

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ТЕКСТИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К.А. ПОЛЯКОВ, А.Е. ПОЛЯКОВ, А.С. МИЛЮКОВА, Е.А. ШЕВНИНА

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина,  
Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца)

Различным скоростным режимам текстильного оборудования соответствуют определенные производительности, расходы электроэнергии, качественные показатели продукции, коэффициенты выхода продукции (или количество оборотов), причем эти зависимости носят нелинейный характер и могут существенно изменяться при переходе от одного режима на другой, что приводит к изменению (иногда скачкообразному) основных показателей работы предприятия, таких как прибыль, себестоимость продукции, расход энергоресурсов [1].

В качестве критерия оптимальности решаемой задачи целесообразно выбирать при одних и тех же условиях и ограничениях либо минимальный расход энергоресурсов на технологические нужды, либо минимум себестоимости продукции, либо максимум прибыли на единицу выпускаемой продукции.

Общая постановка задачи оптимизации определяется так: при заданной (или изменяющейся) производственной программе

выпуска продукции на промышленном предприятии необходимо определить такие значения скоростей рабочих органов машин и времени работы каждой группы оборудования, при которых выполняется ряд ограничений на количество выпускаемой продукции, на ресурс потребляемой электроэнергии, на ресурс времени работы каждого вида машин, на качественные показатели выпускаемой продукции (полуфабрикатов по переходам), на нижние и верхние допустимые значения скоростей рабочих органов машин и т.д., при этом достигается экстремум одного из критериев оптимальности поставленной задачи.

Задачу целесообразно решать, последовательно рассматривая технологические цепочки оборудования по производствам.

С точки зрения потребления электроэнергии на предприятиях текстильной промышленности наиболее энергоемкими являются прядильные производства, для которых математическое описание поставленной задачи имеет вид:

$$P_{ij} = P_{ij}(v_{ij}, \gamma), \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (1)$$

$$PR_{ij} = PR_{ij}(v_{ij}, \gamma), \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (2)$$

$$K_{ij} = K_{ij}(v_{ij}, \gamma), \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (3)$$

$$\ell_{ij} = \ell_{ij}(v_{ij}, \gamma), \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (4)$$

$$P_{ij} N_{ij} = PE_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (5)$$

$$PR_{ij} N_{ij} = M_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (6)$$

$$\alpha_{ij} + \ell_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j; \quad (7)$$

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^{m_j} \alpha_{ij}/m_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{m_j} M_{ij} = M_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

$$M_0 = M(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{n-1} + \alpha_n + 1); \quad (10)$$

.....

$$M_{n-1} = M(\alpha_n + 1); \quad (11)$$

$$M_n = M; \quad (12)$$

$$KO_j = M_{j-1} - M_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} PE_{ij} = SRE; \quad (14)$$

$$YDRE = (TR/M)SRE; \quad (15)$$

$$YDCO = 1/M \sum_{j=1}^n CO_j KO_j; \quad (16)$$

$$M YDC = C_0 M_0 + M YDRE + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} S_{ij} N_{ij} + F; \quad (17)$$

$$YDPB = CT + YDCO - YDC; \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{ij} \leq v_{ij} \leq \overline{v_{ij}}; \quad K_{ij} \leq K_{ij} \leq \overline{K_{ij}}; \quad 0 \leq SRE \leq LE; \\ P_{ij} \geq 0; \quad PR_{ij} \geq 0; \quad 0 \leq N_{ij} \leq \overline{N_{ij}}; \quad PE_{ij} > 0; \quad M_{ij} \geq 0; \\ M_j \geq 0; \quad \alpha_j \geq 0; \quad \ell_{ij} \geq 0; \quad \alpha_j \geq 0; \quad KO_j \geq 0; \\ YDRE \geq 0; YDCO \geq 0; \quad YDC \geq 0; YDPB \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m_j \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

при использовании в качестве целевой функции

$$F_1 = \min_{v_{ij} \in v} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} SRE_{ij} N_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} Q_{ij} v_{ij} N_{ij}; \quad (20)$$

$$F_2 = \min_{v_{ij} \in v} YDC; \quad (21)$$

$$F_3 = \max_{v_{ij} \in v} YDPB, \quad (22)$$

где  $\gamma$  – вектор конструктивных параметров оборудования и обрабатываемого материала;  $j$  – номер этапа переработки или группы машин, занимающей в технологической цепочке  $j$ -е место;  $j=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  обозначает число этапов переработки сырья, кроме того,  $n$  обозначает номер последнего этапа переработки сырья;  $i$  – номер машины в  $j$ -м этапе переработки сырья;  $i=1, 2, \dots, m_j$ , где  $m_j$  – число машин в  $j$ -м этапе переработки сырья;  $k$  – индексы переменных, которые появляются при кусочно-линейной аппроксимации нелинейных ограничений модели;  $v_{ij}$  – скорость основного рабочего органа  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки сырья;  $P_{ij}$  – потребляемая мощность  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки (кВт);  $PR_{ij}$  – производительность  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки;  $K_{ij}$  – качественный показатель процесса переработки на  $i$ -й машине в  $j$ -м этапе переработки;  $M_{ij}$  – количество продукции, выпуска-

каемой за единицу времени (1 год)  $i$ -й машиной в  $j$ -м этапе переработки;  $N_{ij}$  – время работы  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки за рассматриваемую единицу времени (год);  $PE_{ij}$  – потребляемая  $i$ -й машиной в  $j$ -м этапе электроэнергия за единицу времени (год);  $\ell_{ij}$  – коэффициент выхода продукции на  $i$ -й машине в  $j$ -м этапе переработки;  $\alpha_j$  – коэффициент выхода оборотов на  $i$ -й машине в  $j$ -м этапе переработки;  $M_j$  – количество продукции, выпускаемой всеми машинами после  $j$ -го этапа переработки ( $j=0, 1, 2, \dots, n$ ) за единицу времени (год), где  $M_0$  – количество сырья;  $\alpha_j$  – среднеарифметический коэффициент выхода оборотов всех машин в  $j$ -м этапе переработки;  $KO_j$  – количество оборотов после  $j$ -го этапа переработки;  $SRE$  – суммарный расход электроэнергии всеми машинами за год (кВт·ч);  $YDRE$  – удельный расход электроэнергии в рублях на 1 тонну конечной продукции;  $YDCO$  – удельная стоимость оборотов в рублях на 1 тонну конечной продукции;  $YDC$  – удельная себестоимость в рублях 1 тонны конечной продукции;  $YDPB$  – удельная прибыль в рублях на 1 тонну конечной продукции;  $P_{ij} = P_{ij}(v_{ij})$ , ( $i=1, 2, \dots, m_j$ ;  $j=1, 2, \dots, n$ ) – заданная функциональная зависимость потребляемой мощности от скорости основного рабочего органа для  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе

переработки;  $\underline{v}_{ij}$ ,  $\bar{v}_{ij}$  – нижняя и верхняя границы изменения скорости основного (рабочего) органа  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки;  $\underline{K}_{ij}$ ,  $\bar{K}_{ij}$  – нижняя и верхняя границы изменения показателя качества рабочего процесса  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки;  $M$  – заданный выпуск конечной продукции;  $TR$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;  $C_0$  – стоимость 1 тонны сырья;  $C_{0j}$  – стоимость 1 тонны оборотов после  $j$ -го этапа переработки;  $S_{ij}$  – расходы на 1 час работы  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки;  $F$  – условно-постоянные общецеховые и общезаводские расходы;  $CT$  – фабрично-заводская цена, по которой покупается 1 тонна конечной продукции;  $LE$  – лимит на потребляемую электроэнергию;  $\bar{N}_{ij}$  – верхнее ограничение на время работы  $i$ -й машины в  $j$ -м этапе переработки.

С помощью математической модели (1)...(22) поставим следующую задачу математического программирования: требуется определить искомые переменные  $v_{ij}$ ,  $K_{ij}$ ,  $P_{ij}$ ,  $PR_{ij}$ ,  $N_{ij}$ ,  $RE_{ij}$ ,  $M_{ij}$ ,  $M_j$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\ell_{ij}$ ,  $\alpha_j$ ,  $KO_j$ ,  $SRE$ ,  $YDRE$ ,  $YDCO$ ,  $YDC$ ,  $YDPB$  ( $j=1,2,\dots,n$ ,  $i=1,2,\dots,m_j$ ), которые удовлетворяют условиям (1)...(19) и придают минимальное значение целевой функции (20), или минимальное значение – (21), или максимальное значение (22).

Задача (1)...(19) является задачей нелинейного программирования ввиду того, что ограничения (1), (5) и (6) являются нелинейными.

Для решения поставленной задачи использован симплексный метод, который реализуется в задачах линейного программирования при безмодельном поиске оптимума на объекте, и при поиске оптимума на нелинейной модели. Этим методом решаются и нелинейные задачи, допускающие линеаризацию.

При решении задачи оптимизации скоростных режимов использован метод нахождения локального экстремума при помощи сведения решения к задаче сепарабельного программирования и линеаризации этой задачи при помощи  $\delta$ -метода и метода касательных. Целевые функции (20), (21), (22) и все ограничения, кроме (5)

и (6), имеют линейный вид. Нелинейные ограничения (5) и (6) сведем к сепарабельному виду при помощи логарифмирования. В итоге решение задачи сводится к последовательному решению нескольких задач линейного программирования [2].

В качестве примера определения оптимальных скоростных режимов выбрано технологическое оборудование аппаратно-прядельного производства текстильной фирмы "Купавна". Используя метод параметрического эквивалентирования [3], были взяты три группы машин, широко распространенные среди оборудования, применяемого при трепании, чесании и формировании волокнистого продукта: трепальные машины ТП-90Ш, чесальные аппараты CR-24 Бефама и прядельные машины П-114Ш, причем все три группы машин условно связаны в одну неразрывную и разветвленную цепочку, состоящую из трех машин ТП-90Ш, 20 машин CR-24, 31-й машины П-114Ш.

Проведенные расчеты по критерию оптимальности – минимальное потребление электроэнергии для обеспечения выпуска заданного количества продукции показали, что зависимость удельного расхода электроэнергии от скорости выпуска продукции группой машин рассматриваемой технологической цепочки носит нелинейный характер, близкий к параболическому, с явно выраженным экстремумом, соответствующим минимальному удельному расходу электроэнергии, равному 322,72 кВт·ч/т, при значениях скоростей выпуска трепальных машин 8 м/мин, чесальных машин – 19 м/мин, частоты вращения веретен прядельных машин 5000 мин<sup>-1</sup>.

Фактический режим работы оборудования в промышленных условиях, принятый за базовый, с соответствующими скоростями выпуска трепальных машин 6,5 м/мин, чесальных – 17,5 м/мин, частоты вращения прядельных веретен 3000 мин<sup>-1</sup>, является наихудшим как с точки зрения потребления электроэнергии ( $P_{уд}=372,65$  кВт·ч/т), так и по времени работы единицы оборудования в году, которое колеблется по группам машин от 4000 до 6500 ч в год, что сказывается на ритмичности работы предприятия в целом.

Этот недостаток может быть устранен как за счет выбора наилучших скоростных режимов работы оборудования, так и за счет обоснованного изменения количества единиц оборудования.

Анализ полученных результатов показывает, что при незначительном увеличении скоростей выпуска трепальных машин с 6,5 до 8 м/мин и частоты вращения веретен прядильных машин с 3000 до 3500 мин<sup>-1</sup> заданный выпуск продукции достигается с меньшими затратами электроэнергии ( $P_{уд}=345,31$  кВт·ч/т), а с учетом снижения колебания времени работы единиц оборудования различных групп от 4000 до 5300ч в год и роста производительности трепальных машин с 0,1598 до 0,1967 т/ч, прядильных – с 0,015 до 0,0175 т/ч при неизменной производительности чесальных машин прибыль предприятия составит 2,4 млн. руб. в год по сравнению с базовым режимом работы оборудования.

Режим работы, связанный с увеличением скоростей выпуска чесальных машин с 17,5 до 19 м/мин, прядильных с 3500 до 5000 мин<sup>-1</sup>, при скорости трепальной машины 8 м/мин соответствует экстремальной точке рассматриваемого функционала, за счет чего достигается минимальное потребление электроэнергии и повышение производительности трепальных машин с 0,1598 до 0,1967 т/ч, чесальных – с 0,0299 до 0,0313 т/ч, прядильных – с 0,015 до 0,025 т/ч.

Дальнейшее увеличение скоростей выпуска трепальных машин до 9,76 м/мин, чесальных – до 22 м/мин, прядильных – до 6000 мин<sup>-1</sup> приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии до  $P_{уд}=341,96$  кВт·ч/т (по сравнению с наименьшим  $P_{уд}=322,72$  кВт·ч/т) и ухудшению качества продукции вследствие роста обрывности на прядильных машинах.

Проведенные исследования указывают на резерв экономии электроэнергии, равный 49,93 кВт·ч/т, что при годовом выпуске продукции 2842 т составит 141900 кВт·ч.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод анализа и расчета оптимальных энергосберегающих режимов работы технологического оборудования с применением экспериментально полученных энергетических и технологических характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сапронов М.И., Поляков А.Е., Белозерова О.И. / Текстильная промышленность. – 1987, №2.
2. Макаров И.М. Теория выбора и принятия решений. – М.: Наука, 1982.
3. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.:Наука, 1981.

Рекомендована кафедрой электротехники МГТУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 26.11.04.