

# Математическое моделирование процесса управления электропотреблением крупного железнодорожного узла

С.Б.Мухамбетов (к.т.н., доц., ПФ МИИТ)

Управление электропотреблением объектов тяговой и нетяговой энергетики является одним из путей повышения энергетической эффективности на железнодорожном транспорте. В статье приведена методика управления электропотреблением крупного железнодорожного узла путем изменения режима работы нетяговых потребителей электроэнергии.

Экспериментальные исследования методов прогнозирования и алгоритмов выбора электроприемников потребителей-регуляторов позволили выбрать соответствующие методы, которые дают минимальную погрешность в эксплуатационных условиях. Т.е. на верхнем уровне контура управления режимом электропотребления учитываются требования по учету электроэнергии, а на нижнем - реальные характеристики потребителей – регуляторов.

Целью математического моделирования процессов прогнозирования и оценки ущерба является установление ограничений по электропотреблению для выбранных потребителей – регуляторов.

В качестве потребителей-регуляторов были выбраны вагоноремонтное депо дирекции по обслуживанию пассажиров (ВРД-15) и ремонтное локомотивное депо ст. Саратов 2 (ТЧр-16). Для выполнения необходимых расчетов, было проведено энергетическое обследование данных предприятий.

Система электроснабжения ВРД-15, находясь в рабочем состоянии, потребляет значительное количество электроэнергии.

В таблице 1 представлен анализ отклонения фактического расхода от планового в 2015 году. Из таблицы видно, что превышение фактического расхода над планируемым расходом в 2015 году не наблюдается. Самое большое отклонение фактического расхода от планируемого было в июне и составило - 33 %.

В целом, из таблицы видно, что потребление электроэнергии носит в основном выраженный сезонный характер: в зимний период потребление электроэнергии возрастает по сравнению с летним периодом.

Таблица 1

## Анализ расхода электроэнергии по ВРД - 15 за 2015 год

Период	Производственный расход за 2015 год, (тыс. кВт час)		Отклонение фактического расхода от планового, (%)
	Плановый	Фактический	
январь	903	732,93	- 19
февраль	770	725,21	- 6
март	664	614,74	- 7,5
апрель	550	490,3	- 11
май	500	431	- 14
июнь	500	334,82	- 33
июль	364	385,91	6
август	417	362,87	- 13
сентябрь	450	429,74	- 4,5
октябрь	585	545,35	- 7
ноябрь	660	632,9	- 4
декабрь	650	640,04	- 1,5
Итого:	7013	6325,81	- 10

В итоге в 2015 году суммарный фактический расход электроэнергии составил 6325,81 тыс. кВт×ч, а планируемый расход электроэнергии – 7013 тыс. кВт×ч, превышение планируемого расхода над фактическим по ВРД -15 составило –687,19 тыс. кВт×ч (10 %).

Суммарная установленная мощность электрооборудования ВРД-15 составляет 5636,36 кВт.

Аналогичным образом был проведен анализ электропотребления ТЧр-16. Отмечено, что превышение фактического расхода над планируемым расходом в 2015 году не наблюдается. Самое большое отклонение фактического расхода от планируемого было в сентябре и составило 24,3 %. Потребление электроэнергии на предприятии, как и на ВРД-15, носит в основном выраженный сезонный характер: в зимний период потребление электроэнергии возрастает по сравнению с летним периодом.

В итоге в 2015 году суммарный фактический расход электроэнергии составил 4130,231 тыс. кВт×ч, а планируемый расход электроэнергии – 4501,56 тыс. кВт×ч, превышение планируемого расхода над фактическим по ВРД -15 составило –371,329 тыс. кВт×ч (8,25 %).

Доля ВРД-15 в суммарном электропотреблении Саратовского узла составляет, в среднем, около 10,54 % в месяц.

ОАО «Саратовэнерго» питает 3 тяговые подстанции с суммарным электропотреблением около 15 млн.кВт\*ч в месяц.

Поэтому, в суммарном электропотреблении всех тяговых подстанций, доля ВРД-15 в среднем составит 3,5 % .

Для ТЧр-16 эти параметры составят 6,89% и 2,3% соответственно.

Рассмотрим случай, когда вырос объем перевозок, и выросло электропотребление всего узла, т.е. возникла угроза перерасхода электроэнергии.

Для расчета ограничений по электропотреблению представим исходные данные в табличном виде (табл. 2,3.), обозначив  $p_1, p_2, p_3^*, p_4^*$  -минимальные и максимальные мощности оборудования в рабочее и нерабочее время.

Таблица 2

Параметры потребителей-регуляторов

ПР	Р <sub>уст.</sub> , кВт	Электропотр. кВт ч		Р <sub>1</sub> , кВт	Р <sub>2</sub> , кВт	Р <sub>3</sub> <sup>*</sup> , кВт	Р <sub>4</sub> <sup>*</sup> , кВт	Ущерб, руб/ч	Раб. время, ч	Нераб. время, ч
		На 20 день	План							
ВРД-15	5636,36	488 620	907 000	1127,27	4509,09	281,81	1127,27	25750	56	184
ТЧр-16	4453,2	312 015	478 940	1169	3563,01	179,7	1169	28612	56	184

Таблица 3

Параметры электропотребления Саратовского узла

Месяц	Электропотр. за 20 суток, кВт*ч	Электропотребление на тягу поездов+остальные потребители (на 20 сутки)	По договору	По договору тяга+сторонние	Прогноз, кВт*ч	Прогноз, тяга+остальные потребители	DW, кВт*ч	DW, %	Тариф, руб./кВт*ч	Штр Р
январь	3636773,3	2836138,3	4 901 182	3515242	5 455 160	4254207,5	553 978	11, 3	2,36	5115

Для решения поставленной задачи воспользуемся алгоритмом математического моделирования процессов прогнозирования и оценки ущерба [1].

На рис. 1 изображено графическое представление методики расчета.

$W_{j,T} = IC \cdot KBT^{*k}$  ▲

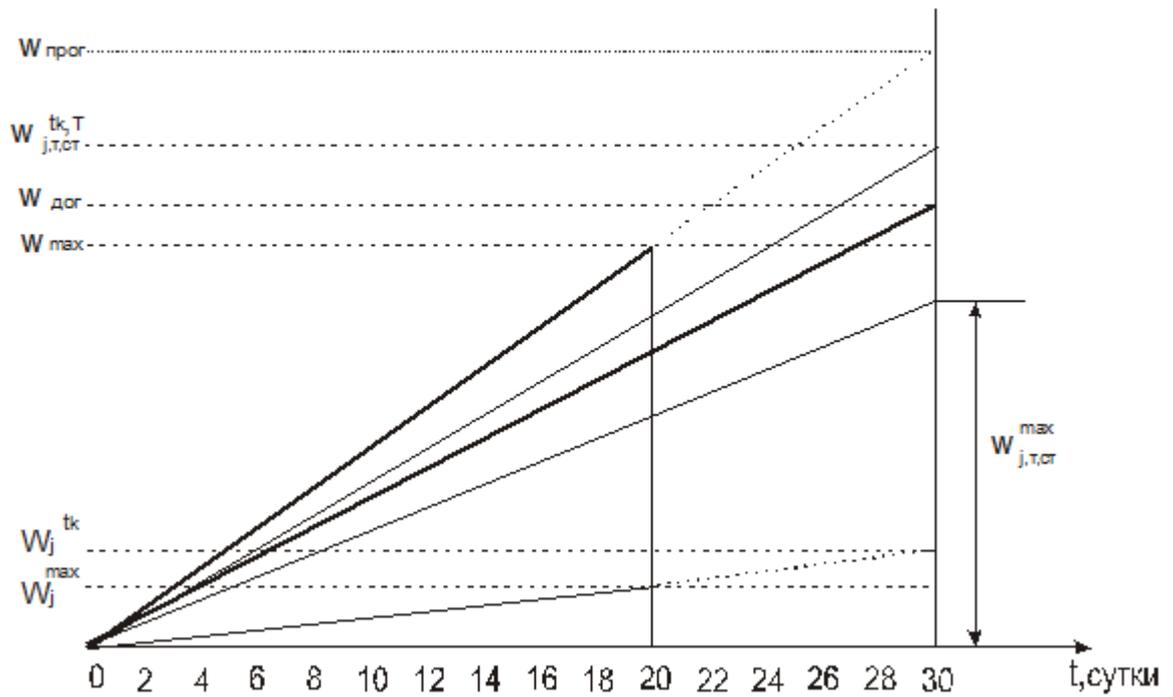


Рис. 1 Графическое представление методики расчета

Для фиксированных номеров  $j = \overline{1, n}$  и  $k = \overline{k_0, N-1}$  решается оптимизационная задача:

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, x_2) &:= Kay(x_1) + \alpha(ax_1 + bx_2 - c)_+ + \beta(d - ax_1 - bx_2)_+ \rightarrow \min, \\ (1 - K)p_1 &\leq x_1 \leq p_2, \\ p_3^* &\leq x_2 \leq p_4^*, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} K &= K_j^{tk}, \quad x_1 = A_j^{tk}, \quad x_2 = B_j^{tk}, \\ a &= \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l} (\tau_{ls} - t_{ls}), \quad b = \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l-1} (t_{ls+1} - \tau_{ls}), \\ c &= (1 + \gamma)W_{j,T,CT}^{\max} + (1 + \gamma)W_j^{\max} - W_{j,T,CT}^{tk,T} - W_j^{tk}, \\ d &= (1 - \gamma)W_{j,T,CT}^{\max} + (1 - \gamma)W_j^{\max} - W_{j,T,CT}^{tk,T} - W_j^{tk}, \\ p_1 &= p_j^{\min}, \quad p_2 = p_j^{\max}, \quad p_3^* = p_{j,HP}^{\min}, \quad p_4^* = p_{j,HP}^{\max}, \quad \eta = y_j^{\max}, \\ y(x_1) &:= \begin{cases} \eta \left( 1 - \frac{x_1}{p_1} \right), & \text{если } 0 \leq x_1 \leq p_2, \\ 0, & \text{если } x_1 > p_2, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $\eta$  - коэффициент ущерба.

$$c < d, \quad 0 < p_1 < p_2.$$

Причем всегда имеют место неравенства

Произведем необходимые расчеты для  $t_k=20$ ,  $T=30$  суток:

$$\delta_1 = \frac{W_1^{20}}{W_1^{20} + W_2^{20}} = 488\,620 / 800\,635 = 0,61$$

$$\delta_2 = \frac{W_2^{20}}{W_1^{20} + W_2^{20}} = 312\,015 / 800\,635 = 0,39$$

$$W_{1,T,CT}^{\max} = \delta_1 \cdot W_{T,CT}^{\max} = 0,61 \cdot 3700229,5 = 2258215,2 \text{ кВт*ч}$$

$$W_{2,T,CT}^{\max} = \delta_2 \cdot W_{T,CT}^{\max} = 0,39 \cdot 3700229,5 = 1442014,3 \text{ кВт*ч}$$

Рассчитаем величину C:

$\gamma$	$W_{j,T,CT}^{\max}$	$W_j^{\max}$	$W_{j,T,CT}^{t_k,T}$	$W_j^{t_k}$	C
0,05	865 434,257	1385940	4254207,5	800635	-954635

Рассчитаем величину d:

$\gamma$	$W_{j,T,CT}^{\max}$	$W_j^{\max}$	$W_{j,T,CT}^{t_k,T}$	$W_j^{t_k}$	d
0,05	865 434,257	1385940	4254207,5	800 635	-1114472

Для ВРД-15:

$$\frac{p_4^* - p_3^*}{p_2 - p_1} = \frac{1127,27 - 281,81}{4509,09 - 1127,27} = \frac{845,46}{3381,82} = 0,25$$

$$\frac{a}{b} = 56/184 = 0,3$$

$$\xi_1 = ap_1 + bp_3^* = 56 \cdot 1127,27 + 184 \cdot 281,81 = 114\,980,16$$

$$\xi_2 = ap_1 + bp_4^* = 56 \cdot 1127,27 + 184 \cdot 1127,27 = 270\,544,8$$

$$\xi_3 = ap_2 + bp_3^* = 56 \cdot 4509,09 + 184 \cdot 281,81 = 304\,362,08$$

$$\xi_4 = ap_2 + bp_4^* = 56 \cdot 4509,09 + 184 \cdot 1127,27 = 459\,972,08$$

Решением задачи будет:

$$\text{Если } ap_1 + bp_3^* \geq c, \text{ то } (x_1^*, x_2^*) = (p_1, p_3^*).$$

$$x_1^* = 1227,27 \text{ кВт}$$

$$x_2^* = 281,81 \text{ кВт}$$

Т.е. для минимизации ущерба железной дороги необходимо поддерживать мощность электроприемников ВРД-15:

1. В рабочее время (56 часов) – 1227,27 кВт
2. В нерабочее время (184 часа)- 281,81 кВт

Для ТЧр-16:

Рассчитаем величину С:

$\gamma$	$W_{j,г.ст}^{\max}$	$W_j^{\max}$	$W_{j,г.ст}^{t_k, T}$	$W_j^{t_k}$	С
0,05	552634,9098	1385940	4254207,5	800635	-611269

Рассчитаем величину d:

$\gamma$	$W_{j,г.ст}^{\max}$	$W_j^{\max}$	$W_{j,г.ст}^{t_k, T}$	$W_j^{t_k}$	d
0,05	552634,9098	1385940	4254207,5	800 635	-713335

$$\frac{p_4^* - p_3^*}{p_2 - p_1} = \frac{1169 - 179,7}{3563,01 - 1169} = 0,41$$

$$\frac{a}{b} = 56/184 = 0,3$$

$$\xi_1 = ap_1 + bp_3^* = 56 \cdot 1169 + 184 \cdot 179,7 = 98\ 528,8$$

$$\xi_2 = ap_1 + bp_4^* = 56 \cdot 1169 + 184 \cdot 1169 = 280\ 560$$

$$\xi_3 = ap_2 + bp_3^* = 56 \cdot 3563,01 + 184 \cdot 179,7 = 232\ 593,36$$

$$\xi_4 = ap_2 + bp_4^* = 56 \cdot 3563,01 + 184 \cdot 1169 = 414\ 624,56$$

Решением задачи будет:

Если  $ap_1 + bp_3^* \geq c$ , то  $(x_1^*, x_2^*) = (p_1, p_3^*)$ .

$$x_1^* = 1163 \text{ кВт}$$

$$x_2^* = 179,7 \text{ кВт}$$

Т.е. для минимизации ущерба железной дороги необходимо поддерживать мощность электроприемников ТЧР-16:

1. В рабочее время (56 часов) – 1163 кВт
2. В нерабочее время (184 часа)- 179,7 кВт

При использовании дополнительных потребителей-регуляторов подобного типа, величина

---

регулирования электропотребления возрастает. Число потребителей - регуляторов увеличивается в крупных железнодорожных узлах.

Таким образом, электропотребление ВЧД-15, ТЧР-16 за тридцать суток месяца составит:

$$W_{1,2}^{30} = W_{1,2}^{20} + W_{1,2}^{10} = 800635 + 218772,96 = 1019408 \text{ кВт*ч}$$

$$W_{\text{млрд.сч}}^{10} = W_{\text{дог., млрд.сч}} - W_{\text{млрд.сч}}^{20} = 3515242 - 2836138,333 = 679103,6667 \text{ кВт*ч}$$

$$\Delta W = W_{\text{дог}} - W_{1,2}^{20} - W_{1,2}^{10} - W_{\text{млрд.сч}}^{20} - W_{\text{млрд.сч}}^{10} = 251264 \text{ кВт*ч}$$

После проведения управляющих воздействий глубина снижения электропотребления по сравнению с договорным составит 5,12%.

#### Литература

1. Мухамбетов С.Б., Рылов В.С. Алгоритм оптимизации электропотребления объектами железнодорожного транспорта/ Интеллектуальный потенциал высшей школы – железнодорожному транспорту/Межвузовский Сб. науч. статей, Саратов 2006.