

РЕГУЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В.С. СМОРОДИН

Описаны возможности организации контроля за реализацией технологического процесса производства в реальном времени с помощью системы принятия решений. Рассматривается технология управления надежностью оборудования производственной системы и контроля выхода индикаторов системы за допустимые пределы изменения.

ВВЕДЕНИЕ

На реализацию технологического процесса производства (ТПП) и возможности регулирования его функционирования влияют особенности самого процесса: иерархический характер организации управления; скорость протекания и требуемая реактивность системы управления; вероятностный характер выполнения микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$, где $i, j = \overline{1, M}$), реализующих ТПП; оборудование, которое может отказывать в функционировании с известной вероятностью; резервное оборудование и высокая цена отказа. Вследствие этого известные аналитические математические модели (АММ) трудно использовать. Натурные эксперименты с ТПП дороги и сложны в реализации. Поэтому в ряде случаев для целей анализа ТПП удастся использовать их имитационные модели (ИМ).

По скорости протекания во времени и требуемой реактивности систему принятия решений (SPRESH) ТПП можно отнести к одному из трех типов: первый — быстропротекающие процессы, второй — ТПП реального времени, третий — медленно протекающие. Динамика управления функционированием для каждого из них различна.

Поскольку процессы первого типа имеют высокую скорость реализации во времени, то для контроля и управления ими используются аппаратно организованные системы, функционирующие на принципах стабилизации, контроля и автоматического управления с помощью реализации алгоритмов управления на уровне микросхем. Известны методы и средства такого регулирования и контроля за функционированием ТПП с помощью специальных средств автоматического управления при высокой скорости их реализации [1,2]. Очевидно, что при использовании имитационной модели управляющие решения по скорости реакции на возникающие ситуации не могут «успевать» за ходом самих ТПП.

ТПП второго типа представляют собой процессы реального времени со средней скоростью их протекания. Здесь с помощью современных ЭВМ, для

которых реализованы системы принятия решений SPRESH, возможно оперативное реагирование на ситуации, предусмотренные технологом, особенно, если это ТПП опасного производства. В ряде случаев удается с некоторым упреждением $\tau_{ур}$ следить за ходом ТПП и с помощью SPRESH «успевать» выработать стабилизирующее воздействие на ТПП в допустимых пределах.

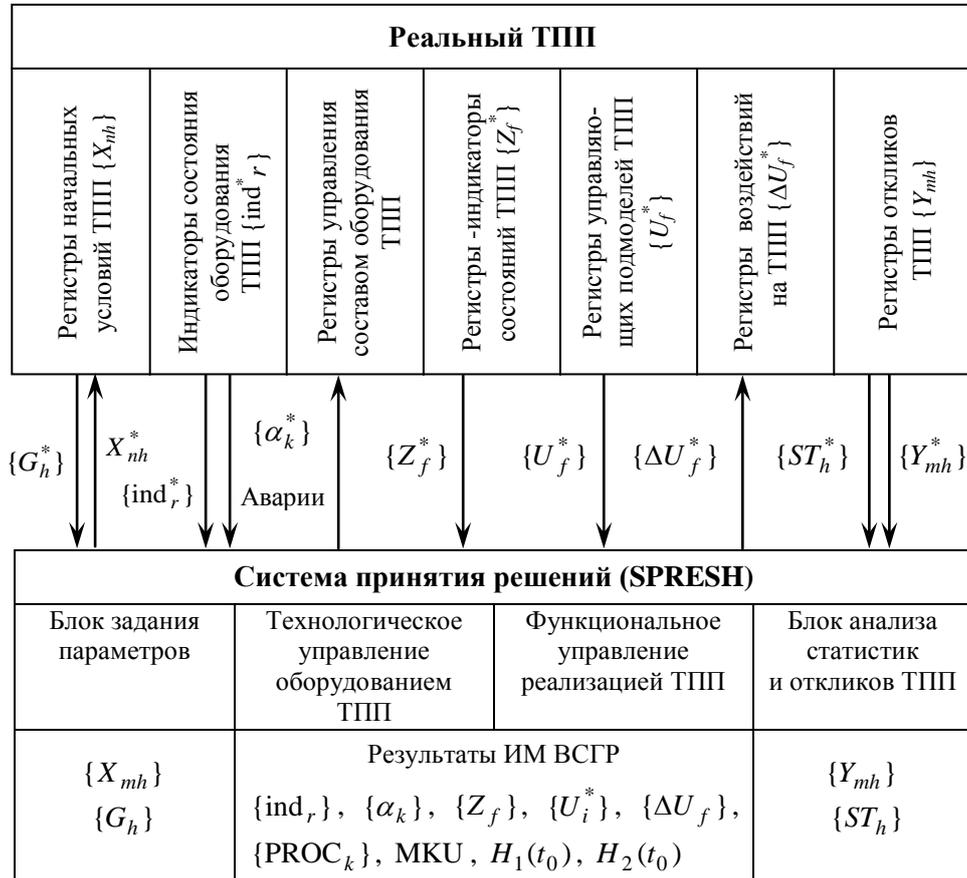
ТПП третьего типа имеют малую скорость, поэтому за время $\tau_{ан}$ анализа ситуации системой SPRESH можно экстраполировать возможную реакцию системы и имитационной модели и воздействовать в необходимые моменты времени непосредственно на ТПП. Кроме того, для обеспечения надежности функционирования производства в ряде случаев удается имитировать ситуации и выработать корректирующие воздействия на ТПП. В [3] авторами предложена технология построения и использования ИМ ТПП, создаваемой с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного способа имитации [4]. В данной работе рассматривается технология управления выполнением ТПП второго типа с помощью SPRESH.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

На рисунке приведена концептуальная модель контроля ТПП с помощью SPRESH. От реального ТПП на систему SPRESH, реализованную с помощью САИМ [4], поступают следующие индикаторы состояния: величины наработки r -го номера оборудования (ind_r); значения компонент вектора контролируемых параметров $\{z_f^*\}$; вектора параметров управления $\{u_f^*\}$; вектора откликов $\{Y_{mh}^*\}$, а также значения параметров h -го варианта ТПП $\{X_{nh}^*\}$. Предполагается, что эти индикаторы формируются специальными схемами контроля и стабилизации ТПП и передаются немедленно на SPRESH. Система SPRESH посылает на приемные регистры ТПП значения компонент вектора U , корректирующие переменные ΔU , которые в реальном ТПП приводят к возврату значений индикаторов $\{z_f^*\}$ внутрь допустимых диапазонов $\{z_{f\min}, z_{f\max}\}$. Кроме того, по значениям $\{ind_r\}$ SPRESH посылает на соответствующие регистры управления оборудованием множество воздействий $\{\alpha_k\}$, обеспечивающих его резервирование или профилактику. Для принятия решения SPRESH должна использовать результаты имитационного моделирования ТПП, которые можно получить с помощью серий имитационных экспериментов (ИЭ) на основе анализа состояния ИМ ТПП и процедуры Монте-Карло.

По результатам ИЭ на ИМ ТПП определяются допустимый интервал запаздывания управляющих воздействий $\tau_{ур}$ со стороны SPRESH на ТПП и массивы откликов ИМ ТПП при известных множествах воздействий $\{X_h\}$,

множествах характеристик оборудования и запросов ресурсов $MTXO_{ij}$. На ИМ ТПП определяются также допустимые диапазоны значений для индикаторов Δz_f , корректирующих значений ΔU параметров управления ТПП, границ «наработки» устройств ΔQ_{nr} .



Блок-схема управления технологическим процессом системой SPRESH

Таким образом, используя в качестве исходной информации полученные на ИМ ТПП значения τ_{up} , Δz_f , Δu_k и ΔQ_{nr} система SPRESH может оперативно контролировать реализацию ТПП в диапазонах изменения индикаторов z_f^* , и с помощью воздействий множества параметров управления Δu_k^* на ТПП добиваться нахождения компонент вектора откликов $\{Y_h^*\}$, а также индикаторов Δz_f в заданных диапазонах.

МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ SPRESH

С помощью SPRESH достигаются два вида регулирования реализации ТПП: технологическое — надежности функционирования оборудования и функ-

циональное — реализации в заданных диапазонах значений индикаторов состояний ТПП. Рассмотрим методику каждого из них.

Технологическое регулирование надежности функционирования оборудования ТПП осуществляется SPRESH на основе значений элементов множества $\{ind_r\}$ индикаторов состояния оборудования. В этих индикаторах, передаваемых от ТПП на SPRESH с постоянным интервалом τ_{iz} опроса регистров ТПП, находятся фактические значения Q_{fr} «наработки» r -го устройства на отказ его функционирования. В моменты поступления в SPRESH значений Q_{fr} происходит идентификация критической ситуации с оборудованием номера r . Определяется значение t -статистики по формуле

$$t_r = \frac{|Q_{fr} - Q_{pr}|}{S_r} \sqrt{\frac{\mu_r}{2}}, \quad (1)$$

где S_r и μ_r — соответственно среднеквадратическое значение и количество использований устройства с номером r ; Q_{fr} и Q_{pr} — фактическое и пороговое значения «наработки» оборудования.

Проверяется неравенство $t_r \leq t_{кр}$ ($t_{кр}$ — граничное значение t -статистики, определяемое с уровнем значимости α при числе степеней свободы μ_r по функции распределения Стьюдента). Если это неравенство не выполняется, то необходимо резервирование устройства оборудования номера r , и от SPRESH на ТПП поступит множество воздействий $\{\alpha_{1r} = 1\}$. Когда более 50% устройств оборудования требуют резервирования, необходим переход на профилактику всех устройств. При этом проверяется возможность останова ТПП ($\pi_{ост} = 1$), и если это происходит, то SPRESH посылает на регистры воздействие $\alpha_2 = 1$, означающее переход на общую профилактику. В противном случае SPRESH игнорирует предаварийное состояние оборудования.

При появлении аварии в ТПП на SPRESH поступает сигнал $\pi_{ав} = r$, означающий номер устройства, на котором произошла авария. По результатам предварительной имитации с помощью ИМ ТПП [4] SPRESH по номеру r определяет список процедур ликвидации аварии. В результате на ТПП от SPRESH поступает множество воздействий $\{\alpha_{3r} = 1\}$ после окончания каждой k -й процедуры ликвидации аварий ($APROC_k$, $k = \overline{1, n}$), которая реализуется SPRESH. Эти процедуры содержат набор ресурсов, специального оборудования и исполнителей, которые закреплены до ликвидации аварии за каждым агрегатом $APROC_k$. Как видим, в составе SPRESH имеется множество агрегатов, ликвидирующих каждую аварийную ситуацию с помощью последовательности процедур $\{APROC_k\}$. Все эти процедуры в SPRESH представляют библиотеку процедур ликвидации аварий LIB.AGPROC. Порядок вызова этих процедур строго регламентирован, и по окончании каждой процедуры от SPRESH посылается свое управляющее воздействие $\alpha_{3r} = 1$ на регистры оборудования.

Функциональное регулирование реализации ТПП осуществляется SPRESH после поступления значений компонент множества индикаторов $\{z_f^*\}$ состояний ТПП, вектора u_f^* параметров управления и значений множества $\{z_{nh}^*\}$ параметров h -го варианта ТПП. По информации, поступающей от соответствующих регистров контроля состояний ТПП с постоянным шагом τ_{iz} опроса регистров, проверяется наличие ситуации выхода компонент вектора Z за допустимые пределы (z_f^-, z_f^+) нижней и верхней границ индикатора z_f^* . Эти границы изменения Z технолог определяет с помощью ИМ ТПП до процесса контроля и указывает их SPRESH в таблице границ TGR, строками которой являются номера f индикаторов состояний ТПП. Если $z_f^* < z_f^-$, то формируется положительное приращение управляющей переменной $(+\Delta u_f)$. Когда $z_f^* > z_f^+$, то формируется отрицательное приращение управляющей переменной $(-\Delta u_f)$. После проверки всех индикаторов на выход за допустимые границы формируется вектор новых значений управляющих переменных $u_f^* = u_f^* + \Delta u_f$ (при $z_f^* < z_f^-$) или $u_f^* = u_f^* - \Delta u_f$ (при $z_f^* > z_f^+$). Новые значения вектора U возвращаются от SPRESH на управляющие регистры ТПП.

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМОЙ SPRESH

По окончании цикла управления в систему SPRESH с выходных регистров ТПП поступают значения $\{Y_{mh}^*\}$ откликов h -го варианта его организации. В ходе ИЭ на ИМ ТПП [4] технолог определяет значения $\{Y_{mh}\}$ откликов модели и параметров $\{X_{nh}\}$ изменения состава и структуры ресурсов ИМ ТПП. В момент измерения откликов Y_{mh}^* реального ТПП определяется разность $\Delta Y_{mh} = Y_{mh}^* - Y_{mh}$ откликов ТПП и модели. Если разность ΔY_{mh} для h -го варианта положительна, то диапазоны изменения вектора управляющих переменных ΔU заданы неверно и следует уменьшить значение корректирующего приращения Δu . Если же $\Delta Y_{mh} < 0$, то необходимо увеличить диапазоны изменения вектора управляющих переменных, т.е. значение ΔU .

Кроме того, величина рассогласования ΔY_{mh} откликов реального ТПП и ИМ ТПП позволяет проверить адекватность ИМ реальному ТПП. Если $\Delta Y_{mh} / Y_{\max} < \delta$, где Y_{\max} — максимальное значение отклика; δ — точность моделирования, то различие между ИМ ТПП и реально функционирующим процессом находится в пределах ошибки имитации. В этом случае можно

говорить об адекватном характере регулирования ТПП с помощью SPRESH.

Главной трудностью в управлении ТПП с использованием SPRESH является определение диапазонов изменения индексов (z_f^-, z_f^+) и выбор состава и величины корректирующих воздействий ($-\Delta u_f, +\Delta u_f$) на вектор управления. Исходя из знания динамики развития ТПП, а также из опыта его эксплуатации, эксперт может установить границы изменения индикаторов для различных интервалов развития ТПП. Однако без ИМ ТПП диапазоны их изменения в каждый момент времени t_0 динамики развития ТПП установить чрезвычайно сложно. Поэтому опираться на приблизительные значения диапазонов изменения индикаторов состояний при организации контроля и управления ТПП рискованно. Еще большей проблемой является определение необходимых корректирующих воздействий Δu_f на вектор переменных управления U , которые приведут к возврату значений индикаторов в допустимые границы их изменения. Без имитации ТПП найти значения Δu_f в каждый момент времени t_0 развития ТПП невозможно. Поэтому технология управления с помощью системы SPRESH основывается на предварительной имитации ТПП до начала самого процесса управления его функционированием.

Таким образом, главная цель использования ИМ ТПП — определение векторов корректировки управляющих воздействий ($\Delta u_f(t_0)$) и диапазонов изменения индикаторов ($\Delta z_f(t_0)$) как функций модельного времени реализации ТПП. Ниже предлагается применять для этой цели ИМ ТПП, предложенную в работе [4], а для ее построения — САИМ агрегатного способа имитации [3].

Для построения ИМ ТПП используется модификация метода сетевого планирования. Весь ТПП, имеющий графовую структуру, представляется в виде вероятностного сетевого графика (ВСГР), который отображает последовательность выполнения агрегатов-имитаторов микротехнологических операций ($АТОР_{ij}$). Связи между $АТОР_{ij}$ осуществляются с помощью агрегатов имитаторов событий $АСОВ_i$ и $АСОВ_j$ [4]. ВСГР заменяется последовательностью $\{SGR_l\}$ реализаций сетевого графика, для чего используется процедура Монте-Карло и создается ИМ ВСГР. В этой ИМ используется N реализаций ВСГР, в ходе которых каждая l -я реализация ($l = \overline{1, N}$) представляет собой имитационную модель детерминированного сетевого графика SGR_l с постоянными временами τ_{ijl} выполнения $MTXO_{ij}$ в l -й реализации ВСГР. Для этой цели τ_{ijl} разыгрывается по функциям распределения $F_{ij}(\tau)$. Далее расчет параметров SGR_l осуществляется по известным методам [5]. ИМ ВСГР komponуется из библиотеки агрегатов, имеющейся в САИМ [4], каждый из которых имитирует следующие компоненты ВСГР: выполнение $MTXO_{ij}$ ($АТОР_{ij}$), свершение событий в SGR_l ($АСОВ_i$), функционирование r_1 номера индивидуального оборудования ($АОВIN_{r_1}$),

функционирование r_2 номера оборудования общего пользования (АОВОР $_{r_2}$), выполнение k -й процедуры ликвидации аварии (АПРОС $_k$). Агрегаты АТОР $_{ij}$ имитируют две стороны выполнения МТХО $_{ij}$ в ИМ ТПП: технологию выполнения МТХО $_{ij}$ в ВСГР и само функционирование МТХО $_{ij}$ в ИМ ТПП.

При отображении технологии выполнения МТХО $_{ij}$ агрегаты АТОР $_{ij}$ представляют собой четырехполюсники, работающие в двух режимах имитации во времени моделирования t_0 . Вначале в режиме прямой имитации АТОР $_{ij}$ отображается расход ресурсов ТПП. Основные запросы ресурсов агрегатов АТОР $_{ij}$ являются случайными величинами, которые задаются технологом до начала имитации в виде функций соответствующего распределения: $F_{1ij}(\tau)$, $F_{2ij}(c)$, $F_{3rij}(V)$, $F_{4rij}(mt)$, $F_{5rij}(ko)$, где τ — время выполнения; c — стоимость выполнения операции; V — объем ресурсов общего пользования; mt — количество материалов; ko — количество комплектующих деталей.

Кроме того, АТОР $_{ij}$ выдает системе распределения ресурсов (SRR) запросы на оборудование индивидуального и общего пользования, а также на исполнителей в виде списков (SP.INOB $_{ij}$, SP.OBOP $_{ij}$, SP.ISP $_{ij}$). В l -й реализации ВСГР эти запросы ресурсов разыгрываются по функциям распределения и представляют собой постоянные величины: τ_{ijl} , c_{ijl} , V_{rijl} , mt_{rijl} , ko_{rijl} , SP.INOB $_{ij}$, SP.OBOP $_{ij}$, SP.ISP $_{ij}$. Если каких-либо ресурсов нет, то АТОР $_{ij}$ ожидает их освобождения и последующего выделения в его распоряжение. Когда на представленном оборудовании возникают опасные отказы, то интервал времени их использования агрегатом АТОР $_{ij}$ увеличивается до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы. Длительность τ_{bor} безотказной работы оборудования технолог задает функцией распределения $\Phi_{1r}(\tau_{bor})$, интервал τ_{vo} восстановления работоспособности — функцией $\Phi_{2r}(\tau_{vo})$. С помощью жребия по вероятности P_{av} моделируется ситуация «произошла авария» и для ее ликвидации используется «штатная» последовательность агрегатов имитаторов процедур ликвидации аварийной ситуации {АПРОС $_k$ }. Каждый из этих агрегатов имеет свое оборудование, состав исполнителей и действует по утвержденному алгоритму длительностью τ_{prkl} , опереждаемой по функции распределения $\Phi_k(\tau_{pr})$. По окончании выполнения {АПРОС $_k$ } формируется признак «была авария» ($\pi_{ak} = 1$).

Агрегаты ASOB $_j$ являются многополюсниками с различным числом входов и выходов. ASOB $_j$ имеет четыре типа выходов, которые могут быть кустовыми с несколькими разветвлениями: действительными, посылающими

ми на $АТОР_{js}$ действительные сигналы Sgd , инициирующие выполнение $АТОР_{js}$ (тип 1); вероятностными, посылающими один сигнал Sgd , имеющий максимальное значение компоненты вектора вероятностей (P_{jk}), и инициирующими выполнение $АТОР_{jh}$ (тип 2). На остальных же разветвлениях посылаются фиктивные сигналы Sgd , обходящие выполнение $АТОР_{jh}$ и поступающие непосредственно на вход агрегата $ASOB_h$. С помощью выходов типа 3 реализуется «технологическое» резервирование операций. Включается анализ его выхода только тогда, когда при выполнении $АТОР_{ij}$ имела место авария ($\pi_{ав} = 1$). В этом случае активизация резервного выхода типа 3 осуществляется на основе анализа булевой матрицы $\|\gamma_m\|$ формирования Sgd на его разветвлениях, которая формируется технологом до начала имитации ТПП.

Для реализации функционального регулирования ТПП в ИМ ВСГР используется вторая часть $АТОР_{ij}$, которая по своей сути является алгоритмом функционального моделирования (АФМ) агрегата $АТОР_{ij}$. АФМ взаимодействует с множеством глобальных переменных функциональной связи $МТХО_{ij}$ ($B = (b_1, b_2, \dots, b_k)$) и управления выполнением $МТХО_{ij}$ индикаторов состояний ($Z = (z_1, z_2, \dots, z_f)$). АФМ агрегата $АТОР_{ij}$ использует также матрицу граничных значений контролируемых параметров ($МКЗ = \|\|z_{ij}^-, z_{ij}^+\|\|$) и матрицу модификаций управляемых переменных ($МКУ = \|\|\Delta u_{ij}^-, \Delta u_{ij}^+\|\|$). Корректировка компонент вектора U с помощью АФМ агрегата $АТОР_{ij}$ осуществляется при его активизации сигналом Sgd , поступающим с выхода $ASOB_i$ типа 4, когда в теле Sgd сформирован признак корректировки управляющих переменных, являющийся указателем необходимости такой корректировки. После этого в агрегате $АТОР_{ij}$ АФМ проверяет ситуацию выхода индикаторов z_f за допустимые границы, используя матрицу $МКЗ$.

Таким образом, с помощью ИМ ВСГР технолог определяет границы изменения вектора U , оценивая при этом фактическую зависимость между глобальными переменными U и Z , а также определяет функции изменения компонент множеств $\{\Delta u_f\}$ и $\{\Delta z_f\}$ в модельном времени t_0 в виде следующей зависимости:

$$\Delta u_f = H_1(t_0), \quad \Delta z_f = H_2(t_0). \quad (2)$$

Как видим, только после имитации быстропротекающего ТПП на ИМ ВСГР, которая адекватна реальному ТПП, технолог уточняет значения функций (2). Далее он использует их уже в ходе контроля за ТПП реального времени с помощью SPRESH.

Более подробно состав и структура ИМ ВСГР, а также технология их использования приведены в работах [3,4]. Отметим, что в ходе ИЭ, проводимых на основе процедуры Монте-Карло, технолог получает большое количество вспомогательной информации в виде статистик имитации и откликов моделирования. Наиболее существенными статистиками и откликами имитации ТПП являются те, которые позволяют подобрать вид функций (2), чтобы затем использовать их при управлении реальным ТПП с помощью SPRESH.

Важной статистикой реализаций ВСГР является граф критических путей ($GRKRP_h$), являющийся результатом наложения друг на друга критических путей l -й реализации ВСГР (KRP_l , $l = \overline{1, N}$) после N его реализаций. В этом графе на выходах каждого агрегата $ASOB_i$ подсчитано количество ν_{ij} запусков $АТОР_{ij}$ во всех N реализациях ВСГР. В итоге формируются вероятности p_{iks} запусков $АТОР_{ij}$ с k -го выхода $ASOB_i$, где s — номера компонент этого вектора на k -м выходе $ASOB_i$. Кроме того, существенными статистиками технологии реализации ИМ ВСГР в модельном времени t_0 являются графики расхода GR_{1r} ресурсов ТПП и материалов GR_{2r} номера r , комплекующих GR_{3r} номера r , суммарного расхода GR_{4r} финансовых средств. Фиксируются также и временные диаграммы загрузки: оборудования r -го номера ($DIAG_{1r}$), исполнителей ($DIAG_2$), бригад исполнителей номера r ($DIAG_{3r}$). Эти диаграммы являются результатом усреднения аналогичных графиков и диаграмм, полученных в ходе l -й реализации ВСГР.

Статистиками контроля функционирования ТПП в ИМ ВСГР являются количества увеличений и уменьшений значений переменных управления (n_{bf} , n_{mf}) и выходов индикаторов за верхнюю и нижнюю границы (m_{vf} , m_{mf}). На ИМ ВСГР технолог определяет интегральные значения компонент вектора откликов $\{Y_{mh}\}$ и компонент вектора параметров моделирования $\{X_{nh}\}$. При этом параметрами технологии моделирования ИМ ВСГР являются следующие: множество $\{X_{hs}\}$ начальных значений ресурсов ТПП h -го варианта ВСГР, количества соответственно устройств индивидуального и общего пользования (m_1 и m_2), резервных устройств (m_1^1 и m_2^1), ресурсов индивидуального и общего пользования (m_3 и m_4), исполнителей и бригад исполнителей (m_5 и m_6). Каждый h -й вариант организации ТПП на ИМ ВСГР оценивается с помощью перечисленных статистик и откликов имитации для выбора стратегий изменения каждого уровня компонентов параметров модели ТПП.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены способы управления ТПП с помощью SPRESH на основе анализа результатов имитационного моделирования ТПП на ИМ ВСГР. Установлено, что при технологическом управлении ТПП SPRESH реализует следующие функции: одиночного резервирования оборудования, перехода на профилактику оборудования ТПП, ликвидации аварий на оборудовании с помощью последовательности $\{APROC_k\}$ процедур ликвидации последствий аварии. Используя результаты ИЭ, с помощью ИМ ВСГР SPRESH организует функциональную корректировку состояний ТПП посредством вектора U управляющих воздействий и контроля за выходом вектора индикаторов Z за допустимые границы. При этом величины управляющих воздействий с привязкой их к моментам времени используются на основании зависимостей (2), полученных при имитации ТПП. Показано, что для организации оперативного технологического и функционального регулирования функционированием ТПП можно использовать SPRESH. В этом, с нашей точки зрения, состоит новизна и практическая значимость использования SPRESH и результатов имитации ВСГР при управлении ТПП в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Габасов Р., Кириллова Ф.М., Костюкова О.И. Оптимизация линейной системы управления в режиме реального времени // Изв. РАН. Техн. кибернетика. — 1992. — № 4. — С. 3 – 19.
2. Габасов Р., Кириллова Ф.М., Костюкова О.И. К методам стабилизации динамических систем // Изв. РАН. Техн. Кибернетика. — 1994. — № 3. — С. 67–77.
3. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов // Информатика. — 2005. — № 1. — С. 25 – 31.
4. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. Способ моделирования агрегатами технологических процессов опасного производства // Электронное моделирование. — 2005. — 27, № 6. — С. 101 – 109.
5. Жогаль С.П., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 110 с.

Поступила 27.06.2006