

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

БЕЛОВ А.А., канд. тех. наук, МАЛАФЕЕВ А.В., инж.

Приведены принципы и схема построения автоматизированной системы мониторинга и анализа производственного процесса, реализующей функции MES-системы и обеспечивающей информационную поддержку системы управления качеством и эффективностью производства.

В сложной системе управления производственным предприятием можно выделить несколько уровней (рис.1):

– **уровень стратегического управления** (АСУП, ERP) – стратегическое административно-финансовое планирование и управление, решающие задачи: что произвести; в каких объемах; к каким сроками; из чего и пр.;

– **уровень тактического управления** (АСУПП, MES) – уровень начальников производств, цеховых технологов, диспетчеров, мастеров, решающих задачу: как произвести заданное; по каким технологиям; на каком оборудовании; в каком порядке выполнять заказы; чтобы минимизировать издержки и обеспечить требуемое качество;

– **уровень оперативного управления** (АСУ ТП, SCADA) – уровень контроллерного управления, HMI с человеком-исполнителем, решающий задачи поддержания технологических режимов производственных процессов.

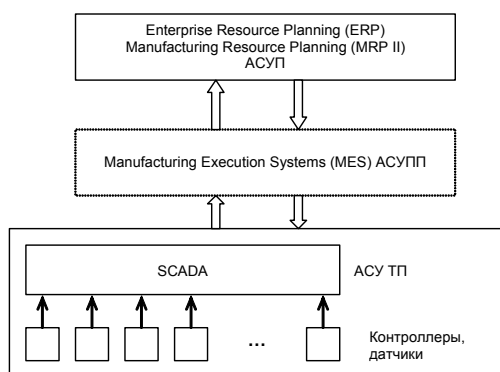


Рис.1 Схема управления производственной системой.

Автоматизированная система мониторинга и анализа производственного процесса (далее АСМА) реализует функции систем класса MES, связанные с управлением:

- контроль качества продукции, процессов и персонала;
- контроль и анализ технологии;
- контроль загрузки и технического состояния производственного оборудования;
- контроль энергопотребления;
- документирование производственных процессов и т.д.

Опираясь на уровень SCADA и взаимодействуя с ERP (MRP), системы класса MES увязывают в единое целое информационные ресурсы предприятия, активно способствуют их развитию, решению важнейших задач управления производством.

Среди таких задач в настоящее время выделяются задачи управления качеством и эффективностью производства, направленные на непрерывное улучшение деятельности предприятия. Нормативная база системы управления качеством регламентирована стандартами серии ИСО 9000-2001, в основе которых заложены такие принципы, как ориентация на запросы потребителя, лидерство и вовлечение персонала в творческое участие при выработке и реализации управленческих решений, системный и процессный подход, ориентация на непрерывное улучшение, в первую очередь благодаря постоянному обучению персонала, принятие решений на основе фактов, т.е. на основе полной и достоверной информации, превращаемой в знания. Эти принципы определили методологию построения АСМА, ее назначение и содержание. Вместе с тем при разработке АСМА были учтены следующие требования:

- единства информационного пространства, обеспечивающего возможность согласования всех данных;
- развития системы, т.е. возможности модификации существующих функций системы и добавления новых в процессе эксплуатации;
- учета реального времени, необходимого для регистрации и анализа процессов, их последовательности в рамках всей производственной системы;
- адаптации к изменяющимся потребностям пользователей по мере их совершенствования (обучение).

Исходя из указанных принципов и требований, была разработана схема построения АСМА, в которой на начальном этапе производится формирование типового (элементарного) процесса. В общем виде типовой процесс (операция) описывается совокупностью данных (рис.2), характеризующих:

- материальные ресурсы (сырье) $C_{ji} = \{q_{jiv}^c, g_{jj}^c\}$, включающие оценки качества (q_{jiv}^c) и количества (g_{jj}^c);
- энергетические ресурсы $\mathcal{E}_{ji} = \{q_{jiv}^e, g_{jj}^e\}$;
- трудовые ресурсы (персонал) $\mathcal{C}_{js} = \{q_{jiv}^s, g_{js}^s\}$;
- технические ресурсы (оборудование) $O_j = \{q_{jv}^o\}$ (количество оборудования имеет комплексную (единичную) оценку, необходимую для реализации j -го процесса; если для реализации i -го процесса параллельно используются несколько единиц (или комплексов) оборудования, то каждая представляет как типовой процесс);
- временные ресурсы (временные координаты процесса) $T_j = \{T_j^o, T_j^i, T_j^e\}$, включающие время загрузки (использования) оборудования, персонала, энергетических источников;
- продукты $\Pi_{jk} = \{q_{jiv}^p, g_{jk}^p\}$;

– режим $P_j = \{p_{jv}\}$, стремящийся к достижению заданного $\bar{P}_j = \{\bar{p}_{jv}\}$, необходимого для получения продуктов заданного качества $\bar{\Pi}_{jk}$.

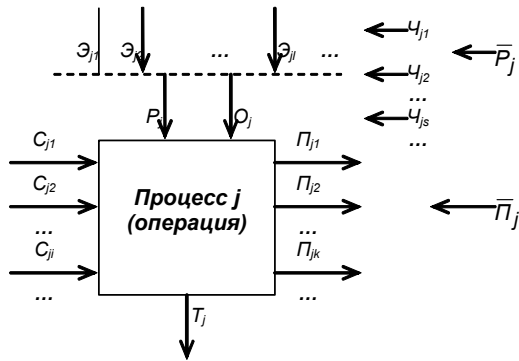


Рис.2. Информационная схема типового процесса

В целях обеспечения образного восприятия объекта управления осуществляется структуризация этой совокупности данных (первичных ИО) путем формирования информационных объектов (образов) ИО:

- паспорт партии $\Pi_j \equiv \bigcup_K \Pi_{jk} \rightarrow \bar{\Pi}_{jk}$ (аналогично $\bigcup_I C_{ji} \rightarrow \bar{C}_{ji}$, поскольку $\Pi_j \equiv C_{j+n}$);
- режимная карта $PK_j \equiv \bar{P}_j(O_j, C_j)$;
- карта операции $KO_j \equiv P_j \cup C_j \cup Э_j \cup T_j$.

На основании указанных вторичных ИО формируется ИО типового элементарного процесса (операции) – ОП, который, с одной стороны, является базовым для формирования структуры производственного процесса, с другой стороны, – основой для статистического анализа данной операции.

Формирование структуры производственного процесса производится в соответствии с методом моделирования, изложенным в [1]. Следуя системно-процессному принципу, посредством ОП удается отобразить весь ход производства продукции, всю последовательность передела сырья и получить полную картину всей кампании в различных аспектах и уровнях восприятия, удовлетворяя тем самым различные информационные потребности различных ЛПР.

Важнейшим документом, регламентирующим технологию производства изделия марки M_v , является технологическая карта, которая представляется путем объединения

$$TK(M_v) = \bigcup_J PK_j. \quad (1)$$

В практике производства PK_j создаются на основании разработанной технологической службой $TK(M_v)$, т.е.

$$TK(M_v) \rightarrow PK_j. \quad (2)$$

Реальный ход производственного процесса отображает сложный ИО «Маршрутная карта» – $MK(M_{v,\lambda})$, создаваемый как для всего производст-

венного процесса, так и для его отдельных участков (этапов):

$$MKП(M_{v,\lambda}) = \bigcup_J KO_j; \quad (3)$$

$$MKУ(M_{v,\lambda}) = \bigcup_{J' \subset J} KO_j. \quad (4)$$

Объединение Π_j в рамках единой компании дает возможность оценки качества продукции (или полуфабриката) в процессе ее производства:

$$\Pi\Pi\Pi(M_{v,\lambda}) = \bigcup_J \Pi\Pi_j; \quad (5)$$

$$\Pi\PiУ(M_{v,\lambda}) = \bigcup_{J' \subset J} \Pi\Pi_j. \quad (6)$$

Иерархическая композиция информационных объектов завершается представлением целостного содержания процесса производства λ -ой партии v -ой продукции:

$$\Pi\Pi\Pi(M_{v,\lambda}) = TK(M_v) \cup MK(M_{v,\lambda}) \cup \Pi\Pi(M_{v,\lambda}). \quad (7)$$

Данное выражение характеризует полноту системы мониторинга производства продукции. При этом осуществляется мониторинг качества продукции и процессов, что соответствует требованиям ИСО СМК [2].

Основной задачей анализа является снятие неопределенности об объекте управления, о возникающих проблемных ситуациях путем структуризации информационных объектов, т.е. выявления структуры и тесноты статистической связи между данными, определяющими состав ИО. С позиции динамической теории информации [5] данные, определяющие состав ИО, представляют ЛПР лишь рецептивную информацию, не обладающую ценностью. Для генерации ценной информации необходима синергия (организация) этих данных, обеспечивающая достижение структурированности и целенаправленности.

Соотношение неопределенности, оцениваемой энтропией, и информации, содержащейся в ИТ, можно обозначить уравнением

$$H_{\max} = I_r + H_r \quad (8)$$

или с помощью коэффициента избыточности R

$$R_r = 1 - \frac{H_r}{H_{\max}} = \frac{I_r}{H_{\max}}. \quad (9)$$

Здесь $H_{\max} = \log N$, где N – число данных (информационных элементов) в ИО; I_r – информация, содержащаяся в ИО и обусловленная существованием r -местных связей между элементами ИО; H_r – остаточная энтропия ИО. При $r=0$ $H_0 = H_{\max}$, а $I_0 = 0$ и $R_0 = 0$. Это означает, что не связанный состав ИО при любых N может нести только энтропию. При $r \rightarrow \infty$ $H_\infty \neq 0$ (связанная энтропия ИО), а $I_\infty = I_{\max} < H_{\max}$:

$$R_\infty = 1 - \frac{H_\infty}{H_{\max}} = \frac{I_{\max}}{H_{\max}} < 1. \quad (10)$$

При организации данных в рамках ИТ, направленной на генерацию ценной информации, использован метод корреляционно-регрессионного анализа, где данные или информационные элементы как предикторные переменные $\xi=X$ играют роль неслучайного (векторного при $r>1$) параметра, от которого зависит закон распределения вероятностей (среднее значение и дисперсия) целевого показателя η . Такого рода зависимость описывается математической моделью вида

$$\eta(X) = f(X) + \varepsilon(X), \quad (11)$$

в которой неслучайная (детерминированная) составляющая правой части $f(X)$ описывает поведение условного среднего $y_{cp} = M\eta(X) = f(X)$ в зависимости от X , а остаточная случайная компонента $\varepsilon(X)$ отражает случайную природу $\eta(X)$. Вариацию целевого показателя η характеризует дисперсия $\sigma_\eta^2 = D_\eta$, вариацию функции регрессии $y_{cp} = f(X)$ – дисперсия $\sigma_f^2 = D_f(\xi)$ (при $\xi=X$), а среднюю величину дисперсии неконтролируемой остаточной случайной компоненты $\varepsilon - \bar{\sigma}_{\eta(X)}^2$, как усредненная (по различным значениям ξ) условная дисперсия $D(\eta/\xi = X)$. Согласно [4] эти меры могут быть объединены соотношением

$$\sigma_\eta^2 = \sigma_f^2 + \bar{\sigma}_{\eta(X)}^2, \quad (12)$$

показывающим, что вариация цели (полная вариация целевого показателя) складывается из контролируемых (воспринимаемых) вариаций целевых функций регрессии и их не поддающихся контролю (восприятию) вариаций случайной остаточной компоненты. Очевидно, соотношение (12) идентично соотношению (8). Более того, полученный на основании (12) индекс корреляции, или, иначе, коэффициент детерминации, $R_{\eta,\xi}^2$ равен [3]

$$R_{\eta,\xi}^2 = 1 - \frac{\bar{\sigma}_{\eta(X)}^2}{\sigma_\eta^2} = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_\eta^2}, \quad (13)$$

где $R_{\eta,\xi}$ – множественный коэффициент корреляции (по своему характеру совпадает с коэффициентом избыточности (9)). Таким образом, по значению $R_{\eta,\xi}^2$ (или $R_{\eta,\xi}$), его отличию от 0 или приближению к 1, можно оценить ИО, т.е. определить наличие в нем ценной информации. Естественно, что при значении $R_{\eta,\xi}^2$, близком к 0, такой ИО не может представлять ценности для ЛПР. Для выборочного $\hat{R}_{\eta,\xi}$ статистически значимое отличие от 0 определяется по F -распределению.

При формировании ИО используется свойство множественного коэффициента корреляции:

$$R_{\eta,\xi_1} \leq R_{\eta,\xi_1\xi_2} \leq R_{\eta,\xi_1\xi_2\xi_3} \leq \dots R_{\eta,\xi_1\xi_2\xi_3\dots\xi_r} \leq \dots R_{\eta,\xi_1\xi_2\xi_3\dots\xi_n}, \quad (14)$$

на основании которого выбирается оптимальный состав ИО в предполагаемом контексте, обозначаемом целевым показателем η . Представление ИО осуществляется в виде взвешенного графа, вершины которого соответствуют составу ИО, а дуги – парным коэффициентам корреляции и регрессии. Структурная форма представления информации позволяет судить о качестве (организации) процесса, его изменениях, а также заключает в себе не только контрольную, но и обучающую функцию. Это является важным обстоятельством с точки зрения управления качеством процессов и персонала. Целенаправленность ИО как систем определяется выбором целевого показателя η : качества продукции процесса (q_{ikv}) и эффективности производства (себестоимость

$b_{jk} = (g_{ji}^c + g_{jl}^a + g_{js}^y) / g_{jk}^n$), а также конкретикой (контекстом) информационных потребностей ЛПР, вытекающих из функциональной направленности деятельности управленческого персонала. Вся функциональная область системы управления A подразделяется на отдельные подобласти A_i , соответствующие функциональным обязанностям отдельных ЛПР (или подразделений), входящих в структуру управления. Из множества $\Xi = \{\xi\}$ отбираются ξ_i , имеющие существенную степень принадлежности $\mu_{A_i}(\xi)$. Данные ξ_i определяют состав ИО, отражающий область (направление) управления A_i . Так, для сформировавшейся структуры управления качеством процесса производства электрографитовых изделий в ЗАО «Электроконтакт» (г. Кинешма) были выделены следующие направления (контуры) управления: контур качества продуктов K_k ; технологический контур – K_m ; технический контур – $K_{об}$; энергетический контур $K_э$; организационный контур $K_{орг}$. Для K_k в состав ИО вошли данные из Π_j , для K_m – из KO_j , для $K_{об}$ – из O_j , для $K_э$ – из $Э_j$. Основным содержанием информационного обеспечения организационного контура является журнал $ИОП(M_{v,k})$. В процессе создания $ИОП(M_{v,k})$ большое значение приобретает характер маршрута прохождения партии сырья (полуфабриката). Для оценки маршрута используют два коэффициента:

– коэффициент участия партии в операции u_{ik} ($0 < u_{ik} < 1$):

$$u_{ik} = \frac{w_j}{g_j^c} \cdot \frac{g_k^n}{g^n}; \quad (15)$$

– коэффициент наполнения партии перед операцией z_{ik} ($0 < z_{ik} < 1$):

$$z_{ik} = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^n w_i} \cdot \frac{g_k^n}{g^n}. \quad (16)$$

Коэффициент u_{ik} определяется как отношение используемой части λ -ой партии сырья w_j в j -ой операции к величине g_j^c , приведенной к k -ой доле выходного продукта g_k^n . Для определения z_{ik} используется отношение w_j к суммарному количеству сырья, затраченному на формирование партии (k -ой части) продукта. Получаемые коэффициенты u_{ik} и z_{ik} характеризуют веса дуг ориентированного графа маршрутной карты. Для всей маршрутной

карты производственного процесса строятся матрицы $\|u_{ik}\|$ и $\|z_{ik}\|$, позволяющие определять значения коэффициентов u_{ik} и z_{ik} для различных длин пути h (количество последовательных процессов на маршруте), представляемых в качестве оценок организованности (логистики) сложного процесса. При этом выделяются четыре вида процессов:

1) линейный процесс, в котором каждая партия сырья преобразуется в одну партию продукции ($i=1, k=1$);

2) ветвящийся процесс, в котором осуществляется диверсификация выходного продукта ($i=1, k>1$);

3) сходящийся процесс, в котором для выпуска одного вида продуктов используется сырьевая группа ($i>1, k=1$);

4) смешанный (сложный) процесс, в котором соединены все вышеуказанные виды.

Для первых трех видов формирование ИО, проведение анализа и последующее управление не вызывают больших трудностей, чего нельзя сказать относительно четвертого вида. Для такого вида процессов при формировании ИО путем корреляционно-регрессионного анализа в качестве критерия кроме $R_{\eta, \xi}^2$, не отражающего причинно-следственную связь, выступает коэффициент u_{ik} : при $u_{ik} \rightarrow 0$ значение $R_{\eta, \xi}^2$ не имеет смысла. В организационном контуре значение u_{ik} используется и как оценка эффективности внутрипроизводственной логистики, в частности, совершенства операций складирования и транспортировки продукции (полуфабрикатов) на различных этапах производства.

Представленная схема построения АСМА поддерживается рядом разработанных базовых и специализированных инструментов, позволяющих реализовать модель производственного процесса, обеспечить управленческий персонал ценной информацией, модернизировать систему в зависимости от изменений, возникающих в процессе эксплуатации, а также интегрировать с другими информационными системами. К таким инструментам относятся:

– система ввода данных, согласованная с утвержденными формами и регламентами получения, сбора и представления первичной информации и способствующая обеспечению целостности БД;

– система формирования и использования справочников;

– система формирования ПП, РК, КО и ОП;

– система формирования и документирования ТК, МК, ПП и ИОП, а также аналитической и отчетной документации;

– система расчета связей между партиями материалов, удаленных друг от друга последовательностью операций;

– настраиваемый механизм представления выходных форм;

– система разграничения прав доступа и интерфейсов работы;

– система протоколирования работы пользователей;

– библиотека сервисных обработок, подпрограмм, процедур;

– библиотека запросов с возможностью экспорта данных во внешние программные комплексы и др.

Таким образом, разработана и прошла промышленное испытание автоматизированная система мониторинга и анализа производственных процессов, обладающая рядом достоинств:

– унифицированное описание технологии позволяет использовать методику моделирования и инструментальные средства для широкого спектра производственных процессов, отличающихся многоэтапностью, сложностью внутрипроизводственной логистики;

– модульная архитектура программного комплекса позволяет производить удобную настройку и адаптацию системы при изменении и развитии технологии производственного процесса, информационных потребностей пользователей;

– гибкая система формирования и представления информационных объектов дает возможность отобразить и проанализировать производственный процесс на всех иерархических уровнях и в различных аспектах;

– формирование единой базы производственно-экономических и технологических показателей, реализация методов статистического анализа создают основу целенаправленного развития производства.

Список литературы

1. Белов А.А., Малафеев А.В. Моделирование и организация информационного обеспечения управления качеством производственных процессов // Вестник ИГЭУ. – 2004. – № 3. – С. 25–29.

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Система менеджмента качества. Требования. – М.: Изд-во стандартов, 2001.

3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ.изд. – М.: Финансы и статистика, 1985.

4. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применение. – М.: Наука, 1968.

5. Чернавский Д.С. Синергетика и информация (динамическая теория информации). – М.: Едиториал УРСС, 2004.