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	$P_{уст}$, кВт	Электропотр. кВт ч		p_1, кВт	p_2, кВт	p_3^*, кВт	p_4^*, 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	Электропо-требление 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 Ру
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.

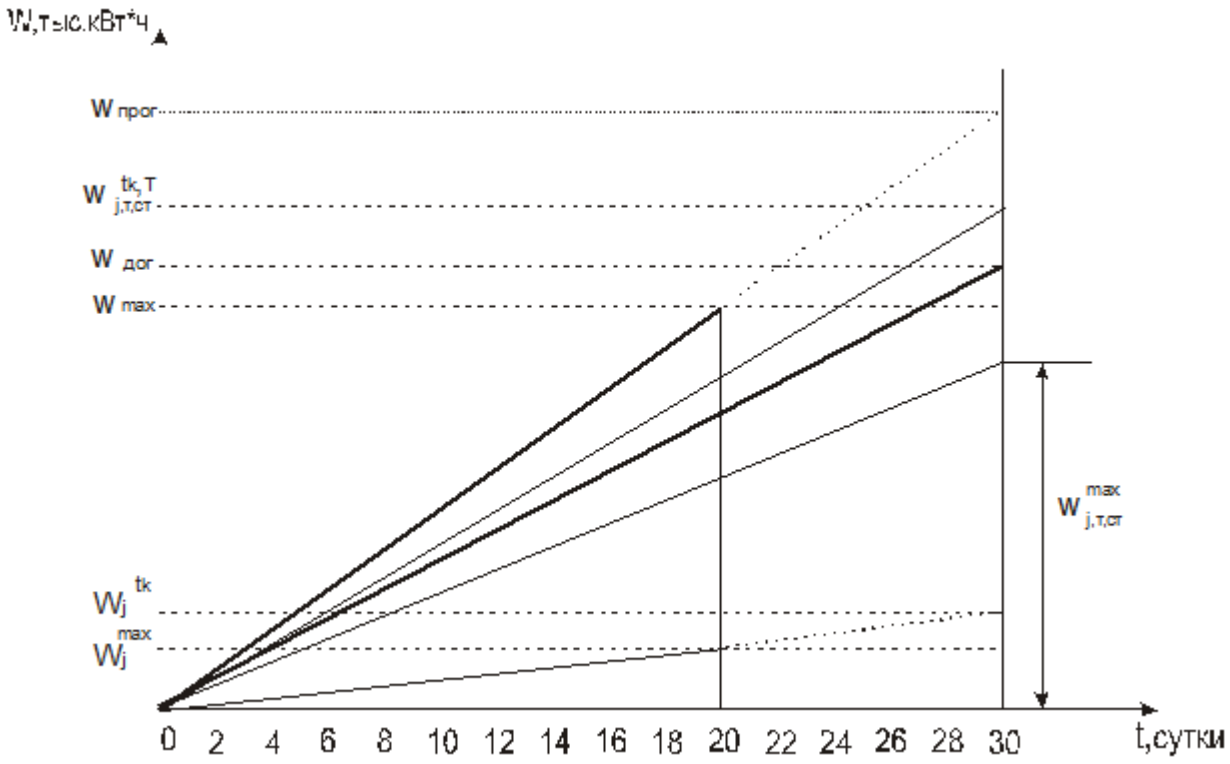


Рис. 1 Графическое представление методики расчета

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

$$\varphi(x_1,x_2) := Kay(x_1) + \alpha(ax_1 + bx_2 - c)_+ + \beta(d - ax_1 - bx_2)_+ \to \min,$$

$$(1-K)p_1 \le x_1 \le p_2,$$

$$p_3^* \le x_2 \le p_4^*,$$

где

$$K = K_j^{t_k}, \quad x_1 = A_j^{t_k}, \quad x_2 = B_j^{t_k},$$

$$a = \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l} (\tau_{ls} - t_{ls}), \quad b = \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l - 1} (t_{ls+1} - \tau_{ls}),$$

$$c = (1+\gamma)W_{j,\text{т,ст}}^{\max} + (1+\gamma)W_j^{\max} - W_{j,\text{т,ст}}^{t_k,T} - W_j^{t_k},$$

$$d = (1-\gamma)W_{j,\text{т,ст}}^{\max} + (1-\gamma)W_j^{\max} - W_{j,\text{т,ст}}^{t_k,T} - W_j^{t_k},$$

$$p_1 = p_j^{\min}, \; p_2 = p_j^{\max}, \; p_3^* = p_{j,\text{нр}}^{\min}, \; p_4^* = p_{j,\text{нр}}^{\max}, \; \eta = y_j^{\max},$$

$$y(x_1) := \begin{cases} \eta\left(1 - \dfrac{x_1}{p_1}\right), & \text{если } 0 \le x_1 \le p_2, \\ 0, & \text{если } x_1 > p_2, \end{cases}$$

где η - коэффициент ущерба.

Причем всегда имеют место неравенства $c < d, \ 0 < p_1 < p_2.$

Произведем необходимые расчеты для t_k=20, Т=30 суток:

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

$$\delta_2 = \frac{W_2^{20}}{W_1^{20} + W_2^{20}} = 312\ 015/800635 = 0{,}39$$

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

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

Рассчитаем величину С:

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

Рассчитаем величину d:

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

Для ВРД-15:

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

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

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

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

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

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

Решением задачи будет:

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

x_1^* = 1227,27 кВт

$x_2^* = 281,81$ 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:

γ	$W_{j,T,CT}^{max}$	W_j^{max}	$W_{j,T,CT}^{t_k,T}$	$W_j^{t_k}$	C
0,05	552634,9098	1385940	4254207,5	800635	-611269

Рассчитаем величину d:

γ	$W_{j,T,CT}^{max}$	W_j^{max}	$W_{j,T,CT}^{t_k,T}$	$W_j^{t_k}$	d
0,05	552634,9098	1385940	4254207,5	800 635	-713335

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

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

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

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

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

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

Решением задачи будет:

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

$x_1^* = 1163$ кВт

$x_2^* = 179,7$ 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:

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

$$W_{тяга,ст}^{10} = W_{дог,тяга,ст} - W_{тяга,ст}^{20} = 3515242 - 2836138{,}33\,3 = 679103{,}666\,7 \text{ кВт*ч}$$

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

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

Литература

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