

Юрий РУДЬ

Анна ЛИСТРОВА

Горнорудный Институт

Кривой Рог, СССР

#### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Резюме.** В докладе на примере фабрик окускования рассмотрены особенности математического моделирования надежности сложных технологических систем горнообогатительных предприятий (СТС ГП). Выбран порядок построения математических моделей надежности СТС ГП. Создан метод формального описания этих моделей, применение которого обеспечивает рациональную организацию процедуры построения математических моделей надежности рассматриваемых систем. При этом математическая модель надежности технологической системы в целом определяется комплексом типовых математических моделей надежности ее компонентов, обозначаемых символами и записываемых по определенной системе правил. Приведена математическая модель надежности СТС фабрик окускования железных руд. Разработан метод расчета производительности СТС ГП, который базируется на показателях надежности, дающих количественную оценку режимов функционирования систем.

#### Введение

В общем объеме продукции горнодобывающей промышленности постоянно растет удельный вес окускованного сырья, получаемого на горнообогатительных предприятиях из бедных железных руд. В 1975 г. в передовых странах мира было произведено 568 млн. т окускованного железорудного сырья, что составило 69% общего объема продукции горнодобывающей промышленности. Производство окускованных железорудных материалов осуществляется на агломерационных и окомковательных фабриках, созданных на базе конвейерных машин с производительностью 0,7-4,0 млн. т/год, и представляющих собой сложные технологические системы горнообогатительных предприятий (СТС ГП). Современные фабрики окускования характеризуются применением технологического оборудования непрерывного действия большой мощности; возрастанием числа взаимодействующих технологических агрегатов и усложнением структуры функциональных схем; значительными материалами и экономическими потерями, связанными с простоями оборудования из-за аварийных отказов и плановых ремонтов, что все вместе предъявляет высокие требования к надежности технологических систем и их комплектующих элементов. Все это определяет постановку актуальной научной и практической проблемы, решение которой освещается в данном докладе - раз-

работка теории построения математических моделей надежности и расчета производительности сложных технологических систем горнообогатительных предприятий, в частности, технологических систем фабрик окускования железных руд.

#### Методы моделирования надежности СТС ГП

На основе теории марковских процессов и использования эвристических принципов, в частности, путем введения в рассмотрение эквивалентного элемента для параллельного соединения, разработан метод, который позволяет упростить сложные структурно-элементные схемы СТС ГП, включающие последовательное, параллельное и последовательно-параллельное соединения элементов, найти вероятности возможных состояний и временные показатели надежности технологических систем в нестационарном и стационарном режимах [1]. Данный метод положен в основу математических моделей надежности СТС ГП.

Процесс моделирования надежности СТС ГП заключается в замене реальной технологической системы более удобной для исследования математической моделью, сохраняющей существенные технические особенности системы-оригинала. Выбор типа модели надежности, ее сложности, точности во многом определяет методику исследования и конечные результаты. Поэтому математическая модель СТС ГП должна отражать свойства надежности моделируемой системы с максимально возможной точностью. В то же время, она не может быть абсолютно адекватной реальной технологической системе ввиду сложности и трудности описания процессов ее функционирования, включая процесс возникновения отказов системы и восстановления ее работоспособности. Достаточный уровень адекватности модели любого типа обеспечивается в том случае, если она не противоречива и подчиняется всем обычным законам математической логики, а также достоверно описывает моделируемую ситуацию — отмечает Р.Р. Мак-Лоуном в работе [2]. Математическая модель идеализирует реальную ситуацию, упрощает ее. Поэтому модель надежности СТС ГП описывает лишь основные закономерности процесса функционирования, существенно влияющие на надежность системы, и не отражает второстепенные факторы. Понятно, что элементом наименьшей сложности СТС ГП является комплектующее оборудование различного функционального назначения, которое может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии. Причем, распределение наработок между отказами оборудования и среднего времени восстановления его работоспособности описываются экспоненциальными функциями. Степень упрощения реального процесса функционирования СТС ГП определяется задачей исследования, достоверностью исходных данных, получаемых на основе ограниченного числа опытных данных, погрешностью применяемых приближенных вычислительных методов. При этом достигается разумный компромисс между точностью воспроизведения реальной технологической системы и сложностью математической модели надежности СТС ГП.

В зависимости от задач исследования нами различаются модели надежности функционирующих и проектируемых СТС ГП. В первом случае объектом исследования является реальная система, ее структура, технологическое оборудование,



результаты функционирования системы. Во втором случае известна лишь предполагаемая структура технологической системы, а также проектные данные надежности и технических параметров оборудования, планируемые условия функционирования системы. Поэтому существуют особенности методического плана, которые должны учитываться при моделировании надежности реально эксплуатируемых и проектируемых СТС ГП. Если в первом случае моделирование надежности сводится к определению подходящего математического выражения, удовлетворительно описывающего реальный процесс функционирования технологической системы, то во втором случае задача значительно сложнее, так как при моделировании необходимо задать предполагаемому устройству системы, обеспечить ее элементное наполнение, т.е. выбрать технологическое оборудование заданных типов и номенклатуры, упростить систему до такой степени, чтобы сделать возможным ее экспериментальное исследование доступными средствами. Сложность проблемы моделирования надежности проектируемой СТС ГП дополнительно увеличивается тем, что при разработке математической модели используются как результаты теоретических исследований, так и априорные сведения о характере и свойствах изучаемых процессов, ввиду того, что при создании систем применяются как новые технические решения, так и существующие образцы технологического оборудования, нашедшие широкое применение в практике обслуживания.

С учетом вышесказанного разработан следующий порядок построения математической модели надежности СТС ГП [3, 4, 5]:

1. Проводится изучение и содержательное описание функционирующей технологической системы или составляется функциональная схема проектируемой системы. При этом отражается совокупность сведений о характере процесса функционирования системы, о количественных характеристиках этого процесса. Рассматривается структура исследуемой системы, элементное наполнение (номенклатуру технологического оборудования) системы с указанием основных технико-эксплуатационных показателей технологического оборудования. Отражаются взаимосвязи между элементами, их характер, наличие резервированных элементов, технологических цепей и транспортных потоков. В первом приближении качественно оценивается степень сложности СТС ГП.

2. Выполняется анализ функциональной схемы СТС ГП с точки зрения выявления возможности ее функционирования при различных режимах выходного эффекта, а также производится оценка характера и типа соединения в системе оборудования, технологических цепей и транспортных потоков. При условии, что технологические элементы могут находиться в одном из двух возможных состояний - работоспособном или неработоспособном, рассматриваются все возможные комбинации состояний элементов технологической системы, которые характерны для каждого режима эксплуатации. Проводится уточнение понятия отказа СТС ГП, составление перечня свойств ее работоспособности, определяются зависимости между показателями процесса функционирования системы.

3. Составляется структурно-элементная схема технологической системы, служащая ее графической моделью надежности. Процесс построения графической модели надежности СТС ГП отнюдь не сводится только к формальному преобра-

зованию функциональной схемы с целью ее упрощения. При этом проводится большая работа по выявлению особенностей структуры технологической системы, характера взаимодействия элементов, степени влияния последних на общую надежность системы. В структурно-элементную схему включаются лишь те технологические элементы и связи, которые по своему смыслу отражают признаки и свойства надежности системы и проявляются при рассмотрении процесса ее функционирования. Структурно-элементная схема по функциональному признаку разбивается на подсистемы, из которых выделяются группы технологических элементов. Технологическая подсистема, это самостоятельная часть системы, состоящая из структурно связанного между собой оборудования, объединенного решением единой функциональной задачи. Группы характеризуются однотипным соединением элементов в последовательные цепи и параллельные ветви. Группы элементов имеют единый вход и единый выход к элементам предыдущей и последующей групп. В отдельных случаях группа может состоять из одного элемента. Цель или ветвь теряют работоспособность при отказе любого из комплектующих элементов.

4. Графическая модель надежности СТС ГП преобразуется в математическую модель надежности путем аналитического описания отношений, выраженных в структурно-элементной схеме.

#### Модели надежности СТС ГП

Модель надежности СТС ГП, как и любая другая математическая модель, должна удовлетворять следующим требованиям: достаточно полно учитывать все факторы, существенно влияющие на надежность системы; быть достаточно простой, позволяющей без особых трудностей установить приемлемые для практики зависимости показателей надежности от параметров модели. В принципе модель надежности СТС ГП сводится к математическим моделям надежности оборудования, комплектующего систему, и характера взаимодействия между ним при его последовательном или параллельном соединении в группы, цепи или ветви. В свою очередь модели надежности групп, цепей и ветвей, в соответствии с существующими законами функционирования, по определенным формальным правилам объединяются в модели надежности подсистем, а затем системы в целом. Поэтому математическую модель надежности СТС ГП можно выразить через математические модели надежности следующих типовых структурных соединений технологических групп, цепей, ветвей и элементов: модель А - схема состоит из одной ветви последовательно соединенных элементов; модель В - схема состоит из двух параллельных ветвей или элементов, работающих в режиме нагруженного резерва; модель С - схема состоит из двух равнонадежных параллельных ветвей или элементов, работающих в режиме нагруженного резерва; модель D - схема содержит три параллельных ветви или элемента, работающих в режиме нагруженного резерва; модель E - схема содержит три равнонадежных параллельных ветви или элемента, работающих в режиме нагруженного резерва; модель F - соединение этого типа представляет собой  $m$  параллельно соединенных ветвей оборудования, причем для обеспечения нормального функ-



ционирования последования, последующих подсистем в работоспособном состоянии должно находиться ровно  $k$  ветвей схемы; модель  $R_2^k$  - соединение этого типа представляет собой  $m$  параллельно соединенных ветвей оборудования, причем для обеспечения нормального функционирования последующих подсистем в работоспособном состоянии должно находиться не менее  $k$  ветвей схемы.

Формальная запись математической модели надежности  $M$  (СТС ГП) через математические модели надежности типовых структур осуществляется с помощью следующих символов и условных обозначений:

1. Основными компонентами структурно-элементной схемы, используемыми для расчета надежности и формальной записи математической модели надежности  $M$  (СТС ГП), считаются группы, ветви и цепи технологических элементов.
2. Порядок расчета надежности СТС ГП на различных этапах определяется последовательностью записи операторов типовых моделей надежности групп, ветвей и цепей элементов.
3. Индексы операторов  $A - R_2$ , разделенные тире, определяют номер групп элементов, номера ветвей, номера элементов, к которым применяется данной оператор. Порядок отсчета групп элементов: слева - направо, ветвей - сверху - вниз.
4. Знак "-" разделяет номера ветвей, которые непосредственно участвуют в данном подэтапе расчета.
5. Знак ";" применяется для отдельного обозначения групп, ветвей и цепей, образованных в результате промежуточных расчетов.
6. Знак "." указывает на необходимость последовательного применения указанных операторов; знак "." может опускаться без изменения указанного порядка расчета.
7. Если какой-либо оператор применяется к нескольким группам, ветвям или цепям элементов схемы, то номера этих групп, ветвей, а также соответствующие им собственные операторы заключаются в скобки, а сам оператор записывается после закрытия скобок.
8. Запись "и" применяется в том случае, если параллельно включенные ветви элементов имеют различный режим нагружения в процессе функционирования или отличаются элементарным наполнением.

По данному методу построены математические модели надежности СТС фабрик окискования, эксплуатируемых в Криворожском железорудном бассейне и КМА. Ниже для примера приведена формальная запись математической модели надежности СТС фабрики окискования (2-я очередь) Северного горнообогатительного комбината:

$$M \text{ (СевГОК)} = A_{1,1,-5=1,2,1-5} C_{1,1-2,1-5};$$

$$A_{2,1,6-10=2,2,6-10} C_{2,1-2,6-10}; A_{3,1,11-12=3,2,11-12} C_{3,1-2,11-12};$$

$$((A_{4,1,13-18=...-4,12,13-18} R_2^2) \cdot A_{4-5,1,13-19=...-4-5,4,13-19}) \cdot$$

$$\begin{aligned}
 & C_{4-5,1-2,13-19=4-5,3-4,13-19}; A_{7,3-40}^D D_{7,1-3,39-40}; \\
 & (A_{9,1,41-42=9,2,41-42} C_{9,1-2,41-42} \text{ и } A_{9,3,43-44=9,4,43-44} \cdot \\
 & C_{9,3-4,43-44}) C_{9,1-4,41-44}; A_{10,1,45-47=10,2,45-47=10,2,45-47} \\
 & C_{10,1-2,45-47}; C_{11,1-2,48}; C_{12,1-2,49=12,3-4,49} C_{12,1-4,49}; \\
 & C_{13,1-2,50}; A_{14,1,51-52=14,2,51-52} C_{14,1-2,51-52}; A_{15,1,53-57= \\
 & =15,2,53-57} \cdot C_{15,1-2,53-57} A_{1-15,1,1-57}
 \end{aligned} \quad (1)$$

На основе моделей надежности СТС ГП, которые дают оценку технического состояния систем и характеризуют качество их функционирования, разработан метод расчета их производительности [6]. Часовая производительность СТС ГП  $\Pi_{04}(t)$  для момента времени  $t$  определяется по следующей формуле:

$$\Pi_{04}(t) = \Pi \sum_k^n k P_{ok}(t), \quad \text{т/ч}, \quad (2)$$

где

- $\Pi$  - производительность базового технологического элемента СТС ГП (например, для фабрики окускования базовым элементом является обжиговая конвейерная машина), т/ч;
- $P_{ok}(t)$  - вероятность  $k$ -го состояния технологической системы в момент времени  $t$ .

Производительность СТС ГП  $\Pi_0(t_0)$  на интервале времени  $t_0$  определяется по следующей формуле:

$$\Pi_0(t_0) = t_0 \sum_k^n k P_{ok}(t_0), \quad \text{т/ч}. \quad (3)$$

Разработаны программы для ЭВМ типа ЕС-1022 (машинный язык PL /1) для расчета надежности и производительности СТС ГП.

#### Выводы:

Применение математических моделей надежности СТС ГП, построенных по предлагаемой методике, позволяет сравнительно просто рассчитать надежность систем, а затем производить выбор их оптимального варианта. Модель надежности СТС ГП позволяет на ранних этапах проектирования аналитических оценивать свойства создаваемой системы, корректировать технические решения в процессе проектирования, определять целесообразность применения данной структуры СТС ГП. Научно обоснованная оценка надежности системы позволяет



устранить субъективизм качественной оценки надежности различных вариантов разрабатываемых схем. Внедрение в инженерную практику совершенных математических моделей надежности, основанных на широком использовании ЭВМ, обеспечивает выполнение расчетов наиболее эффективных структур СТС ГП. Исследование надежности СТС ГП с помощью математических моделей позволяет выявить фактические и потенциально "узкие" места систем с точки зрения обеспечения их надежности, определить слабые звенья и усилить их. Появляется возможность рационального распределения общей надежности СТС ГП по отдельным технологическим подсистемам, параллельным ветвям схемы и составным элементам. Математическая модель надежности СТС ГП служит основой для расчета исходных данных, необходимых для оценки их производительности, повышения технико-эксплуатационных показателей систем при их проектировании и эксплуатации.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рудь Ю.С.: Расчет производительности фабрик окускования горнообогатительных комбинатов на основе теории марковских процессов. - В кн.: Обогащение полезных ископаемых. Киев. Техника, 1975, вып. 17, с. 57-62.
- [2] Мак-Лоун Р.Р.: Математическое моделирование - искусство применения математики. - В кн.: Математическое моделирование. Под ред. Дж. Дж. Эндрикса, Р.Р. Мак-Лоуна. М., 1979, с. 9-20.
- [3] Нечипоренко Б.И.: Структурный анализ и методы построения надежных систем. - М.: Сов. радио, 1968. - 256 с.
- [4] Червоный А.А., Лукьяденко В.И., Котви Л.В.: Надежность сложных систем. - 2-е изд., переработ. и доп. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.
- [5] Рудь Ю.С.: Надежность и эффективность оборудования фабрик окускования. - М.: Недра, 1977, - 200 с.
- [6] Рудь Ю.С.: Оценка надежности систем технологического оборудования горнообогатительных комбинатов на стадии проектирования. Известия вузов. Горный журнал, 1983, 4, с. 86-90.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Jerzy ANTONIAK

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1987 r.

MATEMATYCZNE MODELE NIEZAWODNOŚCI I OBLICZANIE WYDAJNOŚCI  
ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNOLOGICZNYCH GÓRNICZYCH PRZEDSIĘBIORSTW  
PRZERÓBCZYCH

S t r e s z c z e n i e

W referacie, na przykładzie zakładu przerobczego, rozpatrzone są osobliwości matematycznego modelowania niezawodności złożonych technologicznych systemów górniczych wzbogacających przedsiębiorstw, stworzona jest metoda formalnego opisu tych modeli, zastosowanie których, zabezpiecza racjonalną organizację procedury zbudowania matematycznych modeli niezawodności rozpatrywanych systemów. Przy tym, matematyczny model niezawodności technologicznego systemu w całości określany jest kompleksem typowych matematycznych modeli niezawodności jej składników oznaczonych symbolami i zapisywanych wg określonego systemu zasad. Przytoczony jest matematyczny model niezawodności fabryk wzbogacających rud żelaznych. Opracowana jest metoda obliczenia wydajności, która bazuje na wskaźnikach niezawodności, dających ilościową ocenę parametrów funkcjonowania systemów.

MATHEMATICAL MODELS OF RELIABILITY AND COMPUTATIONS OF EFFICIENCY  
OF COMPLICATED TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF ENRICHMENT PLANTS

S u m m a r y

Distinctive features of mathematical modelling of reliability of complicated technological systems of enrichment plants are discussed on the basis of an example of an enrichment plant. A method of formal description of those models is presented. The use of those models secures rational organization of the procedure of building mathematical models of reliability of the discussed systems. At the same time a mathematical model of reliability of a technological system is determined by a complex of typical models, reliability of its components is determined by symbols and noted acc to a specific system of principles. A mathematical model of reliability of a ore enrichment plant is given. A method for computing efficiency is presented. The method is based on coefficients of reliability which give qualitative assessment of the functioning of systems.