
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

УДК 658.512.26

© С. В. Ванцов, Ф. В. Васильев, О. В. Хомутская, 2022

**ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Современное определение позволяет трактовать технологический процесс как сложную систему во взаимодействии с компонентами окружающей среды, в результате которого образуется полезный эффект. С этой точки зрения изучение технологического процесса подчиняется общим законам теории управления, благодаря чему принципы и алгоритмы, используемые этой теорией, могут быть адаптированы и распространены на управление технологическими процессами. Отмечается, однако, что основным отличием технологического процесса от традиционных объектов управления является постоянное непреодолимое и деградиационное изменение его характеристик по времени.

В статье показана возможность перехода от управления процессами в статистическом смысле к управлению по фактическому состоянию, т.е. к управлению процессом в реальном масштабе времени. Вводится понятие функциональной управляемости технологическими процессами. Приводится анализ обобщенной структурной схемы системы управления технологическим процессом как технически сложной системой. Приведена формализация целей управления технологическим процессом, позволяющая в дальнейшем сформировать задачи управления и типовые схемы управления характерными технологическими операциями. Показано, что особое значение приведенные теоретические положения приобретают при наступившем в настоящее время переходе от аналогового управления технологическим процессом к цифровому.

Кл. сл.: технологический процесс, надежность, цифровизация производства, системы управления производством, индустрия 4.0

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Любое промышленное производство сталкивается с необходимостью решения проблемы управления технологическими процессами. И эта проблема теми или иными способами решается для конкретного процесса на конкретном производстве в зависимости от характера применяемой технологии и располагаемых производственных ресурсов. Многообразие способов решения проблемы приводит, соответственно, и к многообразию применяемых для целей управления аппаратных и программных средств. Такая множественность определяется в значительной степени отсутствием единой теории и обобщающей методологии управления технологическими процессами. Их отсутствие порождает необходимость каждый раз заново решать задачи управления в каждом конкретном случае для каждого конкретного производства. С использованием общей теории управления технологическими процессами появляется возможность получения типовых универсальных решений, использование которых позволило бы сократить время на разработку конкретных систем управления технологическими процессами, уменьшить их стоимость и оптимизировать используемые материальные и интеллектуальные ресурсы.

Исходными предпосылками разработки такой теории являются выявление характерных возможностей получения и обработки управляющих сигналов, формирования граничных условий их существования и определения обобщенных целей управления. *Реализация изложенных положений требует формализации задачи управления технологическими процессами, определения формальных переменных, участвующих в процессе управления, и постановки формальных целей работы управляющих структур.*

**АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ И ОЦЕНКА
ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ**

Особенно актуальным такой подход становится в настоящее время в условиях промышленной революции 4.0, характеризуемой, в частности, цифровизацией производства, что обеспечивает новые возможности по сбору и обработке управляющих сигналов, построению оптимальных алгоритмов управления технологическими процессами и использованию искусственного интеллекта при обработке массивов BigData.

Об управлении технологическими процессами говорят уже много лет. По базе данных Scopus [1]

первое упоминание в статье датировано 1961 г. [2]. Со временем внимание к теме лишь усиливалось, с 1961 г. в среднем в статьях тема упоминалась не менее 147 раз в год. По данным Scopus, наиболее активно писал об управлении технологическими процессами Shi Jianjun. Еще в его трудах упоминалось о необходимости изучения и моделирования причинно-следственных связей между качеством продукта и переменными процессами производства с целью создания модели упреждающего управления, т.к. иначе из-за неопределенностей, вызванных начальными изменениями параметров процесса, оно не будет отражать реальную физику процесса [3, 4]. Сейчас же мы говорим о более глубоком погружении в тематику исследования реальных технологических процессов при условии повышенного внимания к цифровизации.

В соответствии с принятыми в настоящее время определениями технологический процесс представляет собой систему взаимодействия с компонентами окружающей среды, в результате которого образуется полезный эффект [5]. Следует заметить, что существует развитая теория управления сложными техническими системами.

Вместе с тем существует отдельный сегмент теории управления, не связанный с технологическими процессами. Однако принципы и алгоритмы, используемые в нем, могут быть адаптированы и распространены на управление технологическими процессами.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Деградационное изменение характеристик системы

Технологический процесс по своей сути представляет собой сложную техническую систему, *основным отличием которой является постоянное непреодолимое и деградационное изменение характеристик системы по времени.* Непреодолимость деградации определяется самой сутью технологических процессов, что связано, например, с износом инструмента при механической обработке или изменением состава растворов при гальванических операциях. Эти изменения с начала реализации технологического процесса ведут к ухудшению характеристик системы, компенсации которых осуществляются за счет постоянного вмешательства в ход процесса.

Это отличает их от традиционных систем управления техническими объектами, у которых изменение характеристик отдельных составляющих, входящих в систему, является нежелательным, но, как правило, случайным фактором, на-

рушающим стабильность ее функционирования при сохранении возможности управления системой в целом.

Тем не менее и к таким особым техническим системам, как технологический процесс, применимы общие принципы теории управления.

Особое значение это приобретает при наступившем в настоящее время переходе от аналогового управления технологическими процессами к цифровому. Это обеспечивает, с одной стороны, возможность более точного управления процессами, а с другой стороны, требует изменения принципов управления технологическими процессами.

Случайное изменение характеристик системы

Вместе с тем общие подходы к управлению техническими системами могут успешно использоваться для обеспечения управляемости технологическими процессами [6].

Высказанные положения означают, что вероятность возникновения отказов в ходе технологических операций изготовления отдельных элементов и технологического процесса получения изделия в целом носит случайный характер.

Одновременно следует отметить, что в данном случае речь идет об отказах не конечного изделия, т.е. события, которое можно исправить, например, с помощью ремонта изделия, что является самостоятельной технологической операцией, а об отказе процесса. Такое событие можно предупредить вмешательством в ход процесса за счет изменения его параметров или режимов. Возможность такого вмешательства определяется степенью управляемости процессом.

Вариации

При этом следует отметить, что управляемость процессом можно рассматривать в двух аспектах: в статистическом смысле и функциональном.

Управляемость в статистическом смысле можно исследовать, опираясь на теорию о статистической изменчивости процессов, основоположниками которой являются У. Шухарт и Э. Деминг [7]. Согласно этой теории все процессы в искусственных системах, к которым относятся и технологические процессы производства изделий, подвержены вариациям. Эти вариации могут быть обусловлены двумя типами причин: общими и особыми. Предполагается, что общие причины вариации обусловлены особенностями функционирования системы, а особые — нарушениями параметров и режимов функционирования системы.

Вариации представляют собой случайные отклонения в ходе функционирования технологической системы. Причины вариаций могут быть

трех видов: *системными*, *систематическими* и *случайными*.

Системные причины могут быть выявлены, но не скомпенсированы, т.е. они могут быть определены для данного технологического процесса, но уменьшить или исключить их влияние на возникновение отказа процесса не представляется возможным.

Систематические причины могут быть выявлены и скомпенсированы, т.е. их влияние на вариативность процесса является минимальным и предсказуемым.

Случайные причины не могут быть выявлены и не могут быть скомпенсированы. В сущности, именно они относятся к категории особых непредсказуемых причин. Случайные причины определяются рядом таких же случайных факторов, хотя и зависимых, но не управляемых со стороны самого технологического процесса.

В целом оценить величину и зависимость случайной причины отказа [8] от ее составляющих можно с использованием известного соотношения

$$\Delta = \sqrt{\sum_i^n k_{1i} k_{2i} \delta_i^2},$$

где Δ — величина случайной суммарной причины отказа; δ_i — i -я составляющая суммарной причины; k_{1i} — коэффициент, зависящий от закона распределения соответствующей i -й составляющей; k_{2i} — коэффициент влияния i -й составляющей на суммарную величину причины отказов.

В качестве закона распределения составляющей при управлении технологическими процессами в большинстве случаев выступает закон нормального распределения [9]. В соответствии со свойствами закона, коэффициент k_{1i} оказывается равным единице.

Коэффициент k_{2i} зависит от особенностей конкретного технологического процесса и определяется влиянием параметров и режимов технологического процесса на суммарную причину. В технологической практике степень влияния, как правило, может быть определена с использованием диаграмм Паретто.

Статистическая управляемость процессов

Представленное соотношение может быть использовано и для оценки управляемости технологическим процессом, казалось бы, в апостериорном, статистическом смысле, т.е. после реализации процесса. И в этом случае его использование для управления процессом в реальном масштабе времени, казалось бы, не имеет смысла. Однако для технологических процессов, особенно в условиях серийного производства, характерной осо-

бенностью является повторяемость, т.е. процесс повторяется многократно с неизменными начальными условиями. Количество повторений зависит от величины партии изготавливаемых изделий, а длительность осуществления процесса определяется временем получения из заготовки конечного продукта конкретной технологической операции.

В силу этой особенности технологических процессов приведенное соотношение можно использовать для корректировки функций управления процессом в сторону изменения и улучшения параметров и режимов процесса в заданных пределах, т.е. "стягивания" их к математическим ожиданиям этих параметров и режимов.

Численные данные о вариациях процесса в серийном производстве имеют тенденцию к уточнению и в известном смысле к их "предсказанию", что предоставляет большие возможности по управлению технологическим процессом в реальном масштабе времени.

При этом определяется, что *статистически управляемый процесс* — это процесс, в котором отсутствуют признаки особых причин вариаций [10].

Статистически управляемый процесс считается стабильным в том смысле, что при наличии случайных вариаций в их появлении нет закономерностей, и их пределы предсказуемы. При этом статистическая стабильность процесса не является основанием для утверждения о невозможности его отказа.

Функциональная управляемость процессов

Статистическая управляемость процесса не выступает конечной целью организации технологического процесса. Как только процесс становится стабильным, появляется возможность оценить влияние особых причин вариаций на его течение и определить механизмы их предотвращения.

К таким механизмам можно отнести функциональную управляемость технологическим процессом, т.е. возможность управления процессом в реальном масштабе времени.

Под *функциональной управляемостью технологическими процессами* будем понимать возможность целенаправленного воздействия на особые причины вариации с целью поддержания процесса в работоспособном состоянии.

Необходимо отметить, что технологические процессы по своей природе являются аналоговыми процессами. Это существенно ограничивает возможность вмешательства в процесс с целью предупреждения или компенсации особых вариаций, т.е. изменение технологических параметров и режимов непосредственно в ходе процесса является проблематичным.

Однако остается возможность оценить вероятность возникновения особых вариаций и результат их воздействия на отдельных этапах процесса [11]. Результат этой оценки можно использовать на этапе технологической подготовки производства, что позволяет до начала осуществления процесса учесть и отчасти предупредить нежелательные последствия влияния таких вариаций.

Вместе с тем развитие цифровых методов получения и обработки данных о течении аналогового процесса открывает новые возможности с точки зрения управляемости технологическими процессами.

Такой подход позволяет использовать для управления технологическими процессами известные методы теории автоматического управления сложными техническими системами, которыми по сути своей и являются технологические процессы.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Обобщенная структурная схема системы управления принципиально любой технической сложной системой, к классу которых относится и технологический процесс, представлена на рисунке [12].

В случае применения данной схемы для анализа и управления технологическими процессами под ее составляющими понимаются:

– **цель управления** — обеспечение стабильных, не изменяющихся по времени параметров и режимов процесса;

– **внешние воздействия** — воздействия технологической среды, оказывающие влияние на параметры и режимы технологического процесса; при осуществлении статистически устойчивого

процесса внешние воздействия имеют случайный характер;

– **управляющая система** — система воздействий, определяемых требованиями операционно-технологических карт на параметры и режимы процесса; задачей системы является сохранение их в заданных пределах допуска на изменения;

– **объект управления** — технологический процесс, неотъемлемым свойством которого является его деградация, т.е. обязательно ухудшение параметров и без внешнего вмешательства;

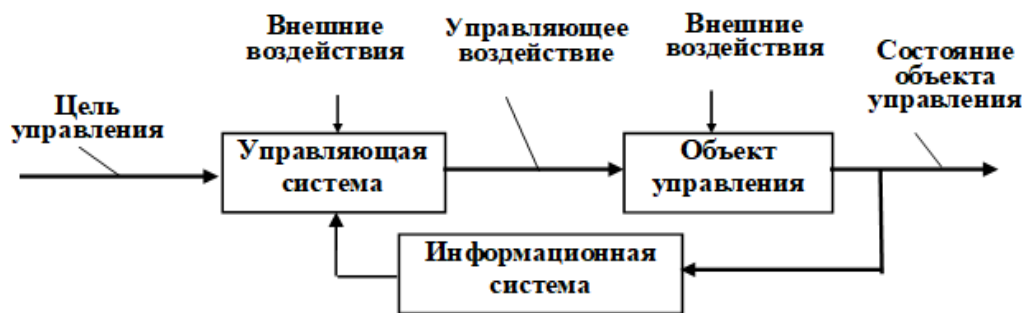
– **информационная система** — комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих сбор данных о состоянии объекта управления, их обработку и формирование управляющих воздействий на рабочие органы, обеспечивающие функционирование объекта; особенностью системы является ее работа в реальном масштабе времени;

– **управляющие воздействия** — комплекс мероприятий, зависящих от данных информационной системы и препятствующих процессам деградации параметров и режимов технологического процесса;

– **состояние объекта управления** — комплекс параметров и режимов технологического процесса.

Высказанные положения позволяют использовать для управления технологическими процессами классические подходы теории автоматического регулирования. В этом случае технологические процессы можно рассматривать как *класс замкнутых активных динамических управляемых систем направленного действия* [13].

Тогда технологический процесс как управляемая система может характеризоваться следующими группами переменных:



Обобщенная структурная схема системы управления технически сложной системой

- переменные состояния $x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)$, характеризующие параметры и режимы процесса;
- управляющие переменные $r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t)$, представляющие собой воздействия на объект управления, создаваемые управляющей системой;
- внешние переменные $f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t)$, создаваемые окружающей средой;
- наблюдаемые переменные $z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)$, представляющие собой параметры и режимы состояния процесса, сведения о которых поступают в управляющую систему; наблюдаемыми переменными, в частности, могут быть переменные состояния $x_i(t)$.

Для построения алгоритмов управления технологическим процессом все переменные удобно рассматривать как компоненты многомерных векторных функций и называть вектора $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{r}(t)$, $\mathbf{f}(t)$ и $\mathbf{z}(t)$ векторами *состояния, управления, возмущения* и *наблюдения* соответственно.

В каждый момент времени состояние технологического процесса как управляемой системы зависит от своего начального состояния $\mathbf{x}(t_0)$ и векторов $\mathbf{r}(t_0)$ и $\mathbf{f}(t_0)$, т.е. состояние технологического процесса в любой момент времени определяется уравнением:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}\{\mathbf{x}(t_0); \mathbf{r}(t, t_0); \mathbf{f}(t, t_0)\}, \quad (1)$$

где \mathbf{X} — функция общего состояния технологического процесса в произвольный момент времени.

Уравнение (1) можно рассматривать как обобщенную модель технологического процесса.

Характерным для технологических процессов является наложение ограничений на изменение (или его производные) вектора состояния и вектора управления, которые можно представить в виде:

$$\mathbf{x}(t) \in A(t), \quad \mathbf{r}(t) \in B(t). \quad (2)$$

Это означает, что изменения векторов $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{r}(t)$ должны быть ограничены замкнутыми областями $A(t)$ и $B(t)$ векторного пространства.

Целью управления технологическим процессом является поиск вектора управления $\mathbf{r}(t)$, обеспечивающего выполнение условия

$$E\{\mathbf{x}(t); \mathbf{r}(t); \mathbf{f}(t)\} = \text{extremum} \quad (3)$$

при одновременном удовлетворении условий на связи и ограничения, накладываемые внутренними свойствами технологического процесса как сложной технической системой.

Для оценки достижимости экстремума введем понятие показателя качества управления в виде функционала

$$Q = Q\{E_{\text{ид}} - E\},$$

где $E_{\text{ид}}$ — экстремум цели управления (3), соответствующий идеальному течению технологического процесса; E — значение показателя цели управления, соответствующее реальному состоянию процесса.

Очевидно, что стремление обеспечить минимум величины Q вступает в противоречие с имеющимися в наличии условиями реализуемости управляющей системы, которые характеризуются ее сложностью, стоимостью, надежностью и другими целесообразными ограничениями. Действительно, чем выше требования к качеству управления технологическим процессом, тем ненадежнее и дороже система управления, тем большего количества аппаратного и программного обеспечения требуется для ее реализации [14]. Затраты, связанные с реализацией такой системы, естественным образом переносятся на стоимость выпускаемой продукции и в конечном итоге на возможности применения ее пользователями.

Рассмотрим некоторую характеристику P , представляющую собой основную характеристику условия реализуемости управляющей системы, в качестве которой может выступать ее стоимость, сложность как в создании, так и в эксплуатации, степень надежности и т.п. В целом характеристика P может служить обобщенной мерой совокупности всех этих факторов. Тогда показателем для оценки эффективности управления можно принять функционал вида

$$C = C\{Q, P\}.$$

С учетом введенных определений задачей оптимизации управления технологическим процессом можно считать задачу определения вектора управления $\mathbf{r}(t)$, обеспечивающего минимум величины функционала C , т.е.

$$C = C\{Q, P\} \rightarrow \min,$$

и одновременно удовлетворяющего уравнению математической модели процесса (1) и ограничениям (2).

Постановка обобщенной задачи управления технологическим процессом как сложной технической системой имеет ряд особенностей, связанных с практическим производственным опытом.

Во-первых, в условиях современной промышленной революции 4.0 основное внимание уделяется переводу на цифровое управление уже существующих, практически отработанных технологических процессов. В этом случае задачи управления могут быть сведены к несколько более простой задаче регулирования процесса с целью

удержания его от деградации, т.е. формально это сводится к удержанию вектора управления в состоянии $\mathbf{x}(t_0)$, поскольку предполагается, что в начале осуществления технологического процесса все его режимы и параметры находятся в норме. Тогда основной целью функционирования управляющей системы является минимизация ошибки — разности векторов состояния процесса

$$\varepsilon = \{\mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}(t)\} \rightarrow \min.$$

Второй особенностью является тенденция к сокращению доли ручного труда и, соответственно, к внедрению в производство автоматизированного оборудования и цифровых методов обработки получаемых сигналов о состоянии технологического процесса. Последнее упрощает задачу построения алгоритмов управления и позволяет исключить или по крайней мере сократить влияние субъективных факторов, связанных с участием человека в процессе управления [15].

Одновременно с этим возможности цифровой обработки сигналов вектора управляющих переменных $\mathbf{r}(t)$ позволяют сократить время реакции системы на внешние возмущения и деградационные изменения параметров и режимов процесса и повысить эффективность управляющих воздействий.

Также применение цифровой обработки сигналов позволяет преодолеть противоречие, связанное с усложнением системы управления, а стало быть, и со снижением ее надежности, за счет увеличения точности обработки сигналов и уменьшения времени реакции на них системы в целом.

ВЫВОДЫ

Представленные формализации возможностей являются первым шагом к разработке обобщенной методологии создания типовых унифицированных систем управления технологическими процессами, учитывающими основные их особенности, связанные:

- с удержанием параметров и режимов технологических процессов от деградации;
- использованием цифровых принципов обработки параметров состояния процессов;
- увеличением скорости и точности обработки параметров состояния процесса.

Формальное описание состояния процессов как объектов управления позволяет сформировать обобщенные принципы решения задач оптимизации управления и разработать типовые унифици-

рованные модели процессов для различных областей приборостроения.

Определенные в ходе решения оптимизационных задач критерии и построенные модели процессов позволяют разработать типовые идеальные алгоритмы управления, на базе которых сведение функций управления к функциям регулирования позволит формировать унифицированные оптимальные алгоритмы для типовых случаев реализации технологических процессов.

Такой подход к исследованию методов управления технологическими процессами позволяет на практике обеспечить их надежность и в конечном результате повысить качество выпускаемой промышленной продукции.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-582.2022.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scopus Preview. URL: <https://www.scopus.com/>
2. Tague C.B., Bartels H.C. Manufacture and Control of High Frequency Transistors for Consumer Products // IRE Transactions on Reliability and Quality Control. 1961. Vol. RQC-10, no. 3. P. 1–6. DOI: 10.1109/IRE-PGRQC.1961.5009570
3. Zhong J., Liu J., Shi J. Predictive Control Considering Model Uncertainty for Variation Reduction in Multistage Assembly Processes // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2010. Vol. 7, no. 4. P. 724–735. DOI: 10.1109/TASE.2009.2038714
4. Jin R., Shi J. Reconfigured piecewise linear regression tree for multistage manufacturing process control // IIE Transactions. 2012. Vol 44, no. 4. P. 249–261. DOI: 10.1080/0740817X.2011.564603
5. Некрасов С.И., Некрасова Н.А. Философия науки и техники: тематический словарь. Орел: ОГУ, 2010. 289 с.
6. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 296 с.
7. Федюкин В.К. Управление качеством процессов. СПб.: Питер, 2004. 208 с.
8. Алексеев А.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем. [Электронный ресурс]. URL: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-izdaniya/Diagnostika-i-nadezhnost-avtomatizirovannyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-obrazovat-kontent-v-sisteme-distanc-obucheniya-Moodle-71193?mode=full>

9. Трофимова Е.А., Кисляк Н.В., Гилев Д.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / под ред. Е.А. Трофимовой. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2018. 160 с.
10. ГОСТ Р ИСО 11462-1-2007 Статистические методы. Руководство по внедрению статистического управления процессами. Часть 1. Элементы. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
11. Медведев А.М. Печатные платы. Механическое сверление // Технологии в электронной промышленности. 2012. № 8. С. 10–17.
12. Ванцов С.В., Соколов В.А., Хомутская О.В. Комплексная система управления промышленными роботами // Научное приборостроение. 2021. Том 31, №1. С. 96–106. URL; <http://iairas.ru/mag/2021/abst1.php#abst7>
13. Можаров В.А. Математическая модель зависимости усадки стеклотекстолита от его конструктивных параметров // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=40666>
14. Medvedev A., Vasilyev F., Sokolsky M. Testing of hidden defects in interconnections // Amazonia Investiga. 2019. Vol. 8, no. 22. P. 746–756. URL: <https://www.amazoniainvestiga.info/index.php/amazonia/article/view/829>
15. Медведев А.М., Можаров В.А. Многослойные печатные платы. Способы улучшения размерной стабильности материалов слоев // Производство электроники. 2011. № 5. С. 30–34. URL: https://russianelectronics.ru/files/57165/pe2011-05_30-35.pdf

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Контакты: Хомутская Ольга Владиславовна, khomutskayaov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 09.06.2022

TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL CAPABILITIES

S. V. Vantsov, F. V. Vasiliev, O. V. Khomutskaya

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation

The modern definition allows us to interpret the technological process as a complex system in interaction with the components of the environment, which leads to a beneficial effect. From this point of view, the technological process is subject to the general rules of control theory, thanks to which the principles and algorithms used in this theory can be adapted and extended to the control of technological processes. It is noted, however, that the main difference between the technological process and traditional control objects is the constant irresistible and degradative change in its characteristics over time.

The article shows the possibility of transition from process control in the statistical sense to control in terms of the actual state, i.e. to real-time process control. The concept of functional controllability of technological processes is introduced. An analysis of the generalized block diagram of the technological process control system as a technically complex system is given. The formalization of the goals of technological process control is given, which makes it possible to form further control tasks and typical control schemes for specific technological operations. It is demonstrated that these theoretical guidelines play a crucial role in the current shift from analog to digital control of technological processes.

Keywords: technological process, reliability, production digitalization, production management systems, industry 4.0

PROBLEM STATEMENT

Any industrial production is faced with the need to solve the problem of technological process control. And this problem is solved in one way or another for a specific process in a specific workplace depending

on the nature of the technology used and the available production resources. A variety of methods for solving the problem lead, respectively, to a variety of hardware and software used for management purposes. Such multiplicity is largely caused by the lack of a single theory and summarizing methodology for

technological process control. Their absence gives rise to the need to re-solve management tasks each time on a case-by-case basis for each particular production. Using the general theory of process control, it becomes possible to obtain standard universal solutions, the use of which would reduce the time for the development of specific process control systems, reduce their cost and optimize the material and intellectual resources used.

The initial prerequisites for the development of such a theory are the identification of characteristic possibilities for obtaining and processing control signals, the formation of boundary conditions for their existence and determination of generalized control goals. *The implementation of the stated provisions requires formalizing the task of controlling technological processes, determining the formal variables involved in the control process, and setting formal goals for the work of control structures.*

RELEVANCE OF THE TASK AND CURRENT STATE ASSESSMENT

This approach is now especially relevant in the context of the industrial revolution 4.0, characterized, in particular, by the digitalization of production, which provides new opportunities for collection and processing of control signals, creating optimal algorithms for controlling technological processes; and using artificial intelligence when processing big data arrays.

Technological process management has been talked about for many years. According to the Scopus database [1], the first mention in the article is dated 1961 [2]. Over time, attention to the topic has only intensified. Since 1961, on average, articles mentioned the topic at least 147 times a year. According to Scopus, Jianjun Shi was the most active writer on process control. His writings also mentioned the need to study and model the causal relationships between product quality and production variables in order to create a proactive control model, since otherwise, due to uncertainties caused by initial changes in process parameters, the control does not reflect the real physics of the process [3, 4]. In light of this, we are considering a deeper immersion in the topic of research on actual technological processes in terms of increased attention to digitalization.

In accordance with the currently adopted definitions, a technological process is a system of interaction with environmental components, as a result of which a useful effect gets formed [5]. It should be noted that there is a developed theory of managing complex technical systems.

However, there is a separate segment of control theory that is not related to technological processes. However, the principles and algorithms used therein

can be adapted and extended to technological process control.

CHARACTERISTIC FEATURES OF THE CONTROL OBJECT

Degradation change in system characteristics

The technological process is essentially a complex technical system, *the main distinguishing feature of which is the constant insurmountable and degradative change in the characteristics of the system over time.* The insurmountability of degradation is determined by the very essence of technological processes, which is associated, for example, with tool wear during machining or a change in the composition of solutions during galvanic operations. These changes since the beginning of the technological process lead to a deterioration of system characteristics, compensation of which is carried out by constant intervention in the process.

This distinguishes them from traditional systems for managing technical objects, in which changing the characteristics of individual components included in the system is undesirable, but, as a rule, an accidental factor that disrupts the stability of its operation while the ability to control the system as a whole is maintained.

Nevertheless, to such special technical systems as the technological process, the general principles of control theory apply.

This is of particular importance during the current transition from analog control of technological processes to digital. This provides, on the one hand, the possibility of more accurate process control, and, on the other hand, requires a change in the principles of technological process control.

Random change in system characteristics

At the same time, general approaches to the management of technical systems can be successfully used to ensure the controllability of technological processes [6].

The stated provisions mean that the probability of failures during the operations of the manufacture of individual elements and the technological process of obtaining a product in general, is random in nature.

At the same time, it should be noted that in this case we are considering failures not of the final product, i.e. events that can be corrected, for example, by repairing the product, which is an independent workflow operation, but a process failure. Such an event can be prevented by interfering with the process by changing its parameters or modes. The possibility of such an intervention is determined by the degree of process controllability.

Variations

It should be noted that the controllability of the process can be considered in two aspects: statistical and functional.

Controllability in the statistical sense can be investigated based on the theory of statistical variability of processes, founded by W. Shewhart and W. Deming [7]. According to this theory, all processes in artificial systems, which include technological processes for the manufacture of products, are subject to variations. These variations can be due to two types of causes: common and special. It is assumed that the general causes of variation are due to the peculiarities of the system functioning, and that special ones are violations of the parameters and modes of the system function.

Variations are random deviations during the operation of the technological system. The causes of variation can be of three kinds: *systemic, systematic, and random.*

Systemic causes can be identified but not compensated; they can be determined for a given technological process, but it is not possible to reduce or eliminate their influence on the occurrence of process failure.

Systematic causes can be identified and compensated, i.e. their influence on process variability is minimal and predictable.

Random causes cannot be identified and cannot be compensated. In fact, they belong to the category of special, unpredictable reasons. Random causes are determined by a number of similar random factors, although dependent, but not controlled by the technological process itself.

In general, it is possible to estimate the value and dependence of the random cause of failure [8] on its components using the known ratio

$$\Delta = \sqrt{\sum_i^n k_{1i} k_{2i} \delta_i^2},$$

where Δ is the value of the random total cause of failure; δ_i — i -th component of the total cause; k_{1i} — coefficient based on the distribution law of the corresponding i -th component; k_{2i} — coefficient of impact of the i -th component on the total value of the cause of failures.

In most cases, the law of normal distribution acts as the rule for the distribution of components in the control of technological processes [9]. According to the properties of the law, the coefficient k_{1i} is equal to 1.

The coefficient k_{2i} depends on the peculiarities of a particular technological process and is determined by the influence of parameters and modes of the technological process on the total cause. In technological practice, the degree of influence can generally be determined using Pareto diagrams.

Statistical process controllability

The presented ratio can also be used to assess the controllability of the technological process, seemingly in a posterior, statistical sense, i.e. after the implementation of the process. In this case, its use for real-time process control, it would seem, does not make sense. However, for technological processes, especially in commercial production, a characteristic feature is repeatability, i.e. the process is repeated many times with unchanged initial conditions. The number of repetitions depends on the volume of the batch of manufactured products, and the duration of the process is determined by the time of obtaining the final product of a specific technological operation from the workpiece.

Due to this feature of technological processes, the above ratio can be used to adjust the process control functions towards changing and improving the parameters and modes of the process within the specified limits, i.e. "pulling" them to the mathematical expectations of these parameters and modes.

Numerical data on process variations in serial production tends to be refined and, in a certain sense, to "predict" them, which provides great opportunities for real-time process control.

A statistically controlled process is defined as a process in which there are no signs of special causes of variations [10].

A statistically controlled process is considered stable if the presence of random variations does not guarantee any patterns of their appearance, and limits of variations are predictable. At the same time, the statistical stability of the process is not the basis for asserting the impossibility of its failure.

Functional process controllability

Statistical process controllability is not the ultimate goal of technological process organization. As soon as the process becomes stable, it becomes possible to assess the impact of special causes of variation on its course and determine the patterns for their prevention.

Such patterns include the functional controllability of the technological process, i.e. the ability to control the process in real time.

By *functional control of technological processes*, we understand the possibility of targeted influence on special causes of variation in order to maintain the process in a working state.

It should be noted that technological processes are essentially analog processes. This significantly limits the possibility of intervention in the process in order to prevent or compensate for special variations, i.e. changing technological parameters and modes directly during the process is problematic.

However, it is still possible to predict the occurrence of special variations and the consequences of

their impact at various stages of the process [11]. The result of this evaluation can be used at the stage of technological preparation of production, which allows us to take into account and partially prevent the undesirable consequences of the influence of such variations before the start of the workflow.

At the same time, the development of digital methods for obtaining and processing data on the course of the analog process opens up new possibilities in terms of controllability of technological processes.

This approach makes it possible to use the well-known methods of the theory of automatic control of complex technical systems, which, in essence, are technological processes, to control them.

SOLVING THE PROBLEM

A generalized block diagram of the control system for any technically complex system, to which the technological process belongs, is shown in Fig [12].

Fig. Generalized structural diagram of the control system of a technically complex system

In the case of applying this scheme for the analysis and control of technological processes, its components are understood as

– **purpose of control** — ensuring stable parameters and modes of the process that do not change over time;

– **external impacts** — impacts of the technological environment that affect the parameters and modes of the technological process; external influences are random during the implementation of a statistically stable process;

– **control system** — system of impacts determined by the requirements of operational flow charts on the process parameters and modes; the task of the system is to keep them within the specified tolerance limits for changes;

– **control object** — a technological process, an integral property of which is its degradation, i.e. mandatory deterioration of parameters and without external intervention;

– **information system** — a set of hardware and software tools that ensure the collection of data on the state of the control object, its processing and the formation of control actions on the working bodies that ensure the operation of the object; the feature of the system is its real-time operation;

– **control actions** — a set of measures that depend on the data of the information system and prevent the degradation of the parameters and modes of the technological process;

– **state of the control object** — a set of parameters and modes of the technological process.

The stated provisions allow the use of the classical approaches of the theory of automatic regulation for controlling technological processes. In this case, technological processes can be considered as a *class of closed active dynamic controlled systems of directional action* [13].

Then the technological process as a controlled system can be characterized by the following groups of variables:

– $x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)$ are state variables that characterize process parameters and modes;

– $r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t)$ are control variables that represent the impacts on the control object created by the control system;

– $f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t)$ are external variables created by the environment;

– $z_1(t), z_2(t), \dots, z_l(t)$ are observed variables which are the process state parameters and modes, information about which is supplied to the control system; observed variables, in particular, may be state variables $x_i(t)$.

To construct process control algorithms, it is convenient to consider all variables as components of multidimensional vector functions and call vectors $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{r}(t)$, $\mathbf{f}(t)$ and $\mathbf{z}(t)$ as *state, control, perturbation, and observation vectors*, respectively.

At each moment of time, the state of the technological process as a controlled system depends on its initial state $\mathbf{x}(t_0)$ and vectors $\mathbf{r}(t_0)$ and $\mathbf{f}(t_0)$, i.e. the state of the technological process at any time is determined by the equation:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}\{\mathbf{x}(t_0); \mathbf{r}(t, t_0); \mathbf{f}(t, t_0)\}, \quad (1)$$

where \mathbf{X} is a function of the overall state of the technological process at any given time.

Equation (1) can be considered as a generalized technological process model.

A characteristic of technological processes is the imposition of restrictions on the change (or its derivatives) of the state vector and the control vector, which can be represented as:

$$\mathbf{x}(t) \in \mathbf{A}(t), \quad \mathbf{r}(t) \in \mathbf{B}(t). \quad (2)$$

This means that the changes of vectors $\mathbf{x}(t)$ and $\mathbf{r}(t)$ must be bounded by the closed domains $\mathbf{A}(t)$ and $\mathbf{B}(t)$ of the vector space.

The purpose of technological process control is to find the control vector ensuring the fulfillment of the condition

$$E\{\mathbf{x}(t); \mathbf{r}(t); \mathbf{f}(t)\} = \text{extremum} \quad (3)$$

while satisfying the conditions connections and limita-

tions imposed by the internal properties of the technological process as a complex technical system.

To assess the achievability of the extremum, we will introduce the concept of a control quality indicator in the form of a functional

$$Q = Q\{E_{\text{ид}} - E\},$$

where $E_{\text{ид}}$ is the extremum of the control target (3), corresponding to the ideal technological process course; E is the value of the control target indicator corresponding to the actual state of the process.

It is obvious that the desire to ensure the minimum value of Q conflicts with the existing conditions for the feasibility of the control system, which are characterized by its complexity, cost, reliability and other reasonable restrictions. Indeed, the higher the requirements for the quality of process control, the more unreliable and expensive the control system, the more hardware and software is required for its implementation [14]. The costs associated with the implementation of such a system are naturally transferred to the cost of manufactured products and, ultimately, to the affordability of users.

Let us consider a characteristic P , which is the main characteristic of the condition for the realizability of the control system, which can be its cost, complexity both in creation and operation, degree of reliability, etc. In general, the characteristic P can serve as a generalized measure of the totality of all these factors. Then the indicator for assessing the control effectiveness can be taken as a functional

$$C = C\{Q, P\}.$$

Taking into account the entered definitions, the task of optimizing process control can be considered the task of determining the control vector $\mathbf{r}(t)$, providing the minimum value of functional C , i.e.

$$C = C\{Q, P\} \rightarrow \min,$$

and simultaneously satisfying the equation of the mathematical model of the process (1) and the constraints (2).

Setting a generalized technological process control task as a complex technical system has a number of features related to practical production experience.

Firstly, in the conditions of the modern industrial revolution 4.0, the main attention is paid to the transfer of already existing, practically proven technological processes to digital control. In this case, the control tasks can be reduced to a somewhat simpler task of controlling the process in order to keep it from degradation, i.e. formally, this boils down to holding the control vector in a state $\mathbf{x}(t_0)$, since it is assumed that at the beginning of the technological process, all its modes and parameters are normal. Then the main goal of the functioning of the control system is to minimize

the error — the difference in the state vectors of the process

$$\varepsilon = \{\mathbf{x}(t_0) - \mathbf{x}(t)\} \rightarrow \min.$$

The second feature is the tendency to reduce the share of manual labor and, accordingly, to introduce automated equipment and digital methods for processing the received signals on the state of the workflow into manufacturing. The latter simplifies the task of constructing control algorithms and makes it possible to exclude or at least reduce the influence of subjective factors associated with human participation in the control process [15].

At the same time, the possibilities of digital processing of signals of the vector of the control variables $\mathbf{r}(t)$ make it possible to reduce the response time of the system to external disturbances and degradation changes in the parameters and modes of the process and increase the efficiency of control actions.

Also, the use of digital signal processing makes it possible to overcome the contradiction associated with the complexity of the control system, and therefore, with a decrease in its reliability, by increasing the accuracy of signal processing and reducing the response time of the system as a whole.

CONCLUSIONS

The presented formalizations of capabilities are the first step towards the development of a generalized methodology for creating typical unified process control systems, taking into account their main features related to:

- retention of parameters and modes of technological processes from degradation;
- using digital principles for processing parameters of workflow state;
- increasing the speed and accuracy of processing parameters of state of the workflow.

A formal description of the state of processes as control objects makes it possible to form generalized principles for solving control optimization problems and develop typical unified process models for various areas of instrumentation.

The criteria determined in the course of solving optimization problems and the constructed process models make it possible to develop typical ideal control algorithms, on the basis of which the reduction of control functions to regulation functions will allow the formation of unified optimal algorithms for typical cases of the implementation of technological processes.

This approach to the study of process control methods makes it possible to ensure their reliability in practice and, as a result, improve the quality of manufactured industrial products.

REFERENCES

1. Scopus Preview. URL: <https://www.scopus.com/>
2. Tague C.B., Bartels H.C. Manufacture and Control of High Frequency Transistors for Consumer Products. *IRE Transactions on Reliability and Quality Control*, 1961, vol. RQC-10, no. 3, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IRE-PGRQC.1961.5009570
3. Zhong J., Liu J., Shi J. Predictive Control Considering Model Uncertainty for Variation Reduction in Multistage Assembly Processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, vol. 7, no. 4, pp. 724–735. DOI: 10.1109/TASE.2009.2038714
4. Jin R., Shi J. Reconfigured piecewise linear regression tree for multistage manufacturing process control. *IIE Transactions*, 2012, vol. 44, no. 4, pp. 249–261. DOI: 10.1080/0740817X.2011.564603
5. Nekrasov S.I., Nekrasova N.A. *Filosofiya nauki i tekhniki: tematische slovar'* [Philosophy of Science and Technology: Thematic Dictionary]. Orel: OGU, 2010. 289 p. (In Russ.).
6. Gludkin O.P., Chernyaev V.N. *Analiz i kontrol' tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva REHA: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Analysis and control of technological processes of production of REA: a textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1983. 296 p. (In Russ.).
7. Fedyukin V.K. *Upravlenie kachestvom protsessov* [Process Quality Management]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2004. 208 p. (In Russ.).
8. Alekseev A.V. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh system* [Diagnostics and reliability of automated systems]. (In Russ.). URL: <http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-izdaniya/Diagnostika-i-nadezhnost-avtomatizirovannyh-sistem-Elektronnyi-resurs-elektron-obrazovat-kontent-v-sisteme-distanc-obucheniya-Moodle-71193?mode=full>
9. Trofimova E.A., Kislyak N.V., Gilev D.V. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie* [Probability Theory and Mathematical Statistics: A Textbook]. Trofimova E.A., ed. Yekaterinburg: UrFU Publ., 2018. 160 p. (In Russ.).
10. GOST R ISO 11462-1-2007 Statistical methods. Implementation Guide for Statistical Process Management. Part 1. Elements. Moscow: Standartinform, 2020. 38 p. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200051018> (In Russ.).
11. Medvedev A.M. [Printed circuit boards. Mechanical drilling]. *Tekhnologii v ehlektronnoi promyshlennosti* [Technologies in the Electronics Industry], 2012, no. 8, pp. 10–17. (In Russ.).
12. Vantsov S.V., Sokolov V.A., Khomutskaya O.V. [Comprehensive control system for industrial robots]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2021, vol. 31, no. 1, pp. 96–106. DOI: 10.18358/np-31-1-i96106 (In Russ.).
13. Mozharov V.A. [A mathematical model of relation between shrink of laminate and its structural parameters]. *Trudy MAI* [Proceedings of the Moscow Aviation Institute], 2013, no. 65, pp. 36. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=40666> (In Russ.).
14. Medvedev A., Vasilyev F., Sokolsky M. Testing of hidden defects in interconnections. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 22, pp. 746–756. URL: <https://www.amazoniainvestiga.info/index.php/amazonia/article/view/829>
15. Medvedev A.M., Mozharov V.A. [Multilayer printed circuit boards. Methods for Improving Dimensional Stability of Layer Materials]. *Proizvodstvo ehlektroniki* [Electronics manufacturing], 2011, no. 5, pp. 30–34. URL: https://russianelectronics.ru/files/57165/pe2011-05_30-35.pdf (In Russ.).

Contacts: *Khomutskaya Olga Vladislavovna*,
 khomutskayaov@gmail.com

Article received by the editorial office on 09.06.2022