd</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2020, vol. 93, p. 694–699. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.014>

15. Asadi N., Jackson M., Fundin A. Drivers of complexity in a flexible assembly system- A case study. *48<sup>th</sup> CIRP Conference on manufacturing systems — Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.082>

16. Ribeiro L., Hochwallner M. On the design complexity of cyberphysical production systems. *Complexity*, 2018, article ID 4632195, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/4632195>

17. Gazizov T., Sagiyeva I., Kuksenko C. Solving complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameters variations. *Complexity*, vol. 2019, article ID 6301326, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>

Дата отримання рукопису  
в редакцію 11.01 2021 г.

DOI: 10.15222/TKEA2021.1-2.54  
УДК 621.396.1

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: polalek562@gmail.com

## ОЦІНКА СКЛАДНОСТІ СКЛАДАННЯ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

Статтю присвячено оцінці складності збиральних систем. Розглянуто особливості ліній збирання як виробничих систем і причини постійного зростання їхньої складності. Складні системи збирання є дорогими для впровадження, запуску, контролю та обслуговування, складність впливає на продуктивність, якість і надійність, тому під час проектування будь-якої складальної системи необхідно шукати компроміси між особливостями її майбутнього функціонування, вартістю та складністю. Для цього потрібно вміти кількісно оцінювати складність. Проведене дослідження дозволило класифікувати методи аналізу складності та запропонувати модель, яка дозволяє певною мірою кількісно оцінювати складність збирання вузлів електронної апаратури та може використовуватися для роботи з ускладненими багатопредметними лініями. Модель враховує взаємозв'язок між варіантністю зібраних виробів, обладнанням робочих станцій, інструментами та засобами підтримки процесу складання. Обговорено об'єктивні та суб'єктивні аспекти складності виробництва. Розглянуто показники складності роботи оператора. Для чисельної оцінки складності показників пропонується користуватися шкалою Лайкерта. Продовження досліджень вбачається з врахуванням наступних проблем. Проектувати збирання бажано з урахуванням людського фактора, беручи до уваги взаємозв'язок технологічних операцій, інструментів і принципів ергономіки. Це пов'язано з тим, що на ручних і напівавтоматичних робочих місцях роль людини-оператора має вирішальне значення. Зв'язок рівня ергономічності та складності необхідно встановити з використанням функції корисності, методів нечіткої логіки, комп'ютерних експериментів з манекеном.

Ключові слова: складність виробництва, багатопредметні складальні лінії, моделі, соціально-технічні системи, кількісні методи.

## ASSESSMENT OF ASSEMBLY COMPLEXITY OF ELECTRONIC UNITS

*The article is devoted to the complexity assessment of harvesting systems. The author considers peculiarities of assembly lines as production systems and the reasons for the constant growth of their complexity. Complex assembly systems are expensive to implement, run, control and maintain, while their complexity affects performance, quality and reliability. Thus, when designing any assembly system, one must look for compromises between its future operation features, its cost and its complexity. To do this, you need to be able to quantify the complexity.*

*This study made it possible to classify the methods of complexity analysis and propose a model that allows quantifying, to some extent, the complexity of the assembly of electronic units and can be used to work with complex multi-subject lines. The study considers the complexity indicators for the operator's work. To numerically assess the complexity indicators, it is proposed to use the Likert scale.*

*It is assumed that further research should take into account the following issues. The assembly should be designed with consideration of the human factor and the interrelation of technological operations, tools and ergonomics. This is due to the fact that in manual and semi-automatic workplaces, the human operator plays the crucial part. The connection between ergonomics and complexity must be established using the utility function, methods of fuzzy logic, and computer experiments with a test dummy.*

*Keywords: production complexity, multi-subject assembly lines, models, socio-technical systems, quantitative methods.*

## REFERENCES

1. ElMaraghy W., Elmaraghy H., Tomiyama T., Monostori L. Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61, iss. 2, pp. 793–814. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
2. Schuha G., Rudolfa S., Riesenera M. et al. Product production complexity research: developments and opportunities. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 60, pp. 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.006>
3. Falck A.-C., Rosenqvist M. Relationship between complexity in manual assembly work, ergonomics and assembly quality. *Ergonomics for Sustainability and Growth, NES 2012, Stockholm, Sweden*.
4. Fässberg T., Fasth Å., Hellman F. et al. Interaction between complexity, quality and cognitive automation. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2012, Ann Arbor, MI, USA.
5. D'Addona D. Emergent synthetic approach for management of complexity in production systems. *Cogent Engineering*, 2019, 20 p. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1684174>.
6. Papakostas N., Efthymiou K., Chryssolouris G. et al. Assembly process templates for the automotive industry. In: *3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. 2010, Trondheim, Norway, pp. 151–156.
7. ElMaraghy H., Samy S.N., Espinoza V. A classification Code for Assembly Systems. In: *3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. 2010, Trondheim, Norway, pp. 145–150.
8. Vogel W., Lasch R. Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review. Springer.com, 2016, 66 p.
9. Alkan B., Vera D. A., Ahmad M., Bilal Ahmad B., Harrison R. Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review. *European J. Industrial Engineering*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 115–151.
10. Sokolov V.V. An approach to assessing the complexity of systems. *AIT*. Retrieved from: [http://www.ait.org.ua/p/pub\\_podhod.html](http://www.ait.org.ua/p/pub_podhod.html) (Date of access: 25.02.2021) (Rus)
11. ElMaraghy W. H., Urbanic R. J. Assessment of manufacturing operational complexity. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, vol. 53, iss. 1, pp. 401–406. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4)
12. Zeltzer L., Limere V., Aghezzaf E.-H., Van Landeghem H. Measuring the objective complexity of assembly workstations, *Int. Multi-Conf. on Computing in the Global Information Techn.*, Venice, Italy, 2012.
13. Efthymiou K., Pagoropoulos A., Papakostas N. et al. Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, vol. 7, iss. 4, pp. 324–334. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.07.003>
14. Brinzer B., Schneider K. Complexity assessment in production: linking complexity drivers and effects. *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2020, vol. 93, pp. 694–699. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.014>
15. Asadi N., Jackson M., Fundin A. Drivers of complexity in a flexible assembly system- A case study. *48<sup>th</sup> CIRP Conference on manufacturing systems — Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.082>
16. Ribeiro L., Hochwallner M. On the design complexity of cyberphysical production systems. *Complexity*, 2018, article ID 4632195, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/4632195>
17. Gazizov T., Sagiyeva I., Kuksenko C. Solving complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameters variations. *Complexity*, vol. 2019, article ID 6301326, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>

**Описание статьи для цитирования:**

Тыныныка А. Н. Оценка сложности сборки узлов электронной аппаратуры. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, с. 54–60. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.54>

**Cite the article as:**

Tynynyka A. N. Assessment of assembly complexity of electronic units. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.54>