

В.Л. Колесников, проф., д-р техн. наук;  
П.П. Урбанович, проф., д-р техн. наук;  
А.И. Бракович, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ДВИГАТЕЛИ РАЗМАЛЫВАЮЩИХ МАШИН ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

При современной организации производства на бумажных фабриках процесс размола осуществляется на последовательно-параллельно соединенных размалывающих машинах [1]. Причем удельные давления (нагрузки) на двигатели мельниц, как правило, устанавливаются «вслепую», руководствуясь опытом и интуицией. Поэтому существует возможность и предпосылки для снижения энергозатрат, если нагрузки не подбирать, а вычислять.

Основной характеристикой эффективного использования электроэнергии является коэффициент мощности, который для размалывающих мельниц в среднем составляет 0,8. В общем случае, доводя нагрузки до номинальных, паспортных характеристик каждой мельницы и уменьшая продолжительность размола (снижая реактивную составляющую), можно добиться повышения эффективности использования электроэнергии. Между оптимальными и реальными затратами электроэнергии на размол существует значительный интервал, который возможно сократить путем оптимизации условий проведения процесса. Если так управлять системой, чтобы достигалось заданное качество продукции при минимально возможных затратах энергии, то это ликвидирует перерасход электроэнергии и позволит перейти на более высокий уровень организации процесса. Результаты процесса размола характеризуются двумя крайними показателями – степенью измельчения волокон целлюлозы вдоль и поперек.

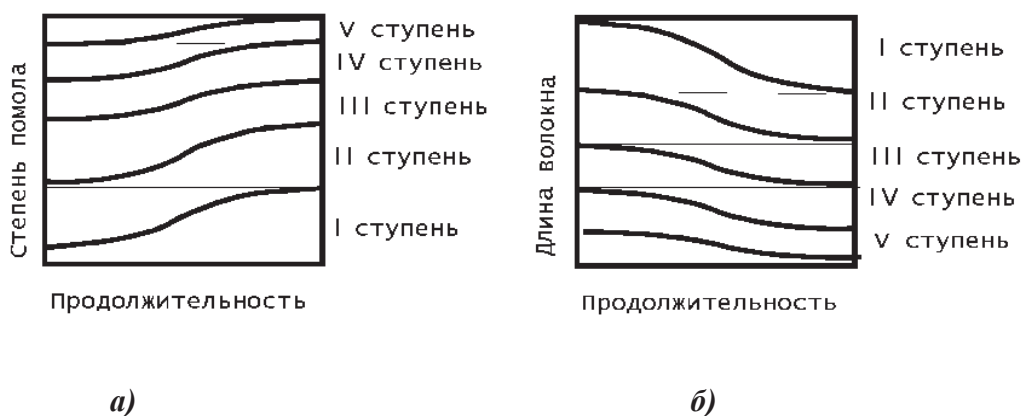
Чем выше степень помола длинных волокон, тем прочнее межволоконные связи в бумаге, но тем не равномернее по структуре бумажный лист. Из коротких волокон можно получить равномерный по структуре бумажный лист (с «молочным» просветом), но он не будет прочным. Поэтому для каждого вида бумаги должно существовать оптимальное соотношение между длиной волокна и степенью помола.

Энергетические затраты на размол целлюлозы с различными соотношениями степени помола и длины волокна, будут разными. К основным управляемым факторам относятся продолжительность и удельное давление при размоле. Концентрация массы является

вспомогательным управляющим фактором для регулирования процесса размола.

Известно, что изменение степени помола и длины волокна при размоле происходит по логистическим кривым [2]. Если бы размол осуществлялся в одну ступень, то продолжительность размола определялась временем, необходимым для достижения конечных результатов на данном размалывающем оборудовании. При последовательном соединении нескольких машин заданные показатели качества размолотой массы будут складываться из времени пребывания суспензии в зоне размола на каждой мельнице.

Таким образом, математическая модель процесса размола должна описывать такую ситуацию, когда начальные параметры для последующей машины равны конечным параметрам предыдущей. Для степени помола должна быть выбрана модель с подвижной нижней асимптотой  $G_{k,l}$  для длины волокна – с подвижной верхней асимптотой  $L_{k,l}$ . Характерный вид этих кривых представлен на рис. 1.



*а* - логистическая модель степени помола массы с подвижной нижней асимптотой;  
*б* - логистическая модель длины волокна с подвижной верхней асимптотой

**Рисунок 1 – Графические образы логистических моделей процесса размола на машинах непрерывного действия**

В эксперименте участвовали 5 факторов:  $x_1$  – нагрузка на двигатели;  $x_2 = G_{k,l}$  – степень помола, достигнутая на предыдущей мельнице;  $X_3 = L_{k,l}$  – длина волокна, достигнутая на предыдущей мельнице;  $x_4$  – концентрация массы при размоле;  $X_5$  – текущая пропускная способность одной мельницы. Значение  $X_5$  устанавливалось путем дросселирования массы на выходе. С помощью линеаризующих преобразующих соответствий получены математические модели:

$$z_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5); z_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5); \quad (1)$$

$$G_k = G_{k-1} + \frac{(As^{\text{верхн.}} - G_{k-1}) \cdot e^{z_1}}{1 + e^{z_1}}; \quad (2)$$

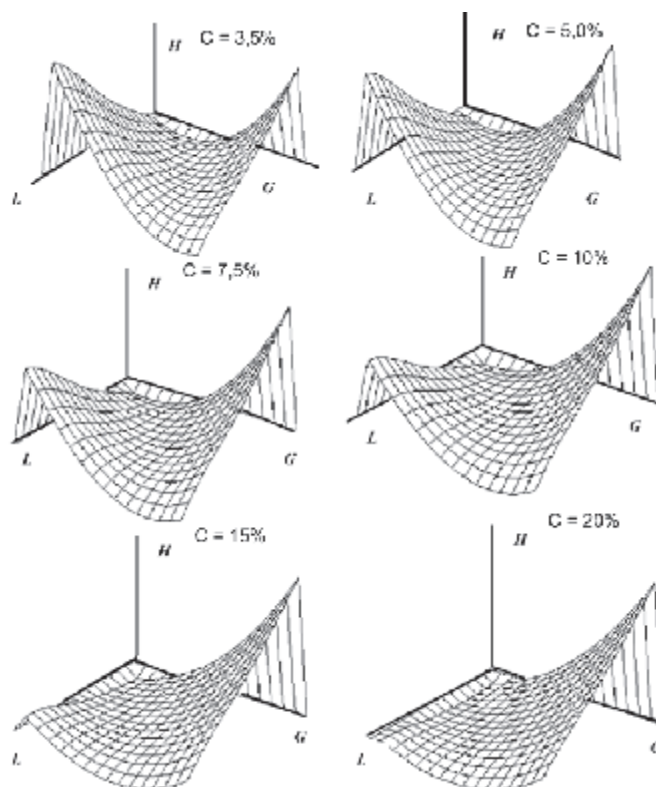
$$L_k = L_{k-1} + \frac{(L_{k-1} - As^{\text{нижн.}}) \cdot e^{z_2}}{1 + e^{z_2}}, \quad (3)$$

где  $k$  – номер мельницы;  $z_1$  – аппроксимирующая полиномиальная зависимость степени помола от исследуемых факторов;  $z_2$  – аппроксимирующая полиномиальная зависимость длины волокна от исследуемых факторов;  $As^{\text{верхн.}}$  – значение верхней асимптоты для степени помола;  $As^{\text{нижн.}}$  – значение нижней асимптоты для длины волокна.

Зависимость удельных расходов электроэнергии от управляющих переменных мало обсуждалась в специальной литературе, встречаются лишь данные об удельных расходах электроэнергии в зависимости от вида сырья (сульфатная целлюлоза беленая и небеленая, сульфитная целлюлоза, облагороженная и др.). Зависимости минимальных удельных расходов энергии для достижения бумажной массы, требуемых значений степени помола и длины волокна, не исследовались совсем.

Специфика настоящей работы заключается в том, что не только получены указанные логистические модели степени помола и длины волокна, но и методом Монте-Карло [2] решалась задача минимизации удельных расходов энергии для различных сочетаний значений степени помола и длины волокна. Трехмерные поверхности отклика (рис. 2) свидетельствуют о существовании области наименьших минимальных удельных расходов электроэнергии для различных видов бумаги, задаваемых характерными соотношениями длины волокна ( $L$ ) и степени помола ( $G$ ).

Минимальные удельные расходы энергии увеличиваются при получении волокнистой массы с длинными волокнами и высокой степенью помола. В этом случае затраты энергии идут в основном на расчесывание и продольное расщепление. При этих условиях достигается высокая прочность межволоконных связей, но имеется неоднородность структуры бумажного листа. Расход электроэнергии увеличивается в за счет увеличения продолжительности размола. Расход электроэнергии возрастает также при получении бумажного листа с однородным просветом. В этом случае преобладает процесс рубки волокон, и расход энергии возрастает за счет увеличения нагрузок на двигателя мельниц.



$H$  - удельный расход электроэнергии, кВтч/(т°Ш-Р);  $L$  - длина волокна (весовой показатель), мг;  $G$  - степень помола, °Ш-Р

**Рисунок 2 – Поверхности отклика минимальных удельных расходов электроэнергии при размоле одной тонны целлюлозы для различных видов бумаги на один градус Шоппер-Риглера и снижении весового показателя длины волокна на один дециграмм**

В разбавленных суспензиях преимущественно идет процесс рубки волокна, то затраты на получение волокнистой массы с короткими волокнами в разбавленных суспензиях меньше, чем затраты на получение волокон таких же размеров в суспензиях более концентрированных при одинаковой степени помола, т. е. область малых расходов электроэнергии с ростом концентрации смещается в область высоких значений степени помола и длины волокна.

Особенность настоящей работы также и в том, что при определении минимальных расходов энергии осуществлялась оптимизация распределения нагрузок на двигатели всех мельниц, объединенных в последовательно-параллельную батарею. Причем автоматически генерировались и оценивались тысячи вариантов сочетаний нагрузок в пределах области факторного пространства, а также автоматически добавлялись мельницы, как при последовательном, так и параллельном их включении с определением необходимого количества параллельных цепочек на каждой стадии. Кроме того, оценка вариантов

распределения нагрузок осуществлялась с учетом различных концентраций массы при размоле и производительности размольно-подготовительного отдела. В результате определялось число мельниц, степень дросселирования массы на выходе, число ступеней размола с разной концентрацией, а также количество линий параллельно включенных батарей, обеспечивающих заданные значения производительности отдела, степени помола и длины волокна, минимизирующих расход энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черная, Н. В., Технология производства бумаги и картона: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Химическая технология переработки древесины» / Н.В. Черная, В.Л. Колесников, Н.В. Жолнерович. Минск : БГТУ, 2013. Колесников, В. Л. Системный анализ производственных процессов в полиграфии / В. Л. Колесников. Минск : БГТУ, 2011.

УДК 681.5

С.И. Немирович, студент; А.Г. Сеньков, доц., канд.техн.наук.,  
(БГАТУ, г. Минск)

### **КОМПЬЮТЕРНАЯ НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА В САР С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Современные программные пакеты для численного моделирования динамических систем предоставляют инженерам весьма широкие возможности для решения задач синтеза систем автоматического управления. В данной работе на примере системы автоматического регулирования температуры в помещении показана возможность использования пакета компьютерного моделирования Simulink для решения задачи синтеза системы автоматического регулирования (САР) с комбинированным управлением [1].

В качестве объекта регулирования использовался лабораторный учебный сушильный шкаф «ШСУ», имеющий объем сушильной камеры 10 л. Управляемой величиной являлась температура внутри шкафа  $\theta$  [°C]. Управляющее воздействие на объект – изменение мощности электронагревателя  $P$ , [Вт]. Основное возмущающее воздействие – изменение наружной температуры  $\theta_{ext}$ , [°C].

Передаточные функции объекта по управляющему и возмущающему воздействиям приближенно представлялись апериодическим звеном 1-го порядка [2, 3]: