

Модель для повышения надежности систем безопасности в технологических процессах опасных производств

Александр С. Суровцев	¹	alexander.surovtsev.vrn@gmail.com
Игорь А. Авцинов	¹	igor.awtzinov@yandex.ru
Ярослав А. Туровский	^{2,3}	yaroslav_turovsk@mail.ru
Сергей В. Борзунов	²	sborzunov@gmail.com

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Россия

³ Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Профсоюзная ул., 65, г. Москва, 117342, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена проблема обеспечения безопасности в технологических процессах, заключающаяся в снижении вероятности возникновения аварий. Предложена классификация состояний технологического процесса, с точки зрения системы предотвращения аварий. Набор таких состояний состоит из: нормального функционирования, предаварийного, аварийного и аварии. Состояние нормального функционирования и предаварийное состояние предполагает отсутствие необратимых изменений в технологическом процессе. Рассматривается случай, когда от оператора требуется сформировать управленческие действия, направленные на стабилизацию технологического процесса, когда технологический процесс находится в предаварийном состоянии. Показан пример диаграммы потока данных технологического процесса, который включает в себя помимо стандартных компонентов также и человека-оператора, системы отслеживания и системы ручного и автоматического управления. Используя диаграмму, определена последовательность этапов, которые происходят при переводе технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования. Предложен способ оценки возможности перевода технологического процесса из предаварийного состояния в нормальное функционирование. Это способ заключается в оценке временных соотношений между доступным и необходимым для стабилизации системы. Время, необходимое на стабилизацию, складывается из временной задержки измерительного прибора, латентного времени оператора и времени отклика исполнительного механизма. Время задержки измерительного прибора и время отклика исполнительного механизма определяются условиями технологического процесса. Разработана модель оценки латентного времени человека, основанная на законе «сила-длительность». Выполнено исследование крайних случаев формулы оценки доступного и необходимого времени. Проведено имитационное моделирование, по результатам которого была выполнена оценка путей оптимизации технологического процесса с целью повышения надежности системы безопасности.

Ключевые слова: контроль деятельности человека-оператора, моделирование времени отклика, имитационное моделирование

Model for improving the reliability of safety systems in the technological processing of hazardous industries

Alexander S. Surovtsev	¹	alexander.surovtsev.vrn@gmail.com
Igor A. Awtzinov	¹	igor.awtzinov@yandex.ru
Yaroslav A. Turovsky	^{2,3}	yaroslav_turovsk@mail.ru
Sergei V. Borzunov	²	sborzunov@gmail.com

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² Voronezh state university, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

³ Institute of Management Problems V.A. Trapeznikova of the Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 65, Moscow, 117342, Russia

Abstract. The problem of safety provisioning in technological processes, which aims the reducing the probability of accidents is considered. Classification of technological process states from the point of view of accident prevention system is offered. The set of such states consists of: normal functioning, pre-emergency, emergency and accident. The state of normal functioning and pre-emergency state assume the absence of irreversible changes in the technological processes. It is considered the case when the operator has to form some management actions which are aimed to stabilize the process, when the process is in the pre-accident state. It is shown an example of a data flow diagram, which includes also the human operator, the tracking system, and the system of manual and automatic control in additional to the standard components of such systems. By using the data flow diagram, it is defined the sequence of stages which occur when the process is transferred from the pre-emergency states to the state of normal operation. A method for assessing the possibility of transferring a technological process from a pre-emergency state to a normal operating in proposed. This method consists in estimating the time relation between the available and the necessary for stabilization of the system. The time required for stabilization consists of the time delay of the measuring device, the latency of the operator and the response time of the actuator. The delay time of the measuring device and the response time of the actuator are determined by the conditions of the technological process. The model for estimating the latency of the person is based on the law "force-time" is developed. A study of the boundary cases of the formula for estimating the available and the necessary time is carried out. Stimulation modelling is conducted, which results are used to estimating the ways of optimizing the technological process in order to improve the reliability of the accident prevention system.

Keywords: control of human-operator activity, response time modelling, stimulation modelling

Для цитирования

Суровцев А.С., Авцинов И.А., Туровский Я.А., Борзунов С.В. Модель для повышения надежности систем безопасности в технологических процессах опасных производств // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 116–127. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-116-127

For citation

Surovtsev A.S., Awtzinov I.A., Turovsky Ya.A., Borzunov S.V. Model for improving the reliability of safety systems in the technological processing of hazardous industries. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 116–127. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-116-127

Введение

В настоящее время существует множество технологических процессов, нарушение которых может привести к авариям. Последствия аварий нередко несут серьезный вред как работникам, поддерживающих работу данного процесса, так и окружающей среде. Примером такого процесса может служить полимеризация бутадиена, толуола, циклогексана и других токсичных химических соединений.

Ряд технологических процессов функционирует под управлением систем автоматизированного управления (АСУ). До возникновения аварии состояние технологического процесса можно представить следующим набором: нормальное функционирование, предаварийное состояние, аварийное состояние и авария. Под предаварийным состоянием в данном случае понимается такое функционирование системы, при котором не начались необратимые изменения. Аварийное состояние рассматривается как функционирование системы, при котором предполагается, что необратимые изменения имеют место. Нередко технологическую систему можно привести в состояние нормального функционирования из предаварийного, аварийного или состояния аварии. Величина ущерба складывается, по меньшей мере, из вреда людям и окружающей среде и величины экономического ущерба. АСУ, помимо поддержания технологического процесса в состоянии нормального функционирования, могут выполнять и часть функции по обеспечению безопасности при угрозе возникновения аварии. Обеспечение безопасности должно происходить с учетом величины возможного вреда. То есть потенциально высокая величина ущерба может стать причиной задействования крайних мер для обеспечения безопасности. В таком случае крайние меры могут нести некоторый ущерб, но величина этого ущерба ожидается меньшей, чем от угрозы, на устранение которой они направлены. Поэтому повышение надежности функций безопасности систем АСУ нередко достигается путем того, что человеку-оператору может предоставляться возможность выполнять управление технологическим процессом.

Любая система, в деятельность которой вовлечен человек, включает в себя также и человеческий фактор. Нивелирование человеческого фактора может осуществляться за счет запуска соответствующих механизмов для устранения последствий от возможных в данный момент времени действий человека, несущих вред. Человек является сложной системой. Сложность

проявляется в том числе и в трудности предсказания возможных действий человека. Одним из вариантов предсказания возможных действий человека является построение модели, входные данные для которой – функциональное состояние человека в рассматриваемый момент времени и его индивидуальные особенности.

Цель работы – разработка математической модели, которая позволит повысить безопасность технологических процессов за счет учета действий оператора.

Модель оценки латентного времени оператора

На рисунке 1 показан один из вариантов диаграммы потоков данных технологического процесса. Помимо системы, выполняющей технологический процесс, диаграмма включает в себя оператора, АСУ, систему автоматического и ручного управления оператором технологического процесса, а также систему сбора информации, контроля деятельности оператора и систему контроля времени отклика.

Система, выполняющая технологический процесс, преобразуя исходные компоненты, порождает не только продукты технологического процесса, но и побочные продукты реакции (например, вредные выбросы), что актуально для химического производства. Система сбора информации предоставляет данные оператору и АСУ о концентрации исходных веществ, продуктов технологического процесса и концентрации вредных веществ, а также о показателях протекания технологического процесса (например, о температуре и давлении). АСУ на основе данных, полученных от системы сбора информации, формирует сигналы управления технологическим процессом, а также посылает сигнал тревоги оператору при необходимости. Необходимость в подаче сигнала тревоги возникает, когда система не находится в состоянии нормального функционирования. Оператор на основе данных о показателях технологического процесса может отправлять команды системе ручного управления. Сигнал тревоги для оператора является признаком необходимости выполнения оперативных действий для приведения системы в состояние нормального функционирования.

Кроме этого, на рисунке 1 показан ряд объектов, целью которых является предупреждение возможных последствий от человеческого фактора. Одним из таких объектов является система определения латентного времени. Эта система на основе некоторых параметров оператора и других объектов, данных от системы сбора информации и показателей системы ручного управления позволяет получить информацию

для расчета скорости изменения параметров технологического процесса, времени отклика измерительного прибора, латентного времени оператора и времени отклика исполнительного механизма системы ручного управления. На основе данных, полученных от системы определения времени отклика, система контроля деятельности оператора может послать сигнал либо системе автоматического управления, либо системе ручного управления. В данном случае системе

автоматического управления посылается сигнал аварийной остановки технологического процесса, если система контроля деятельности оператора определила, что оператор не успеет вовремя совершить действия, которые приведут систему в состояние нормального функционирования. Если же оператор успеет, то система отправляет системе ручного управления сигнал на разрешение исполнять команды оператора.

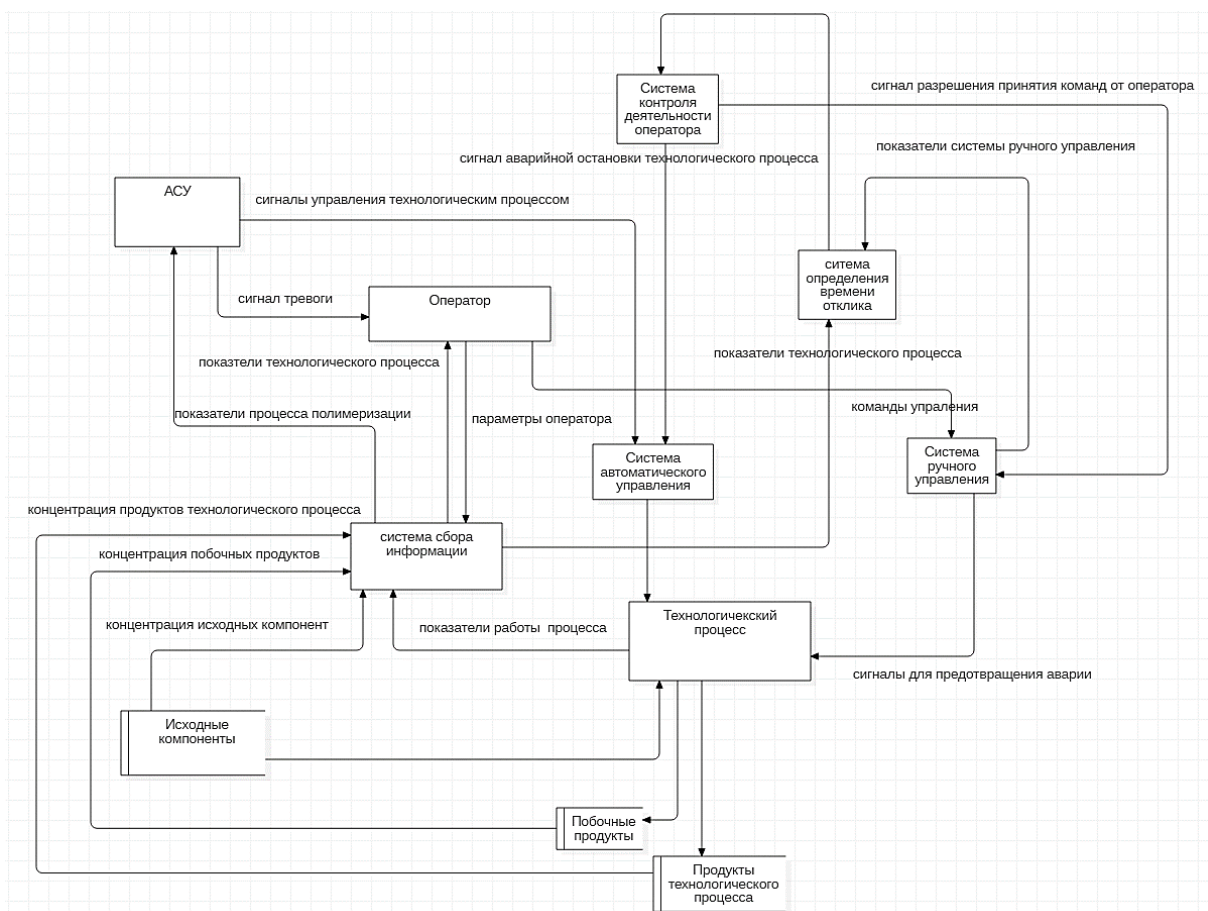


Рисунок 1. Диаграмма потока данных технологического процесса при наличии человека-оператора и систем отслеживания, автоматического и ручного управления технологическим процессом

Figure 1. Data flow diagram of the technological process which consists the human-operator and the systems for tracking, automatic and manual control of this process

Рассмотрим случай, когда от оператора требуются оперативные действия для приведения технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования. Аварийное состояние и состояние аварии предполагают наличие необратимых изменений, в отличие от рассматриваемого случая, поэтому требуют отдельного рассмотрения и выходят за рамки данного исследования. Согласно диаграмме потока данных (рисунок 1) последовательность действий, которая должна быть выполнена для перевода системы из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования, реализуется

по следующему алгоритму. АСУ на основе данных, полученных от системы сбора информации, определяет, что система находится в предаварийном состоянии. Поэтому АСУ посылает оператору сигнал тревоги. Оператора интерпретирует состояние технологического процесса и определяет порядок действий, требуемый на приведение системы в состояние нормального функционирования, после чего оператор при помощи системы ручного управления выполняет действия, которые, по его мнению, должны привести технологический процесс в норму. На рисунке 2 показана диаграмма Ганта, которая отражает вид последовательности этапов при

приведении технологического процесса в норму, когда он находится в предаварийном состоянии, от момента начала измерения параметров до завершения действий, направленных на приведение процесса в норму.

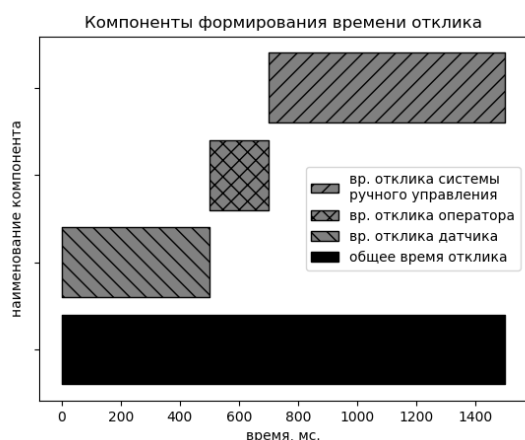


Рисунок 2. Диаграмма Ганта формирования времени отклика из задержки датчика, латентности действий оператора и задержки исполнительного механизма при стабилизации технологического процесса

Figure 2. Gantt chart of the response time formation by the delay of the sensor, the operator latency and the response of the actuator in the stabilization process

Таким образом, время, которое необходимо для того, чтобы перевести технологический процесс из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования, состоит из трех временных интервалов – отклика датчика (измерительного прибора), латентности человека и отклика исполнительного устройства системы ручного управления. Следовательно, условием успешного приведения системы в состояние нормального функционирования будет считаться неперевышение значения суммы этих трех компонентов значения времени, доступного для приведения технологического процесса в состояние нормального функционирования. Это условие показано в формуле:

$$T_{available} \geq T_{sensor} + T_{person} + T_{HMI}, \quad (1)$$

где $T_{available}$ – время доступное, для стабилизации системы, с. В общем случае рассматривается ситуация, когда в каждый момент времени с допустимым уровнем точности этот процесс может быть описан монотонно-убывающей или монотонно возрастающей функцией; T_{person} – латентное время человека-оператора, с. Показывает минимальное время, которое требуется человеку на интерпретацию данных, полученных с органов чувств, и принятие решения; T_{sensor} – значение латентного времени измерительного (измерительный прибор позволяет получить оценку величины F наблюдаемого

параметра) прибора (время, которое пройдет с момента начала измерения до того момента, как измерительный прибор составит оценку значения измеряемой характеристики), с; T_{HMI} – время выполнения команд пользователя системой ручного управления, с. Определяется интервалом времени от поступления команды оператора до момента завершения выполнения данной команды.

В данном случае $T_{available}$ показывает время, по истечении которого система перейдет либо в аварийное состояние, либо возникнет авария. В общем случае будем рассматривать ситуацию, когда в каждый момент времени с допустимым уровнем точности этот процесс может быть описан функцией, среди значений производных которой только первая производная может принимать ненулевые значения:

$$T_{available} = \frac{F_{critical} - F}{F'}, \quad (2)$$

где F – текущее значение наблюдаемого параметра после измерения датчиком, усл. ед. (условные единицы измерения наблюдаемого параметра, например, температура в градусах Кельвина, давление в паскалях, и т. д.); $F_{critical}$ – критическое значение наблюдаемого параметра, усл. ед. Пересечение критического значения является индикатором возникновения аварийной ситуации или аварии на технологическом процессе; F' – скорость изменения наблюдаемого параметра в окрестности момента времени измерения параметра, усл. ед./с.

Значение латентного времени оператора (T_{person}) зависит от индивидуальных особенностей человека и его функционального состояния. Латентное время человека не может находиться ниже некоторой величины, определяемой его состоянием. Оно также зависит от величин наблюдаемого параметра и от скорости его изменения. Согласно закону «сила-длительность» время отклика должно обратно пропорционально зависеть от величины стимула, в данном случае в качестве стимула выступают измеренное значение наблюдаемого параметра и скорость его изменения. Для T_{person} предлагается использовать формулу:

$$T_{person} = L_{min} + \frac{(L_{max} - L_{min})}{(1 + F'^2 \cdot \alpha)} \times \frac{(F_{crit} - F)}{(F_{crit} - F_{nom})} \cdot \exp\left(1 \cdot \left(\frac{F - F_{nom}}{F_{crit} - F_{nom}}\right)\right), \quad (3)$$

где L_{min} , L_{max} – параметры, которые позволяют определить минимальное и максимальное

время, которое требуется человеку на интерпретацию данных, полученных с органов чувств, с. Оно определяется индивидуальными особенностями конкретного человека-оператора и его функциональным состоянием; F_{nom} – максимальное значение наблюдаемого параметра, при котором управления производственным процессом может осуществляться в автоматическом режиме (то есть без участия человека), ед. изм. Превышении номинального (F_{nom}) значения свидетельствует о наличии предаварийной ситуации, в таком случае требуется вмешательство человека-оператора. Это вмешательство должно выражаться в управленческих действиях, направленных на приведение параметров технологического процесса в допустимые рамки; F_{nom} – значение наблюдаемого параметра, превышение которого означает, что система не находится в состоянии нормального функционирования, усл. ед.; α – коэффициент приведения (ед.) к безразмерной величине, численно равный 1 (ед.)2.

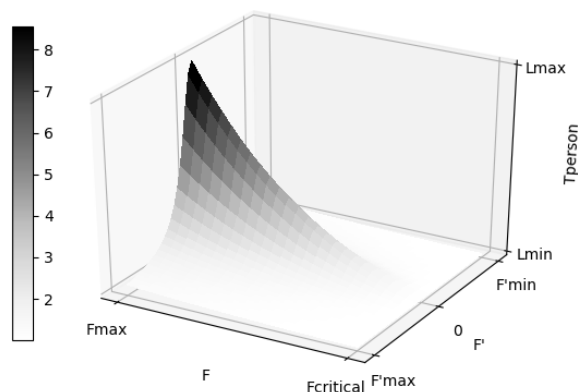


Рисунок 3. Зависимость времени отклика человека от величин наблюдаемого параметра и производной наблюдаемого параметра

Figure 3. The dependence of the response time of a person of the values of the observed parameter and the derivative of the observed parameter

На рисунке 3 показана зависимость T_{person} в соответствии с принятой моделью от значений наблюдаемого параметра и первой производной наблюдаемого параметра.

Условие того, что T_{person} не может быть меньше некоторого значения, показано в формуле:

$$T_{person} \geq L_{min}. \quad (4)$$

Объединим времена отклика рассматриваемого процесса приведения системы из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования, не относящееся к оператору:

$$T_{system} = T_{sensor} + T_{HMI}. \quad (5)$$

Подставим формулы (2), (3) и (5) в формулу (1):

$$\begin{aligned} \frac{F_{critical} - F}{F'} &\geq T_{system} + L_{min} + \\ &+ \frac{(L_{max} - L_{min})}{(1 + F'^2 \cdot \alpha)} \times \\ &\times \frac{(F_{crit} - F)}{(F_{crit} - F_{nom})} \times \exp \left(1 \cdot \left(\frac{F - F_{nom}}{F_{crit} - F_{nom}} \right) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Исследование крайних случаев

$$1. \quad F = F_{nom}.$$

Разность $F_{critical} - F$ принимает максимальное значение. Исходя из того, что диапазон значений F' должен быть определен для каждого технологического процесса, можно определить диапазон значений $T_{available}$.

Например, F_{nom} , $F_{critical}$ и F' принимают значения, соответственно, 100, 150 и 2 ед./с, тогда $F_{critical}$ равно 25 с. И формула (6) принимает следующий вид:

$$\frac{F_{critical} - F}{F'} \geq T_{system} + L_{min} + \frac{(L_{max} - L_{min})}{(1 + F'^2 \cdot \alpha)}. \quad (7)$$

$$2. \quad F = F_{critical}.$$

$$T_{available} = 0. \quad (8)$$

Неравенство (6) не выполняется, так как $T_{available} = 0$ (8), а $L_{min} > 0$ (4). Следовательно, в этих условиях нет возможности стабилизировать производственный процесс при помощи действий оператора. Ситуация считается аварийной, поэтому системе контроля (рисунок 1) необходимо запускать механизмы автоматической (работающей некоторое время без участия человека) системы безопасности.

$$3. \quad F' = 0.$$

$$T_{available} \rightarrow \infty \quad (9)$$

$$\frac{1}{1 + F'^2 \cdot \alpha} \rightarrow \infty \quad (10)$$

$$T_{person} \rightarrow \infty \quad (11)$$

Нулевое значение скорости изменения наблюдаемого параметра означает, что для стабилизации производственного процесса будет применен измерительный прибор, оператор и исполнительная система со сколь угодно большим латентным временем (9) и (10). Следует отметить, что в данном случае информирование оператора системой отслеживания технологического процесса необходимо, так как $T_{person} \rightarrow \infty$ (11), поэтому оператор может не принимать никаких действий, пока показатели значения параметра не станут изменяться.

4. $F' \rightarrow \infty$.

$$\lim_{F' \rightarrow \infty} T_{available} = 0 \quad (12)$$

$$\lim_{F' \rightarrow \infty} T_{person} = L_{min} \quad (13)$$

Стремление скорости значения наблюдаемого параметра приводит к тому, что $T_{available}$ и T_{person} принимают свои предельные значения, равные, соответственно, 0 (12) и L_{min} (13), то есть доступное время для стабилизации системы равно нулю, а латентное время оператора принимает минимальное значение. С учетом соотношения (4) ($L_{min} > 0$) неравенство (6) не выполняется. Такая ситуация может рассматриваться как аварийная, и для стабилизации производственного процесса необходим запуск автоматической системы безопасности:

$$T_{sensor} > T_{available}.$$

Данное соотношение показывает, что задержка измерительного прибора больше времени, доступного для стабилизации системы. Более того, при таких условиях данная модель показывает, что значение наблюдаемого параметра (F) превысило критическое значение ($F_{critical}$) в тот момент времени, когда это значение выдано измерительным прибором. Поэтому такой случай следует рассматривать как аварийную ситуацию. Стабилизация производственного процесса требует активации автоматической системы безопасности для избежания аварии:

$$L_{min} > T_{available}.$$

Неравенство указывает, что минимальное значение латентного времени человека больше, чем время, доступное для стабилизации системы. Следовательно, согласно рассматриваемой модели значение наблюдаемого параметра (F) превысит критическое значение ($F_{critical}$) ещё до того, как оператор успеет интерпретировать сигнал системы отслеживания технологического процесса. Такую ситуацию следует рассматривать как аварийную. Стабилизация производственного процесса требует запуска автоматической системы безопасности:

$$T_{HMI} > T_{available}.$$

Условие характеризует, что время отклика интерфейса исполнительной системы больше, чем время, доступное для стабилизации системы. Согласно диаграмме Ганта (рисунок 2) при любых значениях остальных параметров значение наблюдаемого параметра (F) пересечет критическую отметку ($F_{critical}$) еще до того, как исполнительная система завершит выполнение команды оператора. Такой случай следует рассматривать как аварийную ситуацию. Стабилизация

производственного процесса требует активации автоматической системы безопасности.

В свете изложенного выше формула (6) содержит ряд параметров, среди которых часть параметров является характеристикой технологического процесса, а остальные отражают индивидуальные особенности человека-оператора. Диапазоны значений параметров, описывающих характеристики технологического процесса, должны быть получены из соответствующей документации. Следовательно, имеется возможность оценить диапазоны значений доступного времени (времени с момента начала измерения до момента времени, когда значение параметра превысит критическое значение), диапазон T_{system} и, следовательно, возможный диапазон значений латентного времени оператора.

Кроме этого, человек в рамках конкретного технологического процесса может получать определенные функциональные нагрузки. То есть набор функциональных состояний, в которых может пребывать оператор, определяется технологическим процессом. На основе функциональных проб можно вычислить индивидуальные значения характеристик человека-оператора при различных функциональных состояниях. Отсюда следует, что имеется возможность рассчитать примерные значения границ латентного времени оператора (от L_{min} до L_{max}) для множества функциональных состояний.

Из этого можно сделать следующий вывод: на основе определенных характеристик как технологического процесса, так и отражающих индивидуальные особенности рассматриваемого оператора, можно получить оценку диапазонов доступного времени T_{system} и T_{person} . Результат расчета диапазонов этих слагаемых может служить данными для оценки вероятности того, что оператор успеет вовремя произвести действия, необходимые для приведения производственного процесса в норму (состояние нормального функционирования).

Имитационное моделирование

В качестве примера проведем имитационное моделирование для процесса полимеризации бутадиена. Полимеризация бутадиена выполняется при помощи пяти котлов-полимеризаторов. В нормах одного из технологических процессов полимеризации бутадиена указано, что температура полимеризата на выходе из работающих полимеризаторов не должна превышать 38°C для первого, второго полимеризата и не должна превышать 55°C для третьего, четвертого и пятого. Управление процессом полимеризации может выполняться множеством способов – увеличение потока охладителя, сбрасывание давления и т. д.

Таблица 1.

Выбранные диапазоны значений параметров

Table 1.

The selected ranges of parameter values

Параметр Parametr	Min	Max	Единицы измерения Unit
F_{nom}	45	50	°C
F_{crit}	55	55	°C
F	45	55	°C
F'	1	5	°C/c
T_{system}	1	3	с
L_{min}	0,1	0,5	с
L_{max}	1	3	с

Таблица 2.

Граничные значения диапазонов параметров для пяти рассматриваемых случаев

Table 2.

The boundary values of the ranges of parameters for the five considered cases

№	Левая граница Left boundary	Правая граница Right boundary
1	min	min
2	min	(min + max)/2
3	min	max
4	(min + max) / 2	max
5	max	max

Для каждого параметра, кроме критического значения температуры (F_{crit}) (оно задано в нормах технологического процесса), выбираем свои минимальное и максимальное значения, которые помещаем в таблицу 1. Каждый эксперимент будет состоять из 10 миллионов повторных расчетов. В каждом расчете значения переменных выбираются случайно (распределение – равномерное) в соответствии со значениями из таблиц 1 и 2. Результатом является вероятность положительного исхода. Без потери общности сумму T_{sensor} и T_{HMI} заменим T_{system} (4). Выполнение условия (6) зависит от значений семи переменных.

Имитационное моделирование позволит нам ответить на следующий вопрос: оптимизация технологического процесса с целью изменения диапазона какого параметра наибольшим образом повысит вероятность положительного исхода (положительный исход – приведение

технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования) и, следовательно, повысит надежность системы безопасности технологического процесса. Под изменением диапазона значений параметра рассматривается изменение значения одной границы при неизменной другой, так как в некоторых случаях на практике одновременное изменение двух границ является более сложной проблемой и предполагает рассмотрение большего числа комбинаций. Кроме того, значения перебираемых диапазонов не должны выходить за соответствующие границы, определенные в таблице 1. Для каждого параметра будем рассматривать 5 случаев, описание значений левых и правых границ которых показано в таблице 2 (min и max – минимальное и максимальное значения из таблицы 1). Рассчитаем вероятность положительного исхода по формуле (6) для всех случаев по каждому из параметров, кроме F_{crit} (он строго задан технологическим процессом).

Таблица 3.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне F_{nom} (см. таблицы 1 и 2)

Table 3.

The probability of a positive result for a variable range of F_{nom} (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...45	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	33,13
2	45...47,5	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	27,10
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,68
4	47,5...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	14,08
5	50...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	7,32

В таблице 3 представлена вероятность положительного исхода (приведение технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования путем действий оператора) при варьировании диапазона значений параметра F_{nom} . Параметр F_{nom} (номинальное значение наблюдаемого параметра) показывает границу между состоянием нормального функционирования и предаварийным

состоянием. Если диапазон значений F_{nom} равен 45...50, то вероятность положительного исхода равна 21,68%. При половинных значениях от исходного диапазона – 45,0...47,5 и 47,5...50,0, получаем 27,10 и 14,08 %. И если F_{nom} принимает только одно значение 45 или 50, то вероятность положительного исхода 33,13 или 7,32%.

Таблица 4.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне F (см. таблицы 1 и 2)

Table 4.

The probability of a positive result for a variable range of F (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...45	55	45...45	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	78,51
2	45...50	55	45...50	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	48,07
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,67
4	45...50	55	50...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	8,48
5	45...50	55	55...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	0

Таблица 4 показывает расчетные значения вероятности положительного исхода при варьированном в соответствии с таблицей 2 диапазоне параметра F . Диапазон значений параметра F показывает наиболее вероятные значения наблюдаемого параметра, полученные от измерительного прибора, которые говорят о том, что технологический процесс перешел из состояния нормального функционирования в аварийное состояние. Величины границ диапазона значений данного параметра могут коррелировать как с параметрами изменения значения наблюдаемого параметра, так и с параметрами измерительного прибора.

Если F находится в диапазоне 45...55, то вероятность положительного исхода примерно равна 21,67%. При половинном значении от величины исходного диапазона 45...50 и 50...55, величина вероятности положительного исхода равна соответственно 48,07 и 8,48%. И если F принимает только одно значение 45 или 55, то вероятность положительных исходов 78,51 и 0% соответственно. Значение 0 достигается при F равном F_{crit} , что не расходится со здравым смыслом (левая часть уравнения (6) равна 0, а правая больше нуля, так как $T_{person} \geq L_{min}$ (4).

Таблица 5.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне F' (см. таблицы 1 и 2)

Table 5.

The probability of a positive result for a variable range of F' (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...50	55	45...55	1...1	1...3	0,1...0,5	1...3	67,19
2	45...50	55	45...55	1...3	1...3	0,1...0,5	1...3	37,17
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,67
4	45...50	55	45...55	3...5	1...3	0,1...0,5	1...3	6,18
5	45...50	55	45...55	5...5	1...3	0,1...0,5	1...3	1,66

В таблице 5 показано изменение вероятности положительного исхода при варьировании диапазона значений параметра F' . Параметр F' показывает скорость изменения наблюдаемого параметра. Вероятность положительного исхода для всех случаев, описанных

в таблице 2, показана в соответствующем столбце. Увеличение порядкового номера эксперимента показывает уменьшение значения вероятности положительного исхода (приведения технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования).

Таблица 6.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне T_{system} (см. таблицы 1 и 2)

Table 6.

The probability of a positive result for a variable range of T_{system} (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...50	55	45...55	1...5	1...1	0,1...0,5	1...3	46,16
2	45...50	55	45...55	1...5	1...2	0,1...0,5	1...3	30,53
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,66
4	45...50	55	45...55	1...5	2...3	0,1...0,5	1...3	12,80
5	45...50	55	45...55	1...5	3...3	0,1...0,5	1...3	8,23

Таблица 6 показывает величины вероятности наступления положительного исхода при различных диапазонах значений параметра T_{system} . Согласно формуле (5) параметр T_{system} представляет собой сумму T_{sensor} и T_{HMI} . Величины параметров T_{system} и F зависят от свойств

измерительного прибора технологического процесса. В отличие от F T_{system} характеризуется параметрами исполнительного механизма. Аналогично предыдущим таблицам 3–5 вероятность положительного исхода уменьшается при увеличении номера случая.

Таблица 7.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне L_{min} (см. таблицы 1 и 2)

Table 7.

The probability of a positive result for a variable range of L_{min} (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,1	1...3	25,41
2	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,3	1...3	23,43
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,69
4	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,3...0,5	1...3	19,92
5	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,5...0,5	1...3	18,34

В таблице 7 приведены значения вероятности положительного исхода при варьировании диапазона значений параметра L_{min} . Параметр L_{min} показывает минимальное значение времени отклика человека при конкретном функциональном состоянии. Значение данного параметра является физиологической характеристикой оператора, которая выражается

в задержке, возникающей при интерпретации сигналов с органов чувств в центральной нервной системе человека. Поэтому изменения значения данного параметра проще достигнуть путем перебора различных людей на должность оператора. Как и ранее увеличение номера случая соответствует уменьшению вероятности положительного исхода.

Таблица 8.

Вероятность положительного исхода при переменном диапазоне L_{max} (см. таблицы 1 и 2)

Table 8.

The probability of a positive result for a variable range of L_{max} (see tables 1 and 2)

№	F_{nom}	F_{crit}	F	F'	T_{system}	L_{min}	L_{max}	Вер-ть пол. исх. в % Probability of a positive result
1	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...1	23,02
2	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...2	22,34
3	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	1...3	21,68
4	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	2...3	21,00
5	45...50	55	45...55	1...5	1...3	0,1...0,5	3...3	20,30

Таблица 8 содержит соответствие между значениями вероятности положительного исхода и диапазоном значений параметра $L_{\max}$ для всех случаев, описанных в таблице 2. Параметр $L_{\max}$ показывает максимальное значение времени отклика человека в конкретном функциональном состоянии. Как и параметр $L_{\min}$, параметр $L_{\max}$ является отражением физиологических свойств человека. Следовательно, под варьированием параметра $L_{\max}$ понимается перебор различных операторов. Как и во всех рассмотренных ситуациях, показанных в таблицах 3–7, увеличение номера случая показывает уменьшение вероятности наступления положительного исхода.

В таблицах 3–8 показаны значения вероятности положительного исхода при переменном значении диапазона соответствующих параметров. По данным таблиц видно, что наибольшее увеличение соотношения положительных исходов в рассматриваемых условиях (диапазоны значений параметров, которые содержатся в таблице 1) позволяет получить изменение диапазона значений параметра F . Оптимизация технологического процесса с целью изменения диапазона значений переменных F' и T_{system} принесет немного худшие результаты, а оптимизация параметров $L_{\min}$ и $L_{\max}$ принесет наименьшее увеличение вероятности наступления положительного исхода в условиях, описанных в таблице 1.

Кроме того, по результатам, показанным в таблицах 3–8, можно заключить, изменение диапазонов значений каких параметров наихудшим образом скажется на вероятности выполнения условия, заданного формулой (6). При F равном критическому значению, вероятность положительного исхода 0. Параметры F' и $F_{\text{ном}}$ при значениях, равных 5 °C/с и 50 °C, позволяют получить значения вероятности положительного исхода, равные 1,66 и 7,32% соответственно. В меньшей степени изменяют значение вероятности положительного исхода параметры $L_{\max}$ – с 21,68 до 20,30% и $L_{\min}$ – с 21,69 до 18,34%.

Таким образом, при рассмотрении условия успешного приведения технологического процесса, заданного формулой (6), в рамках выбранного диапазона значений параметров, описанных в таблице 1, наибольшее увеличение или наибольшее уменьшение вероятности положительного исхода происходит при изменении диапазона значений параметра F . Средний по величине результат позволяют

получить изменения диапазонов значений параметров F' и T_{system} . Наименьший по величине результат как по увеличению, так и по уменьшению величины вероятности положительного исхода достигается путем изменения диапазона значений $L_{\min}$ или $L_{\max}$. Это говорит о том, что в данном случае (таблица 1) большее увеличение надежности системы безопасности может быть достигнуто за счет уменьшения возможного диапазона F , чем за счет уменьшения времени отклика оператора, что является более сложной задачей. Диапазон значений параметра F показывает наиболее вероятные значения наблюдаемого параметра, которые будут говорить о том, что технологический процесс перешел из состояния нормального функционирования в аварийное состояние. Поэтому возможный диапазон значений параметра F определяется параметрами технологического процесса и параметрами измерительного прибора. Одним из способов изменения диапазона значений F – выбор более совершенного измерительного прибора, что и подтверждает имитационное моделирование (таблицы 1–8) (увеличение вероятности положительных исходов с 21,67 до 78,51).

Заключение

Разработана математическая модель, которая позволяет повысить безопасность технологических процессов за счет учета действий оператора. Определен набор состояний технологического процесса, работающий под управлением АСУ – нормальное функционирование, предаварийное, аварийное и состояние аварии. Приведен один из вариантов диаграммы потока данных для технологического процесса, включающего в себя АСУ и человека-оператора. Определена последовательность этапов, которые происходят при переводе технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования. Эта последовательность состоит из трех этапов: получение данных с измерительного прибора, интерпретация состояния технологического процесса и принятие решения оператором и работа исполнительного механизма. Составлено условие, позволяющее получить оценку возможности приведения системы в состояние нормального функционирования.

Разработана модель оценки латентного времени оператора (время на интерпретацию данных, полученных с органов чувств, на принятие решения) на основе значений наблюдаемой величины и скорости изменения этой величины. Выполнено исследование крайних случаев для формулы (6), которая дает оценку успеха

приведения технологического процесса в состояние нормального функционирования. Проведено имитационное моделирование с целью выяснения вопроса о том, что оптимизация технологического процесса, направленная на изменение диапазона какого параметра, наибольшим образом повысит вероятность положительного исхода (положительный исход – приведение технологического процесса из предаварийного состояния в состояние нормального функционирования). Условия проведения имитационного моделирования заданы набором диапазонов значений параметров, которые определяются свойствами протекания технологического процесса,

ЛИТЕРАТУРА

1 Котин А.В. Пути обеспечения безопасности технологических процессов // Наука. Технологии. Инновации: сборник статей международной научно-практической конференции. 2018. С. 64–67.

2 Баширов М.Г., Павлова З.Х., Закирпичная М.М., Хафизов А.М. Совершенствование систем автоматического управления и противоаварийной защиты трубчатых печей на основе мониторинга параметров процесса коксообразования // Нефтегазовое дело. 2018. № 1. С. 120–144.

3 Попов В.В., Савич А.В., Ефрекин С.И. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом синтеза аммиака // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития: материалы международной научно-практической конференции. Часть 1. 2018. С. 63–64.

4 Белов Г.П., Абдрахманов Н.Х., Шутов Н.В., Халимов М.Ф. Анализ и актуальные проблемы экспертизы безопасности опасных производственных объектов // Norwegian journal of development of the international science. 2018. № 18. С. 36–40.

5 Белова Т.И., Кулажский Е.В. Анализ потенциально опасных технологических процессов и источников повышенной опасности при использовании аммиака на предприятиях пищевой отрасли // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 2 (18). С. 32–36.

6 Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Лященко В.И. Повышение безопасности горно-подготовительных работ на рудных шахтах // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 5. С. 53–59.

7 Абдрахманов Н.Х., Шутов Н.В., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В. и др. Исследование и анализ нестационарности возникновения и развития потенциально опасных ситуаций при эксплуатации опасных производственных объектов // Нефтегазовое дело. 2015. № 1. С. 292–306.

8 Абдрахманов Н.Х., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В., Абдрахманов Р.Н. и др. Моделирование сценариев развития аварийных ситуаций для нестационарных опасных производственных объектов нефтегазового комплекса // Нефтегазовое дело. 2015. № 5. С. 516–531.

9 Сафин Г.Г., Абдрахманов А.А., Великанов В.С., Усов И.Г. и др. Групповая экспертная оценка деятельности операторов одним из методов теории принятия решений // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 1–8.

функциональным состоянием оператора, свойствами измерительного прибора и исполнительного механизма. В результате удалось определить параметр, изменение диапазона значений которого позволит повысить вероятность положительного исхода в рассматриваемом случае (таблица 1), что свидетельствует о полезности метода при исследовании эффективности процесса стабилизации технологического процесса оператором.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант 16-29-08342-офи_м)

10 Чекотин Р.С., Вербицкая Н.О. Оценка действий оператора в полуавтоматических и многозадачных системах в лесозаготовках на основе использования IoT-технологий // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 188–196.

11 Овсянников В.Е., Васильев В.И. Разработка средств для исследования деятельности операторов технологического оборудования // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1. С. 1–7.

REFERENCES

1 Kotin A.V. Ways to ensure the safety of technological processes. Nauka. Tehnologii. Innovacii [The science. Technology. Innovations: a collection of articles of the international scientific-practical conference]. 2018. pp. 64–67. (in Russian).

2 Bashirov M.G., Pavlova Z. Kh., Zakirpichnaya M.M., Khazirov A.M. Improvement of automatic control systems and emergency protection of tube furnaces based on monitoring the parameters of the coke formation process. *Neftgazovoe delo* [Oil and gas business]. 2018. no. 1. pp. 120–144. (in Russian).

3 Popov V.V., Savich A.V., Efremkin S.I. Development of an automated process control system for ammonia synthesis. Nauka segdnya: globalnye vizovy i mekhanizmy razvitiya [Science today: global challenges and development mechanisms: proceedings of the international scientific and practical conference. Part 1]. 2018. pp. 63–64. (in Russian).

4 Belov G.P., Abdrahmanov N.H., Shutov N.V., Khalimov M.F. Analysis and actual problems of safety examination of hazardous production facilities. Norwegian journal of development of the international science. 2018. no. 18. pp. 36–40. (in Russian).

5 Belova T.I., Kaluzhskiy E.V. Analys potentsialno opasnih technologicheskikh processov I istochnikov povishennoy opasnosti na predpiyatyah pishevoy otrasli. *Alleya nauki* [Alley of science]. 2018. vol. 1. no. 2 (18). pp. 32–36. (in Russian).

6 Khomchenko O.E., Kononenko M.N., Lyashenko V.I. Improving the safety of mining preparatory work in the ore mines. *Bezopasnost truda v promishlennosti* [Industrial Safety]. 2018. no. 5. pp. 53–59. (in Russian).

7 Abdrahmanov N.H., Shutov N.V., Abdrahmanov K.N., Vorobko V.V. et al. Research and analysis of the non-stationarity of the occurrence and development of potentially dangerous situations during the operation of hazardous production facilities. *Neftgazovoe delo* [Oil and gas business]. 2015. no. 1. pp. 292–306. (in Russian).

8 Abdrahmanov N.H., Abdrahmanova K.N., Vorobobko V.V., Abdrahmanov P.H. et al. Simulation of scenarios for the development of emergency situations for non-stationary hazardous production facilities of the oil and gas complex. *Negtegazovoe delo* [Oil and gas business]. 2015. no. 5. pp. 516–531. (in Russian).

9 Safin G.G., Abdrahmanov A.A., Velikanov V.S., Usov I.G. et al. Gruppovaya ekspertnaya ocenka deyatelnosti operatorov odnim iz metodov teorii prinyatiya resheniy. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015. no. 1. pp. 1–8. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр С. Суровцев аспирант, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alexander.surovtsev.vrn@gmail.com

Игорь А. Авцинов д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, igor.awtzinov@yandex.ru

Ярослав А. Туrowsкий к.м.н., доцент, кафедра цифровых технологий, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Россия, с.н.с. Института проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Профсоюзная ул., 65, г. Москва, 117342, Россия, yaroslav_turovsk@mail.ru

Сергей В. Борзунов к.ф.-м.н., доцент, кафедра цифровых технологий, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Россия, sborzunov@gmail.com

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Александр С. Суровцев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Игорь А. Авцинов консультация в ходе исследования

Ярослав А. Туrowsкий предложил методику проведения эксперимента

Сергей В. Борзунов консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 17.09.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 22.10.2018

10 Chekotin P.C., Vernitskaya N.O. Evaluation of operator actions in semi-automatic and multitasking systems in logging based on the use of IoT-technologies. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems Methods Technology]. 2016. no. 4 (32). pp. 188–196. (in Russian).

11 Ovsyannikov V.E., Vasilev V.I., Development of tools for research activities of process equipment operators. *Inzhenerniy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2015. no. 1. pp. 1–7. (in Russian).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander S. Surovtsev graduate student, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alexander.surovtsev.vrn@gmail.com

Igor A. Awtzinov Dr. Sci. (Engin.), professor, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, igor.awtzinov@yandex.ru

Yaroslav A. Turovsky Cand. Sci. (Medic.), associate professor, digital technologies department, Voronezh state university, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia, Senior Researcher, Institute of Management Problems V.A. Trapeznikova of the Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 65, Moscow, 117342, Russia, yaroslav_turovsk@mail.ru

Sergei V. Borzunov Cand. Sci. (Phys.-math.), associate professor, digital technologies department, Voronezh state university, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia, sborzunov@gmail.com

CONTRIBUTION

Alexander S. Surovtsev wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Igor A. Awtzinov consultation during the study

Yaroslav A. Turovsky proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Sergei V. Borzunov consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 9.17.2018

ACCEPTED 10.22.2018