

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

Туровский Я.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65
Воронежский государственный университет
Россия, г. Воронеж, Университетская, пл. 1
yaroslav_turovsk@mail.ru*

Суровцев А.С.

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, г. Воронеж, пр-т. Революции, д. 19
alexandr_surovtsev@mail.ru*

Авцинов И.А.

*Воронежский государственный университет инженерных технологий
Россия, г. Воронеж, пр-т. Революции, д. 19
alexandr_surovtsev@mail.ru*

Аннотация: Предлагается способ повышения надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем, заключающийся в построении системы поддержки принятия решений, осуществляющий выбор режима управления технологическим процессом. Введены показатели надежности и противоаварийной безопасности. Проведено имитационное моделирование перевода технологического процесса из предаварийного состояния в исправное.

Ключевые слова: человек-оператор, эргатическая система, надежность, противоаварийная безопасность.

Введение

В настоящее время большинство отечественных и зарубежных промышленных производств являются эргатическими системами, так как не обходятся без обязательного участия человека-оператора (ЧО) в управлении технологическими процессами (ТП). Так называемый «человеческий фактор», который выражается в принятии неправильных решений или несвоевременной реализации управленческих действий оператором, может приводить к отказам ТП. Отказ ТП может нанести экономический ущерб предприятию или даже вызвать на нем аварию. Одними из причин принятия неправильных или несвоевременных управленческих действий оператором являются недостаточный уровень подготовки и его функциональное состояние (ФС) в процессе выполнения работы.

Под надежностью в технике понимают свойство, которое характеризует способность системы сохранять во времени свое состояние (например, исправное, работоспособное, неработоспособное и др.) [1]. Безопасность технологических процессов – свойство, определяющее способность технологических процессов не переходить в опасное состояние [2, 3]. В ГОСТ 27.002-2015 указано: «опасное состояние – состояние объекта, в котором возникает недопустимый риск причинения вреда людям, или окружающей среде, или существенных материальных потерь, или других неприемлемых последствий» [4]. Таким образом, признаком наступления аварии можно считать переход технологического процесса в опасное состояние.

Построение системы, повышающей надежность (увеличивающей время безотказной работы благодаря снижению вероятности отказа) и противоаварийную безопасность (снижающей вероятность отказа с переходом в опасное состояние) ТП за счет ведения непрерывного наблюдения за изменением ФС ЧО, является актуальной задачей. Актуальность продиктована сложностью разработки способа определения ФС ЧО, позволяющего непрерывно оценивать ФС ЧО и соответствующего эргономическим требованиям рабочего места ЧО.

Целью данной работы является построение способа повышения надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем.

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 19-29-01156 мк.

1 Показатели надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем

Построим диаграмму состояний технологического процесса [1]. Диаграмма включает следующие состояния: 1) предотказное (состояние ТП, которое характеризуется повышенным риском его отказа); 2) опасное (выше указано, что переход ТП в это состояние можно считать признаком наступления аварии); 3) неработоспособное (будем считать наступление этого состояния признаком отказа, приносящего материальный ущерб производству) и др.

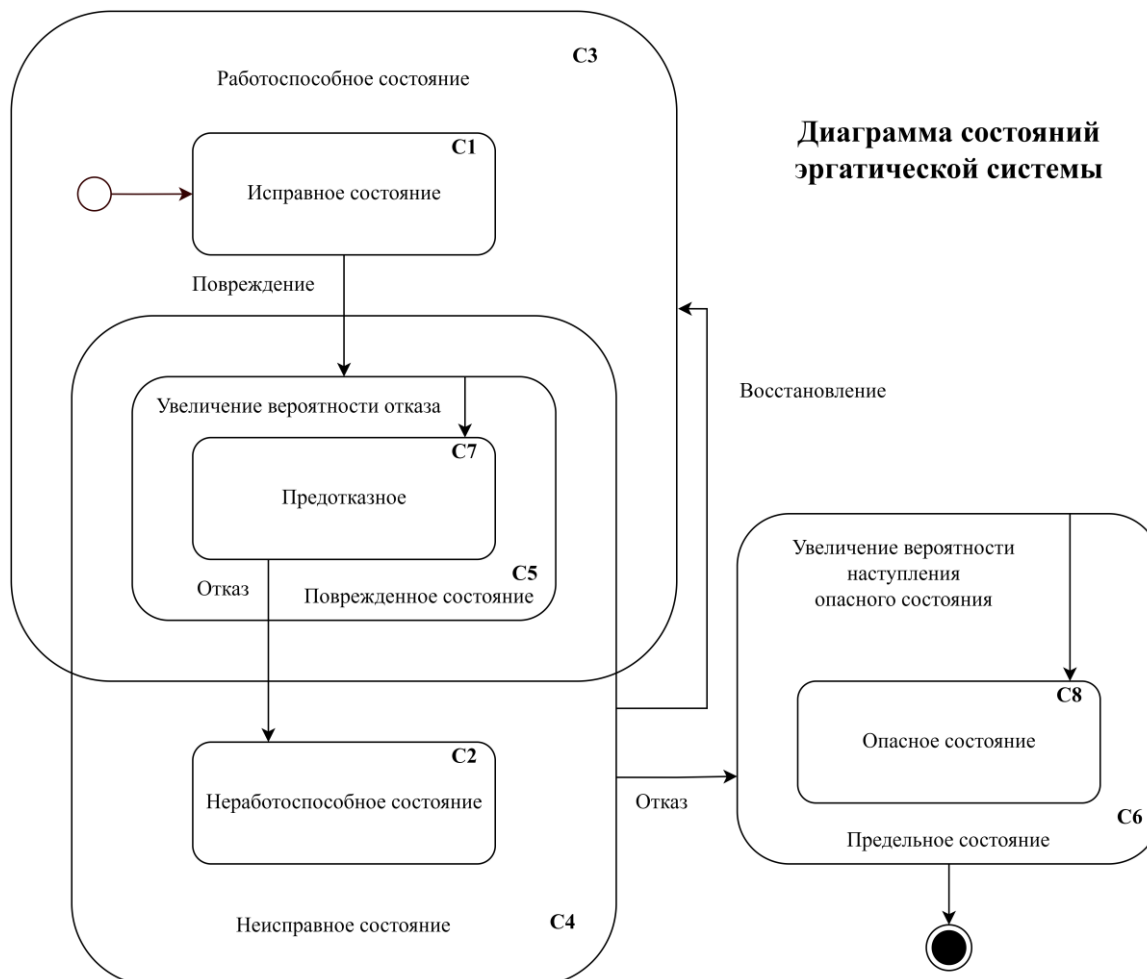


Рис. 1. Диаграмма состояний технологического процесса

Рассмотрим ситуацию, когда ТП находится в предотказном состоянии (состояние «С7» на рис. 1). Из предотказного состояния ТП может быть переведен в:

- исправное или поврежденное состояние (любое работоспособное состояние, но не предотказное) с вероятностью восстановления из предотказного состояния $P_{\text{восст_из_предотк}} = P(C1|C7) + P(C5|C7)$. Будем считать $P_{\text{восст_из_предотк}}$ показателем надежности.
- неработоспособное с вероятностью аварийной остановки ТП в предотказном состоянии $P_{\text{авар_ост_в_предотказном}} = P(C2|C7)$ (аварийная остановка выполняется при нарушении ТП, когда дальнейшая его эксплуатация приведет к аварии).
- предельное с вероятностью $P_{\text{аварии_в_предотказном}} = P(C6|C7)$. Предельное состояние ТП – состояние, в котором его восстановление в работоспособное состояние невозможно или нецелесообразно. Переход ТП из предотказного состояния в опасное происходит через предельное состояние. Будем считать, что сокращение вероятности перехода ТП из предотказного в предельное состояние (из С7 в С6 на рис. 1) снизит вероятность перехода ТП из предотказного состояния в опасное состояние (из С7 в С8), то есть предлагаемый способ повышения противоаварийной безопасности эргатических систем не увеличит $P(C8|C7)$ при снижении $P(C6|C7)$. Поэтому $P_{\text{аварии_в_предотказном}}$ будем считать показателем противоаварийной безопасности.

2 Способ повышения противоаварийной безопасности эргатических систем

Для повышения надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем предлагается способ, заключающийся в построении системы поддержки принятия решений (СППР), которая включается в автоматизированную систему управления ТП и определяет режим управления ТП (автоматический или автоматизированный). Структурная схема СППР показана на рис 2.

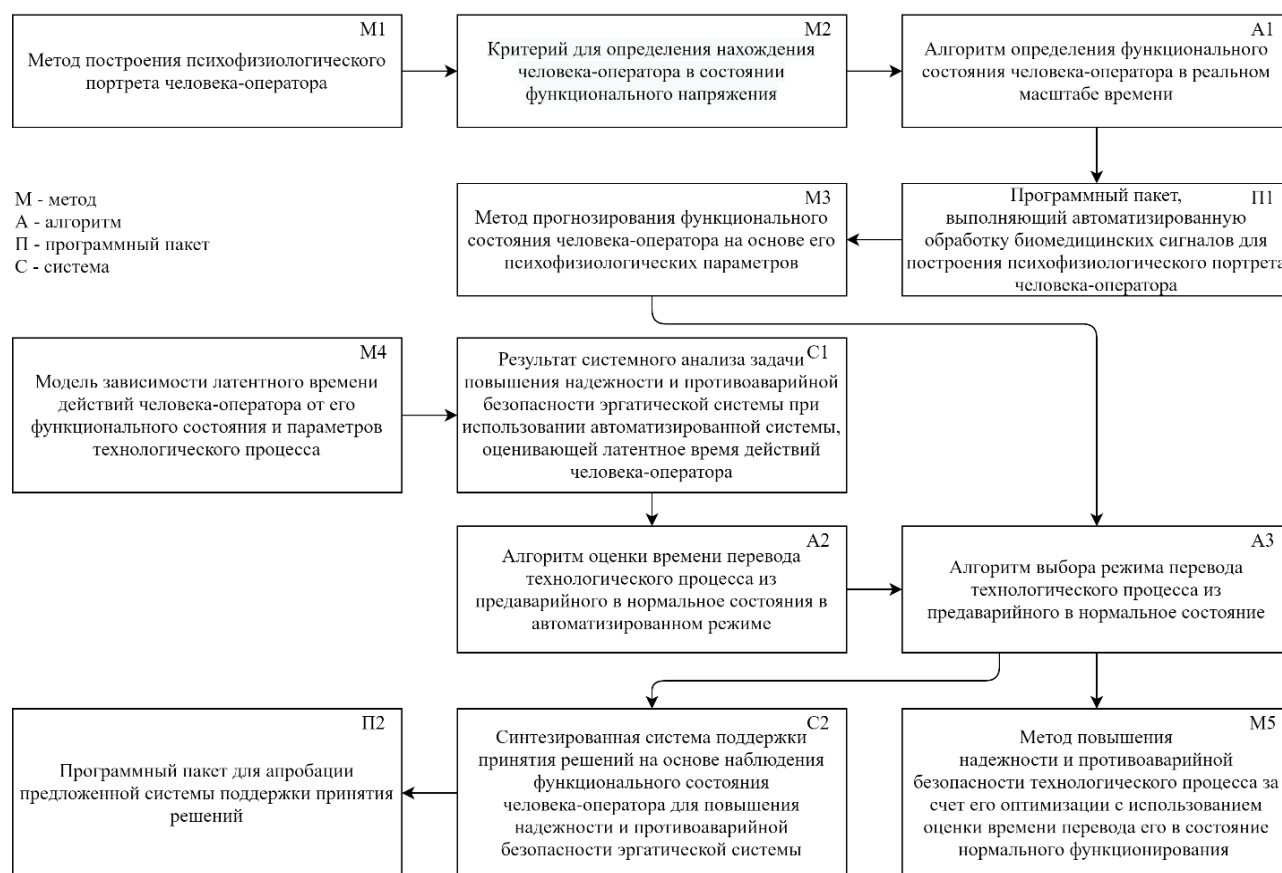


Рис. 2. Структурная схема системы поддержки принятия решений

СППР проводит анализ variability сердечного ритма (ВСР) для получения оценки ФС ЧО. «П1» (на рис. 2) строит психофизиологического портрет (ПП) ЧО в его различных функциональных состояниях. Набор состояний, для которых строится ПП, определяется условиями технологического процесса. ПП ФС ЧО, построенный по сигналам ВСР – вектор диапазонов допустимых в данном ФС значений статистических и спектральных показателей ВСР. Модель оценки латентного времени действий человека-оператора «М4» приведена в работе [5]. Системный анализ «С1» позволил определить набор задач для построения СППР: 1) «А1» – алгоритм определения функционального состояния человека-оператора в реальном масштабе времени; 2) «М3» – метод прогнозирования функционального состояния человека-оператора на основе его психофизиологических параметров; 3) «М4» – модель зависимости латентного времени действий человека-оператора от его функционального состояния и параметров ТП; 4) «А3» – алгоритм выбора режима перевода ТП из предаварийного в нормальное состояние.

«А3» выбирает автоматический режим перевода ТП из предотказного в работоспособное состояние, если необходимое на перевод время $T_{\text{необходимое}}$ не превышает доступное $T_{\text{доступное}}$ и значение $P_{\text{восст_из_предотк}}$ не ниже уровня, заданного в документации ТП. $T_{\text{доступное}}$ оценивается с использованием математической модели, определенной в документации ТП, и значениями параметров ТП. $T_{\text{необходимое}}$ складывается из времени отклика измерительного прибора $T_{\text{измерит_прибора}}$, латентного времени действий ЧО $T_{\text{человека}}$ (для каждого ФС строится своя «М4») и задержки исполнительного механизма $T_{\text{исполнит_мех}}$ системы ручного управления. Автоматически режим перевода ТП из предотказного в работоспособное состояние предполагает выполнение аварийной остановки (АО) ТП. После АО, ТП переходит либо в неработоспособное С2 (рис. 1), либо в предельное С6.

3 Программный пакет для апробации предложенного метода

Для апробации СППР разработан программный пакет («П2» на рис. 2), моделирующий эргатическую систему, в которой ТП выполняет полимеризацию бутадиена. Построение схемы ТП и задание условий полимеризации выполнено в соответствии с «производственной инструкцией по режиму работы установки производства полибутадиеновых каучуков» одного из предприятий России. ЧО отслеживает значение двух показателей – абсолютного давления и температуры. Система управления состоит из элементов, обеспечивающих охлаждение и сброс давления (управляются АСУ и ЧО), и элемента аварийного сброса давления (управляется только автоматической системой).

Введены два типа объектов, действия которых направлены на перевод ТП в предельное состояние: 1) объекты, вызывающие нагрев реактора; 2) объекты, вызывающие уменьшение объема реактора. Уравнения реакции идеального перемешивания и скорости поглощения теплоты системой охлаждения показаны в (1) и (2) соответственно:

$$\frac{d^2 C_b}{dt^2} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{dC_a}{dt} - \frac{dC_b}{dt} \right) - \frac{1}{\tau} \left(\frac{d \left((V - m_b \cdot \rho - V_{DS}) \cdot \left((V - m_b \cdot \rho - V_{DS} - V_{выбрасыв}(t)) \cdot C_a \right) \right)}{dt} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dQ_{сист.охл.}}{dt} = -\max Q'_{сист.охл.} \cdot \max(1, F_{cooler.acy} + F_{valve.чo}), \quad (2)$$

где C_a – начальная концентрация бутадиена в реакторе, $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$,

C_b – концентрация бутадиенового каучука, $\frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$,

τ – среднее время превращения бутадиена в бутадиеновый каучук, с,

m_b – масса бутадиенового каучука в реакторе, кг,

ρ – плотность бутадиенового каучука, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

V – объем реактора, м^3 ,

V_{DS} – объем, вытесненный объектом, который вызывает уменьшение объема реактора, м^3 ,

$V_{выбр}$ – объем выбрасываемого из реактора бутадиена, м^3 . Складывается из объема, выбрасываемого через клапан сброса давления, и объема, выбрасываемого через клапан аварийного сброса давления,

$\frac{dQ_{сист.охл.}}{dt}$ – скорость выделения теплоты системой охлаждения, $\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$,

$\max Q'_{сист.охл.}$ – максимальная скорость поглощения теплоты системой охлаждения, $\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Приведем начальные значения и условия полимеризации (табл. 1), опустив тривиальные начальные значения такие, как $C_b|_{t=0} = 0$, $\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{t=0} = 0$ и др.

Таблица 1. Параметры, задающие начальные значения и условия полимеризации.

Назначение параметра	Название	Формула расчета	Единица измерения
Начальные значения	Объем реактора	$V = 16$	м^3
	Масса бутадиена в реакторе	$m_a = P_{\text{предав}} \cdot V / T_{\text{предав}} \cdot M \cdot R$	кг
	Температура в реакторе	$T = 20$	$^{\circ}\text{C}$
Условия полимеризации	Номинальная температура в реакторе	$T_{\text{ном}} = 30$	$^{\circ}\text{C}$
	Предаварийная температура в реакторе	$T_{\text{предав}} = 38$	$^{\circ}\text{C}$
	Критическая температура в реакторе	$T_{\text{крит}} = 45$	$^{\circ}\text{C}$
	Номинальное давление в реакторе	$P_{\text{ном}} = 0.8$	МПа
	Предаварийное давление в реакторе	$P_{\text{предав}} = 1$	МПа
	Критическая температура в реакторе	$P_{\text{крит}} = 1.5$	МПа

Проведено имитационное моделирование перевода ТП из предотказного состояния в нормальное (табл. 2). При использовании СППР, выполняющей выбор режима управления ТП, происходит увеличение $P_{\text{восст_из_ предотк}}$ и уменьшение $P_{\text{аварии_в_ предотказном}}$. Это позволяет утверждать, что предложенный способ обеспечивает повышение надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем.

Таблица 2. Результаты имитационного моделирования (медианные значения показателей).

Показатель	Без СППР	С СППР	Разница
$P_{\text{восст_из_ предотк}}$	0,49	0,67	0,19
$P_{\text{аварии_в_ предотказном}} = P(C6 C7)$	0,34	0,21	-0,13
Количество выброшенной из реактора шихты $m _{t=0} = 339$, кг.	63,5	86,5	23

Заключение

В данной работе рассмотрена проблема возникновения аварий на промышленных производствах по причинам «человеческого фактора». Для решения проблемы, то есть для снижения аварийности на промышленных производствах, предложено выполнить построение системы поддержки принятия решений. Эта система ведет непрерывное наблюдение за изменением ФС (функционального состояния) ЧО (человека-оператора) и выбирает режим управления технологическим процессом (автоматически или автоматизированный). Предложенная система должна повышать надежность (увеличивать время безотказной работы благодаря снижению вероятности отказа) и противоаварийную безопасность (снижать вероятность отказа с переходом в опасное состояние).

В результате анализа построенной диаграммы состояний технологического процесса определены показатели надежности ($P_{\text{восст_из_ предотк}}$ – вероятность восстановления ТП из предотказного состояния в работоспособное) и противоаварийной безопасности ($P_{\text{аварии_в_ предотказном}}$ – вероятность перехода ТП из предотказного в предельное состояние). Приведена структурная схема системы поддержки принятия решений (СППР) для повышения надежности и противоаварийной безопасности технологических процессов. Предложенная СППР выполняет выбор режима управления технологическим процессом (автоматический или автоматизированный). Выбор режима зависит от соотношения между доступным ($T_{\text{доступное}}$) на перевод технологического процесса в работоспособное состояние и необходимым ($T_{\text{необходимое}}$) интервалами времени, а также от $P_{\text{восст_из_ предотк}}$. Оценка $T_{\text{необходимое}}$ складывается из $T_{\text{человека}}$ и параметров, которые определяются условиями ТП. $T_{\text{человека}}$ рассчитывается с использованием психофизиологического портрета ЧО и прогноза изменения функционального состояния ЧО.

Разработан программный пакет, моделирующий эргатическую систему, в которой технологический процесс выполняет полимеризацию бутадиена. Введены два типа объектов, действия которых направлены на перевод технологического процесса в предельное состояние. Проведено имитационное моделирование, по результатам которого повышается надежность и противоаварийная безопасность рассмотренного технологического процесса при использовании предложенного метода.

Литература

1. Балакирев В.С., Большаков А.А. Надежность и диагностика автоматизированных систем: Учебное пособие для вузов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 144 с.
2. Остряков Ю.А., Шевченко И.В. Проектирование механизмов и машин: эффективность, надежность и техногенная безопасность: учебное пособие. – М.: НИЦ ИМФА-Р, 2020. – 260 с.
3. Щербинина Н.В., Осипович В.С., Яшкин К.Д. Основы промышленной безопасности: учебно-методическое пособие. – Минск: БГУИР, 2016. – 95 с.
4. Штык М.Н., Фотиева В.Ю. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 28с.
5. Авцинов И.А., Суворцев А.С., Туровский Я.А. Модель для оценки латентного времени действий оператора при стабилизации технологического процесса. – Тамбов: ТГТУ, 2018. – С. 578-590.