ISSN 2079-8199

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК
Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна

Серия 1

Естественные и технические науки

№ 3/2021

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 676:62–5

DOI 10.46418/2079-8199_2021_3_15

Е. П. Дятлова, И. В. Ремизова, И. В. Бондаренкова

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
191186, РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрена постановка задачи оперативного управления производством с последовательной структурой материальных потоков. Исследованы алгоритмы оперативного управления технологическими комплексами, характерными для предприятий ЦБП. С учетом оценки законов распределения времени безотказной работы и длительности простоев агрегатов произведен выбор оптимальных запасов в промежуточных емкостях на примере производства сульфатной беленой целлюлозы.

Ключевые слова: оперативное управление, внеплановые простои оборудования, запасы, критерий оптимальности, технологическое оборудование, промежуточные емкости.

К настоящему времени имеется уже достаточный опыт проектирования и эксплуатации автоматизированных систем оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ) технологическими комплексами ЦБП. Проанализировав этот опыт, можно наметить пути дальнейшего совершенствования и развития АСОДУ. Одно из направлений совершенствования оперативного управления связано с повышением точности и достоверности измерительной информации и расчета технико-экономических показателей, без чего не может быть достигнута эффективность принятия управляющих решении. Другое направление связано с совершенствованием математических моделей задач оперативного управления и алгоритмов принятия решений, что достигается путем учета вероятностного характера производственного процесса, учета влияния управляющих воздействий на качественные показатели выпускаемой продукции. Математическая модель задач принятия решений становится гибкой, т. е. ее структура — вид критерия оптимальности, и системы ограничений меняются в зависимости от сложившейся производственной ситуации.

В работе рассмотрена задача оперативного управления производством с последовательной структурой материальных потоков на примере производства сульфатной беленой целлюлозы Котласского ЦБК (АО «Группа «Илим») и исследованы алгоритмы оперативного управления некоторыми технологическими комплексами, типовыми для предприятий ЦБП.

Критерий эффективности задачи составлен с учетом случайного характера внеплановых остановов технологического оборудования, а также с учетом их случайной длительности, что необходимо иметь в виду при выборе уровня запасов в буферных емкостях и расчете изменения производительности агрегатов в технологической цепи при аварийном останове одного из них. Показано, что достоверность и эффективность решения этой задачи зависит от точности и достоверности исходной информации.

Постановка задачи оперативного управления

Задача оперативного управления формулируется для технологического комплекса с последовательной структурой, примером которого является производство сульфатной беленой целлюлозы на Котласском ЦБК. Укрупненная схема технологического комплекса представлена на рис. 1. В схеме приняты следующие обозначения:

$\tilde{U}'_j, \tilde{U}_j$ — материальные потоки на входе и выходе j участка производства, например потоки целлюлозы, выраженные в тоннах абсолютно сухого волокна (т а. с. в.) за определенный период времени,

U'_j, U_j — те же материальные потоки, приведенные к выходу технологической линии; связь между U_j и $\tilde{U}_j$ выражается соотношением

$$U_j = \tilde{U}_j \prod_{i=j+1}^{N} K_i,$$

где K_i — коэффициент выхода на i участке производства; i, j — номер рассматриваемого участка производства, $i=\overline{1,N}$, $j=\overline{1,N}$; N — число участков в технологической линии; $\bar{V}_j$ — запасы перед j участком производства, выраженные в т а. с. в.; V_j — те же запасы, приведенные к выходу технологической линии:

$$V_j=\bar{V}_j\prod_{i=j}^{N}K_i\,.$$

Принято, что запасы сырья, поступающего на вход технологической линии, меняются случайным образом независимо от хода производственного процесса и являются возмущающим воздействием, в частности, отсутствие запасов сырья приводит к внеплановому останову производства. Возможности складирования готовой продукции считаются неограниченными.

Известно, что и материальный поток, и производительность участка производства (оборудования) определяется как количество продукции, отнесенное к некоторому периоду времени [1]. Поэтому при постановке и решении задачи оперативного управления вместо материального потока на входе и выходе некоторого участка удобнее рассматривать производительность агрегата, установленного на этом участке.

Анализ функционирования технологического комплекса показал, что производительность линии в установившемся режиме определяется так называемым «узким» местом, т. е. агрегатом с производительностью U_i.

Поэтому любой вынужденный останов этого агрегата приводит к невосполнимым потерям готовой продукции. Отсюда очевидно, что одной из целей оперативного управления должно быть сведение к минимуму потерь продукции из-за вынужденных простоев «узкого» места, которые нередко вызываются аварийными остановами других агрегатов технологической цепи и возникают при переполнении или опустошении промежуточных емкостей.

Как известно, внеплановые остановы оборудования носят случайный характер, который можно описать, оценив законы распределения времени безотказной работы и длительности простоя отдельного агрегата по данным статистики простоев.

Пусть $P(t_j)$ и $P(T_j)$ — плотности вероятностей времени отказа и длительности простоя j агрегата, где t_j — время отказа j агрегата, T_j — длительность простоя j агрегата. Требуется определить математическое ожидание длительности вынужденного простоя i агрегата, являющегося «узким» местом, по вине аварийного останова j агрегата. Предполагается, что при выходе из строя j агрегата все остальные агрегаты продолжают работать с неизменной производительностью, равной производительности «узкого» места — U_i. Тогда, если $j<i$, то i агрегат остановится при опустошении емкостей на $j \div i$, причем длительность его простоя составит

$$\tau_{ij}=T_j=\frac{V_{ji}}{U_i}, \qquad (1)$$

где τ_{ij} — длительность простоя участка $j \div i$; V_{ji} — запасы на участке $j \div i$ в момент выхода из строя j агрегата.

Если же $j>i$, то i агрегат остановится при переполнении емкостей на участке $j \div i$, причем длительность его простоя составит

$$\tau_{ij}=T_j=\frac{1}{U_i}\left(V_{ij}^{\max}-V_{ij}\right), \qquad (2)$$

где $V_{ij}^{\max}$ — максимальный запас полуфабрикатов на участке $j \div i$.

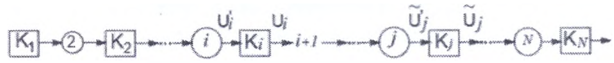

Рис. 1. Структура технологического комплекса

Поскольку T_j — величина случайная, а уровни запасов в промежуточных емкостях — неслучайные величины и должны определяться при решении задачи оперативного управления, то из соотношений (1) и (2) следует, что длительность простоя i агрегата τ_{ij} по вине j агрегата будет подчинена тому же закону распределения, что и T_j. Отсюда математическое ожидание длительности простоя i агрегата вычисляется по соотношению [2]:

$$M\left\{\tau_{ij}\right\}=\int_0^{\infty}\tau_{ij}P_j\left(\tau_{ij}+\frac{V_{ji}}{U_i}\right)d\tau_{ij} \qquad (3)$$

для $j<i$ и по соотношению

$$M\left\{\tau_{ij}\right\}=\int_0^{\infty}\tau_{ij}P_j\left(\tau_{ij}+\frac{1}{U_i}\left(V_{ij}^{\max}-V_{ij}\right)\right)d\tau_{ij} \qquad (4)$$

для $j>i$.

Тогда математическое ожидание невосполнимых потерь продукта при вынужденном простое «узкого» места можно определить на основании выражений (3) и (4) с учетом вероятности отказа любого агрегата в течение периода оперативного управления T, который составляет несколько часов, смену или сутки в зависимости от сложившейся производственной ситуации:

$$M_{Qi}\left\{t_j\right\}=U_i Ц\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\int_0^{T}M\left\{\tau_{ij}\right\}P(t_j)dt_j, \qquad (5)$$

где Ц — цена единицы готовой продукции, руб./т.

При определении эффективности задачи оперативного управления, учитывая соотношение (5), можно минимизировать потери, выбрав соответствующие уровни запасов в промежуточных емкостях. Очевидно, что такая оптимизация будет неполной, если не учесть и другие виды потерь, которые имеют место в случае вынужденного простоя любого агрегата в технологической линии. Вероятность простоя некоторого r агрегата ($r=\overline{1,N}$) при аварийном останове некоторого j агрегата определяется следующим образом:

$$P(T_r)=\int_{t_r}^{\infty}P(T_j)dT_j,$$

где T_r — время вынужденного простоя r агрегата на участке $j \div r$ или $r \div j$:

$$T_r = \frac{V_{jr}}{U_r}, \text{ или } T_r = \frac{1}{U_r}\left(V_{rj}^{\max} - V_{rj}\right).$$

Теперь общие потери, вызванные вынужденными остановами агрегатов технологического комплекса, могут быть записаны в виде:

$$Y = M_{Qi}\left\{t_j\right\} + \sum_{\substack{r=1 \\ r\neq i}}^{N} \chi_r \sum_{j=1}^{N} \int_{t_n}^{\infty} P(T_j)dT_j, \quad (6)$$

где χ_r — потери, приходящиеся на один простой r агрегата.

Таким образом, сформулирована задача выбора оптимальных уровней запасов в промежуточных емкостях из условия минимума потерь, вызываемых внеплановыми простоями оборудования. Ясно, что результаты решения этой задачи будут зависеть от положения «узкого» места в цепи агрегатов и от характера законов распределения длительностей простоев различных агрегатов, а также от соотношения величин потерь на различных участках производства.

Выражение (6) является задачей статической оптимизации, так как выше было принято, что производительность технологической линии (имеются в виду работоспособные агрегаты) остается неизменной до момента останова и равной производительности «узкого» места. Такая стратегия достаточно часто применяется оперативным персоналом в производственных условиях и весьма просто обосновывается: любое изменение производительности приводит к потерям качества, сырья, энергии, химикатов.

Тем не менее постановку задачи (6) можно видоизменить, считая производительности функциями времени, и решить задачу оптимального выбора стратегии изменения производительности r агрегата при выходе из строя какого-либо j агрегата.

В этом случае постановка задачи существенно усложнится.

Функция потерь примет следующий вид:

$$Y = U_i^{\max}\left[\sum_{j=1}^{N}\int_0^T \int_0^{\infty} \left(T_j - t_n\right) P\left(T_j - t_n\right) P\left(t_j\right) d\left(T_j - t_n\right) dt_j\right], \quad (7)$$

где t_r — время переполнения или опустошения емкостей на участке $r \div j$ $(j \div r)$.

Ограничения в задаче:

— Уравнения запасов на каждом участке

$$\frac{dV_r}{dt} = U_{r-1} - b_r U_r, \quad (8)$$

где b_r — коэффициент, обратный коэффициенту выхода k_r,

$$b_r = \frac{1}{k_r}.$$

Если в уравнении (8) $r = j$, то $U_r = 0$.

Граничные условия:

$$t = 0, \quad V_r = V_r^0;$$

$$t = t_r, \quad V_r = \begin{cases} 0 & при\ j < r \\ V_r^{\max} & при\ j > r \end{cases}. \quad (9)$$

— Ограничения на диапазон изменения переменных:

$$0 \le V_r(t) \le V_r^{\max} \quad (10)$$

$$0 \le U_r(t) \le U_r^{\max}.$$

Уравнения (8) с учетом условий (9) и (10) можно записать в интегральной форме:

$$V_r(t_r) = V_r^0 + \int_0^{t_r}(U_{r-1} - b_r U_r)dt.$$

Таким образом, получена вариационная задача на условный экстремум функционала (7) при ограничениях в виде уравнений и неравенств. Для решения этой задачи целесообразно упростить ее постановку, приняв, что на интервале времени T, который не должен превышать нескольких часов, не может быть больше одного аварийного останова. Тогда задача сведется к выбору оптимальной стратегии управлении при аварийном выходе из строя какого-либо агрегата.

Для решения сформулированных выше задач оптимального оперативного управления необходимо получить исходные данные в виде предельных значений запасов, предельных и номинальных величин производительностей, коэффициентов выхода продукции на каждом участке, а также статистики простоев основного технологического оборудования. Такие данные были получены на производстве сульфатной беленой целлюлозы Котласского ЦБК.

Статистика простоев оборудования (данные о длительности внеплановых простоев и об интервалах безаварийной работы) была использована для построения гистограмм и оценки по ним плотности распределения длительности простоев и времени безаварийной работы. Достаточно представительную выборку данных удалось получить только для сушильного участка сульфат-целлюлозного производства. Для варочно-промывного и отбельного цехов не удалось собрать репрезентативные выборки, поэтому оценки распределения простоев для этих цехов нуждаются в последующем уточнении.

При аппроксимации эмпирических распределений была использована методика, изложенная в [3]. Данная методика рассматривается на примере распределения длительности внеплановых простоев сушильного цеха.

На основании выборки данных о длительности простоев пресспата (170 точек) были рассчитаны показатели асимметрии β_1 и эксцесса β_2:

$$\beta_1 = 1.8;\ \beta_2 = 5$$

и по номограмме (рис. 2), заимствованной из [3], определен вид аппроксимирующего распределения Джонсона.

Семейство распределений Джонсона получило довольно широкое распространение для описания эмпирических зависимостей. Преимущество распределений Джонсона состоит в преобразовании случайной величины в нормированную нормально распределенную величину, для которой могут быть использованы таблицы нормального распределения. В общем случае преобразование Джонсона Z имеет вид:

$$Z=\gamma+\eta\cdot\tau(x,\varepsilon,\lambda), \qquad (11)$$

где η, γ, ε и λ — параметры распределения Джонсона; $\tau(x,\varepsilon,\lambda)$ — произвольная функция, в рассматриваемом случае — время отказа.

Для конкретного случая согласно номограмме (рис. 2) должно быть использовано семейство S_β Джонсона, в котором функция τ задается следующим образом:

$$\tau(x,\varepsilon,\lambda)=\ln\frac{x-\varepsilon}{\lambda+\varepsilon-x}.$$

Тогда выражение для плотности распределения имеет вид:

$$f(x)=\frac{\eta}{\sqrt{2\pi}}\cdot\frac{\lambda}{(x-\varepsilon)(\lambda-x+\varepsilon)}\cdot\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\gamma+\eta\ln\frac{x-\varepsilon}{\lambda+\varepsilon-x}\right)^2\right). \qquad (12)$$

Очевидно, что наименьшее возможное значение случайной величины $\varepsilon=0$ (наименьшая длительность простоя), остальные параметры λ,η,γ определяются из системы уравнений, которая получается путем подстановки каких-либо трех квантилей нормального и эмпирического распределений для одних и тех же значений вероятности, например 0.2, 0.8 и 0.5, в соотношение (11).

Были найдены следующие значения:

$$\lambda=225,\eta=0.94,\gamma=1.59.$$

Проверка гипотезы о соответствии выбранного закона распределения эмпирическому по критерию Пирсона подтвердила возможность использования распределения S_β Джонсона для описания опытных данных.

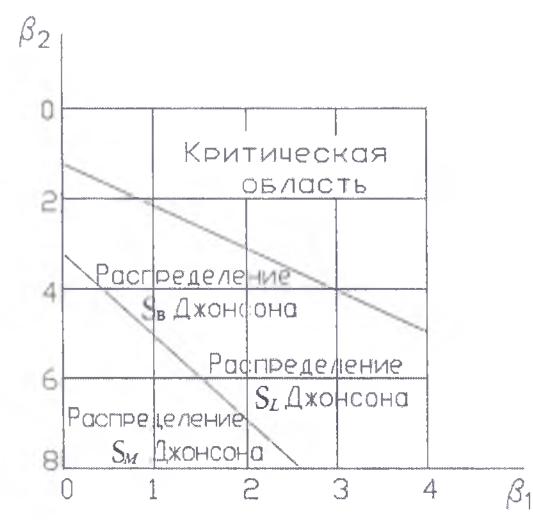

Рис. 2. Номограмма для выбора типа аппроксимирующего распределения Джонсона

На рис. 3 приведены оценки плотностей распределения длительности простоев варочно-промывного, отбельного и сушильного участков.

Параметры всех трех аппроксимирующих законов распределения приведены в табл. 1.

Следует отметить, что параметры законов распределения длительности простоев варочного и отбельного цехов (в табл. 1 участки 1 и 2) получены по выборкам малого объема и поэтому должны быть в дальнейшем уточнены.

По данным об интервалах времени безаварийной работы оборудования были найдены оценки законов распределения времени безотказной работы. Допущения, которые при этом были приняты, а именно: каждый вид оборудования подвержен действию простейшего потока отказов с интенсивностью α_j, позволили принять для времени безаварийной работы экспоненциальный закон распределения, плотность которого выражается зависимостью [3]:

$$P(t_j)=\alpha_j e^{-\alpha_j t_j},$$

где α_j — интенсивность отказов j агрегата.

Проверка по критерию Пирсона показала хорошее совпадение экспериментального и аппроксимирующего распределений.

Оценки интенсивностей отказов для участков производства сульфатной беленой целлюлозы равны соответственно: α_1 = 0,01 1/ч, α_2 = 0,02 1/ч, α_3 = 0,034 1/ч.

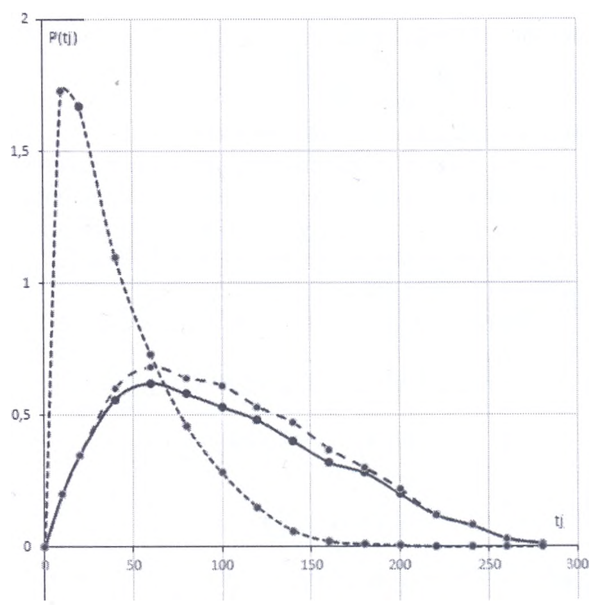

Рис. 3. Распределение длительности простоев участков производства сульфатной беленой целлюлозы: —•— — варочно-промывной, – ◆ – — отбельный, --•-- — сушильный

Таблица 1. Параметры законов распределения длительности простоев цехов производства сульфатной беленой целлюлозы на Котласском ЦБК

№ участка	ε	λ	η	γ
1	0	600	1	0,7
2	0	800	1	1
3	0	225	0,94	1,59

Решение задачи оперативного управления на примере производства сульфатной беленой целлюлозы

Выше была сформулирована задача выбора оптимальных запасов полуфабрикатов в промежуточных емкостях из условия минимума потерь, вызываемых простоями оборудования. Критерий эффективности задачи имеет вид (6). Задача может быть решена с учетом ограничений на предельные значения запасов для различного положения «узкого» места в технологической цепи. В производстве сульфатной беленой целлюлозы принято выделять три укрупненных участка, разделенных буферными емкостями: варочно-промывной, отбельный и сушильный.

Согласно ограничениям, сформулированным ранее, оптимальные запасы следует выбирать в емкостях между названными участками. На рис. 4 представлена схема производства, где буквами V_2 и V_3 обозначены запасы полуфабрикатов, содержащиеся во всех емкостях между соответствующими участками. Величины запасов выражены в т а. с. в. и приведены к выходу технологической линии.

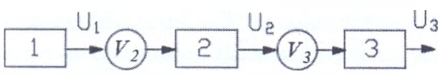

Рис. 4. Укрупненная схема производства сульфатной беленой целлюлозы

Каждый из участков производства сульфатной беленой целлюлозы может быть «узким» местом по различного рода причинам и лимитировать производительность технологической линии. Пусть в выражении (6) математическое ожидание потерь продукта, в случае вынужденного простоя «узкого» места, обозначается как Y_w, а все другие потери — Y_z.

В зависимости от положения «узкого» места в критерии (6) изменится лишь составляющая потерь, обусловленная вынужденным простоем «узкого» места, т. е. первое и второе слагаемые критерия примут вид:

— «узкое» место — варочно-промывной цех

$$Y_w = U_1 Ц \left[\pm_2 T \int_0^\infty \tau_{12} P_2 \left(\tau_{12} + \frac{V_{12}^{max} - V_{12}}{U_1} \right) d\tau_{12} + \right.$$

$$\left. + \pm_3 T \int_0^\infty \tau_{13} P_3 \left(\tau_{13} + \frac{V_{12}^{max} + V_{13}^{max} - V_{12} - V_{13}}{U_1} \right) d\tau_{13} \right]; \quad (13)$$

— «узкое» место — отбельный цех

$$Y_w = U_2 Ц \left[\pm_1 T \int_0^\infty \tau_{21} P_1 \left(\tau_{21} + \frac{1}{U_2} V_{21} \right) d\tau_{21} + \right.$$

$$\left. + \pm_3 T \int_0^\infty \tau_{23} P_3 \left(\tau_{23} + \frac{V_{23}^{max} - V_{23}}{U_2} \right) d\tau_{23} \right]; \quad (14)$$

— «узкое» место — сушильный цех

$$Y_w = U_3 Ц \left[\pm_1 T \int_0^\infty \tau_{31} P_1 \left(\tau_{31} + \frac{V_{32} + V_{33}}{U_3} \right) d\tau_{31} + \right.$$

$$\left. + \pm_2 T \int_0^\infty \tau_{32} P_2 \left(\tau_{32} + \frac{V_{33}}{U_3} \right) d\tau_{32} \right]. \quad (15)$$

Остальные составляющие функции потерь, обусловленные вынужденными простоями любых агрегатов, не меняются и записываются следующим образом:

$$Y_z = \sum_{r=1}^{3} \chi_r \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq r}}^{3} \int_{t_r}^{\infty} P(T_j) dT_j . \quad (16)$$

В соотношениях (13)–(16) плотности распределения $P(T_j)$ имеют вид (12), количественные оценки параметров распределения приведены в табл. 1. Кроме того, в задаче использованы следующие исходные данные:

$$T = 24 \text{ ч.}, Ц = 250\,000 \text{ руб./т}; \; U_i = 20 \text{ т/ч}.$$

Учитывая сложный вид критерия оптимальности, для решения задачи использовался метод покоординатного спуска.

На каждой итерации алгоритма метода выполняется серия шагов в направлении функции цели по всем переменным (в данной задаче это переменные V_2 и V_3), на каждом шаге проверяется выполнение ограничений. Величина шага корректируется в зависимости от расстояния, пройденного по соответствующей координате на предыдущей итерации. Признаком конца вычислений является малость расстояния, пройденного за последнюю итерацию, при одновременном малом изменении функции цели.

При решении задачи были промоделированы все три случая положения «узкого» места. Результаты решения при одних и тех же исходных данных, но различных номерах j «узкого» места приведены в табл. 2.

Так как исходные данные в задаче: параметры законов распределения α_j, η_j, γ_j, интенсивности отказов оборудования α_j, потери, приходящиеся на единичный простой средней длительности, и некоторые другие величины получены по выборкам ограниченного объема и, следовательно, с большой погрешностью, то была исследована чувствительность решения задачи к вариациям исходных данных. С этой целью были выполнены многовариантные расчеты с различными исходными данными, причем практически все параметры варьировались в пределах $\pm 20\%$. Результаты моделирования для некоторых сочетаний величин исходных данных при всех возможных случаях положения «узкого» места приведены в таблицах 3–5.

По данным табл. 3–5 оценивалась чувствительность решения задачи к вариации исходных данных. Выявилось влияние положения «узкого» места на величину коэффициентов чувствительности, оценки которых представлены ниже:

Таблица 2. Результаты решения задачи выбора оптимальных запасов в промежуточных емкостях

№ «узкого» места	$V_{2\,опт}$.% от V_{max}	$V_{3\,опт}$.% от V_{max}	$F_{мин}$ x 10^3, руб.
1	0	80	423
2	97	70	168
3	57	100	469

Таблица 3. Результаты решения задачи в случае «узкого» места $j=1$

№	λ_r	χ_j	η_j, γ_j	(Потери на участке j) x10^3, руб.			Fx10^3, руб.	V_2% от V_{max}	V_3% от V_{max}
				1	2	3			
1.	номин.	номин.	номин.	280	110	33	423	0	80
2.	номин.	номин.	в 1.5ном.	53	113	9	175	3	80
3.	номин.	номин.	в 1.5ном.	1433	100	67	1600	0	74
4.	на 20%>	на 20%>	номин.	756	139	65	960	0	80
5.	на 20%<	на 20%<	номин.	46	84	8	138	0	80

Таблица 4. Результаты решения задачи в случае «узкого» места $j=2$

№	λ_r	χ_j	η_j, γ_j	(Потери на участке j) x10^3, руб.			Fx10^3, руб.	V_2% от V_{max}	V_3% от V_{max}
				1	2	3			
1.	на 20%<	на 20%<	номин.	73	5	14	92	88	68
2.	на 20%<	на 20%>	номин.	104	21	18	135	85	68
3.	номин.	номин.	номин.	100	18	51	169	97	47
4.	номин.	номин.	в 1.5>	100	3	18	121	99	70
5.	номин.	номин.	в 1.5<	98	231	49	378	99	50
6.	на 20%>	на 20%>	номин.	121	137	161	319	100	56

Таблица 5. Результаты решения задачи в случае «узкого» места $j=3$

№	λ_r	χ_r	η_j, γ_j	(Потери на участке j) x10^3, руб.			Fx10^3, руб.	V_2% от V_{max}	V_3% от V_{max}
				1	2	3			
1.	номин.	номин.	номин.	50	138	279	467	53	100
2.	номин.	номин.	в 1.5>	50	66	103	219	53	91
3.	номин.	номин.	в 1.5<	47	146	1413	1606	47	100
4.	на 20%>	на 20%>	номин.	72	180	752	1004	53	100
5.	на 20%<	на 20%<	номин.	32	55	76	163	57	91

$$\frac{\Delta V}{\Delta\chi} = 0 \div 0.05\,;\ \frac{\Delta V}{\Delta\lambda} = 0 \div 0.25\,;$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta(\eta,\gamma)} = 0.06 \div 0.2\,.$$

Диапазон варьирования параметров $\lambda_j, \chi_j, \eta_j, \gamma_j$ составил 40% — 50% от номинала.

Список литературы

1. *Курочкин А. А., Шабурова Г. В., Гордеев А. С., Завражнов А. И.* Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств. М.: КолосС, 2007. 597 с.
2. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 395 с.
3. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

E. P. Dyatlova, I. V. Remizova, I. V. Bondarenkova

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
191186 Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya, 18

SOLVING THE OPERATIONAL MANAGEMENT PROBLEM TAKING INTO ACCOUNT THE RANDOM NATURE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT UNSCHEDULED DOWNTIME

The operational management problem statement production with a consistent structure of material flows is considered. The operational management algorithms of the technological complexes typical for the pulp and paper industry enterprises are investigated. Taking into account the estimation of the distribution laws of the uptime and downtime of the units, the optimal reserves in the intermediate tanks were selected using the example of the production of bleached sulphate pulp.

Keywords: operational management, unscheduled equipment downtime, stocks, optimality criteria, technological equipment, intermediate tanks.

References

1. Kurochkin A. A., Shaburova G. V., Gordeev A. S., Zavrazhnov A. I. *Oborudovanie i avtomatizatsiya pererabatyvayushchikh proizvodstv* [Equipment and automation of processing plants]. Moscow: KolosS, 2007. 597 pp. (in Rus.).
2. Khan G., Shapiro S. *Statisticheskie modeli v inzhenernykh zadachakh* [Statistical models in engineering problems]. Moscow: Mir, 1969. 395 pp. (in Rus.).
3. Kobzar,, A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: FIZMATLIT, 2006. 816 pp. (in Rus.).