Гетьман Г.К., Арпуль С.В., Демчук Р. Н. Выбор параметров номинального режима магистральных электровозов // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 3. – С. 11-14.

УДК 629.423

Выбор параметров номинального режима магистральных электровозов

Г. К. Гетьман, д-р техн. наук, профессор (ДИИТ); Арпуль С.В., ассистент. (ДИИТ); Демчук Р.Н., ассистент (ДИИТ)

Неизбежность обновления парка грузовых электровозов Укрзалізничці в сочетании с дефицитом средств выдвигает в ряд актуальных проблему выработки эффективных решений по установлению главных параметров перспективных электровозов – мощности и скорости (или силы тяги) номинального режима.

К важнейшим эксплуатационным характеристикам грузовых электровозов относятся также расчетная скорость v_p и расчетная сила тяги F_{kp} , которые определяют основные параметры перевозочного процесса – массу поездов и скорость их движения.

Для пассажирских электровозов помимо параметров номинального режима важны значения пусковой силы тяги и пусковой скорости, так как именно они определяют величину ускорения поезда в период разгона и реализуемые времена хода по участкам.

Однако, как показано в [1, 2], параметры номинального режима с достаточной точностью определяют соответствующие параметры расчетного режима грузовых электровозов и пускового режима пассажирских электровозов.

В качестве показателей оптимальности при выборе оптимальных параметров номинального режима электровоза примем:

– затраты энергии на осуществление перевозок при условии обеспечения

возможности реализации заданных значений времени хода поездов;

- недоиспользованную (избыточную) мощность локомотивного парка;
- среднее значение кратности тяги, необходимое для осуществления перевозок на заданной линии или полигоне тяги.

Первый из перечисленных показателей является общепринятым при решении подобного рода задач.

Целесообразность выбора двух других из перечисленных показателей вытекает из следующего.

Несмотря на то, что графиком движения поездов для каждого направления установлены нормы массы грузовых поездов, всегда имеют место значительные отклонения их массы от нормируемого значения даже в случае выполнения продиктованного стремлением полного использования мощности тяговых средств и полезной длины приемо-отправочных путей станций правила формирования, когда грузовые поезда должны быть или полносоставными, или полновесными.

Указанные отклонения массы грузовых поездов от нормируемого значения объясняются неизбежными колебаниями поездной погонной нагрузки, которые обусловлены, в свою очередь, спецификой грузов, перевозимых на данной линии.

Таким образом, масса грузовых поездов на конкретном направлении есть величина случайная. Это приводит к тому, что при определении мощности локомотива из условия вождения поездов нормируемой массы эксплуатируемый парк будет иметь существенную избыточную мощность по сравнению с потребной.

На железных дорогах Украины в настоящее время и в перспективе будут обращаться пассажирские поезда различных скоростных категорий и составности (сейчас составность поездов различного назначения колеблется от 3 до 24 вагонов). Использование в пассажирском движении электровоза одного типа, который обеспечит вождение поездов всех скоростных категорий и любой составности обусловит значительную избыточную мощность парка.

Избыточная мощность парка отрицательно сказывается на экономических показателях перевозочного процесса, так как приводит к росту издержек на приобретение локомотивов, а также затрат, обусловленных повышенным расходом электроэнергии на тягу поездов и содержанием избыточной мощности тяговых средств.

Снижения избыточной мощности парка можно добиться за счет ввода в эксплуатацию локомотивов разной мощности.

Таким образом приходим к задаче определения оптимального мощностного ряда электровозов.

С увеличением количества градаций мощности растет полнота использования мощности локомотивного парка, но возникают трудности подбора локомотивов для поездов разной массы в эксплуатации. Применение локомотивов разных типов на одном и том же участке крайне неудобно в эксплуатации и чаще всего невыгодно в экономическом отношении, так как ухудшает показатели использования локомотивного парка. В технико-экономическом и эксплуатационном отношении приемлемо применение локомотивов одного или, в крайнем случае, двух типов [3].

По-видимому, наиболее приемлемым является применение однотипных тяговых модулей [4], из которых можно формировать тяговые сцепы необходимой мощности. Однако и в этом случае увеличение числа модулей в сцепе (в дальнейшем этот показатель будем именовать кратностью тяги) приводит к ухудшению показателей эксплуатационной работы. Поэтому в качестве одного из показателей оптимизации целесообразно принять значение кратности тяги.

При использовании названных выше показателей оптимизации рассматриваемая задача для грузовых электровозов может быть сформулирована следующим образом.

Для заданных законов распределения массы поездов на поездо-участках, составляющих рассматриваемый полигон тяги, необходимо найти такое значение мощности N_H и скорости движения v_H номинального режима

тягового модуля, чтобы освоение заданного объема перевозок могло быть осуществлено при минимальной суммарной потребляемой мощности локомотивного парка, минимальной кратности тяги и при минимальном расходе электроэнергии на тягу поездов.

Задача должна быть решена при выполнении условия – возможности реализации заданной ходовой скорости движения поездов для реальных характеристик продольного профиля пути и действующих ограничений максимальной скорости движения грузовых поездов.

Приведенная формулировка задачи об определении оптимальных параметров номинального режима тягового модуля справедлива и для случая пассажирского электровоза, если условия решения задачи дополнить требованием обеспечения разгона поезда и достижение конструкционной скорости при ускорениях заданной величины.

В изложенной постановке рассматриваемая задача относится к классу задач векторной оптимизации с числом показателей, равным трем.

При решении задач векторной оптимизации при числе показателей более двух существенно усложняется процедура алгоритмизации решения, анализа и интерпретации полученных результатов [5].

С целью поиска возможных путей упрощения решения рассматриваемой задачи установим взаимосвязь показателей и параметров оптимизации в сформулированной задаче. Определенности ради ниже будет рассматриваться грузовое движение.

Используя регламентированные правилами тяговых расчетов [6] единицы измерения физических величин, мощность номинального режима электровоза можно определить в виде

$$N_H = 2,725 \cdot 10^{-3} F_H v_H, \text{ кВт.} \quad (1)$$

Как показано в [1], расчетная сила тяги и сила тяги номинального режима $F_{кн}$ связаны соотношением

$$F_{кн} = k_f^{-1} F_{кр}. \quad (2)$$

Коэффициент k_f представляет отношение расчетной силы тяги к силе тяги номинального режима, причем для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями $k_f = 1,15 \div 1,20$, а в случае асинхронного тягового привода можно принять $k_f = 1$.

Расчетная сила тяги современных электровозов определяется условиями сцепления колес с рельсами и принимается равной расчетной силе сцепления [6] при расчетной скорости, то есть

$$F_{\text{сц}} = 1000P\psi_{\text{кр}}, \quad (3)$$

где P – масса электровоза;

$\psi_{\text{кр}}$ – расчетный коэффициент сцепления, соответствующий расчетной скорости.

Представив в (1) $F_{\text{кн}}$ согласно (2), с учетом (3) получим

$$N_{\text{н}} = 2,725 \cdot 10^{-3} k_f^{-1} P \psi_{\text{кр}} v_{\text{н}}, \text{ кВт}. \quad (4)$$

Критическая масса состава грузового поезда определяется из условия движения по расчетному подъему с установившейся расчетной скоростью как [6]

$$Q = \frac{F_{\text{кр}} - P(w'_0 + i_p)}{w''_0 + i_p},$$

где P – масса электровоза;

Q – масса состава;

i_p – расчетный подъем;

w''_0 , w'_0 – основное сопротивление движению при расчетной скорости соответственно состава и локомотива в режиме тяги.

Из приведенного выражения с учетом (3) следует, что масса локомотива, необходимая для ведения поезда по расчетному подъему при реализации расчетной силы сцепления равна

$$P = \frac{w_0'' + i_p}{1000\psi_{kp} - (w_0' + i_p)} Q. \quad (5)$$

Множитель перед Q в (3) по смыслу представляет отношение массы локомотива к массе состава и определяется выражением

$$k_p = \frac{w_0'' + i_p}{1000\psi_{kp} - (w_0' + i_p)}, \quad (6)$$

используя которое, преобразуем (4) к виду

$$N_H = 2,725 \cdot 10^{-3} k_f^{-1} k_p \psi_{kp} v_H Q, \text{ кВт.} \quad (7)$$

Пусть, как обычно при решении подобного рода задач, заданы: тип вагонов, из которых сформирован состав; процентное соотношение вагонов каждого типа в составе; статическая нагрузка на ось вагонов. Тогда k_p является функцией v_H , i_p и, кроме того, зависит от типа тягового привода и характеристик механической части, так как последние определяют зависимость расчетного коэффициента сцепления от скорости $\psi_k(v)$. При этом, как следует из (7), необходимая номинальная мощность электровоза для вождения поездов заданной массы на конкретном участке, то есть при известном расчетном подъеме, определяется величиной номинальной скорости и массой состава.

Проанализируем зависимости расхода электроэнергии на тягу от параметров номинального режима электровоза $F_{кн}$ и v_H .

Отнесенный к 1 т массы состава расход электроэнергии представим как

$$a = \frac{2,725(1 + k_p)}{S_k - S_H} \int_{S_H}^{S_k} \frac{f_k(S)}{\eta(S)} dS, \text{ Вт}\cdot\text{ч/т}\cdot\text{км}, \quad (8)$$

где f_k – удельная сила тяги (на 1 т массы поезда);

S – пройденный поездом путь;

S_H, S_k – координаты пути, соответствующие началу и концу участка, км;

η – к. п. д. электровоза.

Как видно из выражения (8), расход электроэнергии для данного участка есть функцией управления поездом $f_k(S)$, которая может принимать значения $0 \leq f_k(v) \leq \bar{f}_k(v)$, где $f_k(v)$ – предельная тяговая характеристика.

Координаты предельной тяговой характеристики определяются как

$$\bar{f}_k(v) = \min \{ \bar{f}_{\text{ксц}}(v); \bar{f}_\beta(v) \}, \quad (9)$$

где $\bar{f}_{\text{ксц}}(v)$ и $\bar{f}_\beta(v)$ – участки предельной тяговой характеристики, обусловленные ограничениями силы тяги соответственно по сцеплению и допустимой степени ослабления возбуждения (для тяговых двигателей постоянного тока) определяемые как

$$\bar{f}_{\text{ксц}} = \frac{1000k_p \Psi_k(v)}{1 + k_p};$$

$$\bar{f}_\beta = \frac{1000k_p}{(1 + k_p)k_f} \Psi_{\text{кр}} F_k^* \left(\frac{v}{v_H} \right).$$

На основании (9) нетрудно видеть, что если мощность номинального режима электровоза определяется из условия реализации на расчетном подъеме предельной по условиям сцепления силы тяги, то координаты предельной тяговой характеристики не зависят от массы состава и однозначно определяются скоростью номинального режима. Следовательно, при прочих равных условиях возможные режимы управления тягой и удельный расход электрической энергии определяются выбранным значением скорости номинального режима.

Анализ показал, что по затратам электроэнергии на тягу в подавляющем большинстве случаев для электровозов с рекуперативным торможением близким к оптимальному есть управление по быстрдействию. Поэтому с позиций минимизации энергозатрат на тягу поездов целесообразно принять наименьшее значение v_H , при котором обеспечивается реализация заданной ходовой скорости и обеспечивается необходимое в условиях эксплуатации резервирование тяговой мощности.

Математические модели взаимосвязи кратности тяги, избыточной мощности и параметра оптимизации – мощности тягового модуля могут быть получены следующим образом.

Пусть для каждого из участков обращения локомотивов, составляющих заданный полигон тяги, заданы:

- грузопотоки (грузонапряженность) для четного и нечетного направлений движения;
- характеристики продольного профиля;
- закон распределения массы поездов.

При перечисленных выше исходных данных решение задачи может быть проведено в такой последовательности.

В соответствии с формулой (7) на основании данных, характеризующих распределение массы поездов для каждого j -го участка и заданной скорости номинального режима можно определить распределение потребной мощности тяги $f_j(t)$. Отметим, что здесь и ниже ради упрощения записей переменную N_H будем обозначать через t . Пусть b_j и a_j – соответственно наибольшее и наименьшее значения потребной для обеспечения перевозок на j -ом участке мощности тягового сцепа.

Если мощность тягового модуля равна x , то минимальное и максимальное значения кратности тяги, необходимые для вождения поездов на j -м участке, будут соответственно равны

$$r_j = \left[\frac{a_j}{x} \right] + 1; \quad s = \left[\frac{b_j}{x} \right] + z,$$

где квадратные скобки означают операцию взятия целой части числа, а величина

$$z = \begin{cases} 1, & \text{если } b_j/x \neq \text{целому числу;} \\ 0, & \text{если } b_j/x = \text{целому числу.} \end{cases}$$

При заданном распределении вероятностей потребной мощности $f_j(t)$

избыточная мощность y_{Nj} и кратность тяги y_{Kj} определяются как

$$y_{Nj} = \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} (kx-t) f(t) dt; \quad y_{Kj} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t) dt, \quad k = \overline{r, s} \quad (10)$$

Отметим, что в приведенных выражениях ради сокращения записей индексы j при a, b, s, r и $f(t)$ опущены.

Между показателями y_N и y_K существует простая взаимосвязь. В самом деле, представив y_N по (10) как

$$y_N = x \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t) dt - \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} t f(t) dt,$$

приходим к соотношению

$$y_N = xy_K - m_x, \quad (11)$$

где m_x – математическое ожидание потребной мощности номинального режима.

Полученные выражения справедливы для всех значений $x > 0$.

Выражения (10) и (11) позволяют определить показатели оптимизации для каждого участка, входящего в зону обслуживания локомотивов данного депо (дороги, региона и т.д.) и затем средние значения недоиспользованной мощности локомотивов и кратности тяги для полигона из расчета на один поезд [4].

Установим взаимосвязь y_N , y_K и скорости номинального режима электровоза.

Пусть закон распределения потребной мощности номинального режима $f(t)$ соответствует некоторому фиксированному значению скорости номинального режима $v_{нб}$. Определим закон распределения потребной мощности для скорости номинального режима $v_H = k_v v_{нб}$ при $0 < k_v < \infty$.

Согласно (7) соответствующая определенной массе состава потребная мощность электровоза пропорциональна скорости номинального режима.

Поэтому поставленная выше задача сводится к определению закона распределения случайной величины

$$x_v = x k_v \quad (\text{или } t_v = t k_v), \quad (12)$$

где x_v и x представляют мощность номинального режима тягового модуля при скоростях номинального режима v_H и v_{H0} , т. е.:

$$x_v = N_H \Big|_{v_H = k_v v_{H0}}; \quad x = N_H \Big|_{v_H = v_{H0}}.$$

Как известно [7], закон распределения функции $y = \varphi(x)$ случайной величины x с плотностью распределения $f(x)$ определяется как

$$f(y) = f(\psi(y)) |\psi'(y)|, \quad (13)$$

где $\psi(y)$ – функция, обратная φ , т. е. $x = \psi(y)$;

$|\psi'(y)|$ – модуль производной функции $\psi(y)$.

В нашем случае функция t_v случайной величины t с плотностью распределения $f(t_v)$ по смыслу задачи принимает только положительные значения и является монотонно возрастающей. Поэтому в соответствии с (13) искомый закон распределения определяется как

$$f_v(t_v) = \frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right). \quad (14)$$

Наибольшее и наименьшее значения потребной мощности для скорости номинального режима v_H соответственно равны:

$$A = a k_v; \quad B = b k_v, \quad (15)$$

а математическое ожидание потребной мощности номинального режима, как следует из (12) и известной теоремы о математическом ожидании линейной функции случайных величин, равно

$$m_v = k_v m_x. \quad (16)$$

При скорости номинального режима $v_H \neq v_{H0}$ кратность тяги составит

$$y_{kv} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x_v}^{kx_v} f_v(t_v) dt_v. \quad (17)$$

Значения максимальной s и номинальной r кратности тяги в (17) и (10) одинаковы. Действительно, для $v_H \neq v_{H0}$ будем иметь

$$s = \left[\frac{B}{x_v} \right] + z; \quad r = \left[\frac{A}{x_v} \right] + 1,$$

а с учетом (15)

$$\frac{B}{x_v} = \frac{b}{x}; \quad \frac{A}{x_v} = \frac{a}{x}.$$

Если в (17) ввести согласно (12) переменную

$$t = \frac{t_v}{k_v}$$

и учесть, что $dt_v = k_v dt$, то выражение под интегралом в (17) приводится к виду

$$\frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right) k_v dt = f(t) dt.$$

Пределы интегрирования:

$$\text{верхний} \quad t_G = t \Big|_{t_v = kx_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{kx_v}{k_v} = kx;$$

$$\text{нижний} \quad t_H = t \Big|_{t_v = (k-1)x_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{(k-1)x_v}{k_v} = (k-1)x.$$

Произведенная замена переменных, как нетрудно видеть, показывает, что выражения (10) и (17) дают одинаковые средние значения y_K . Следовательно, количество тяговых модулей в сцепе для вождения поездов заданного веса, т. е. кратность тяги, не зависит от величины скорости номинального режима.

Избыточная мощность тяги для $v_H = v_{H0}$, как можно видеть из (11) с учетом (16), равна

$$y_{Nv} = x_v y_K - m_v$$

или

$$y_{Nv} = k_v \cdot y_N. \quad (18)$$

Стало быть, мощность тягового модуля x , суммарная мощность потребного парка и избыток этой мощности в абсолютных единицах y_N при одном и том же значении кратности тяги пропорциональны скорости

номинального режима v_H .

Таким образом, с точки зрения снижения суммарной мощности парка при выборе оптимальной мощности номинального режима тягового модуля следует принять в расчет скорость номинального режима, определенную из условия минимализации расхода электроэнергии на тягу (наименьшее значение v_H , обеспечивающее возможность реализации заданной ходовой скорости и требуемой для условий эксплуатации уровень резервирования мощности).

Из изложенного выше с однозначностью следует, что решение задачи определения оптимальных параметров номинального режима тягового модуля, сформулированной выше как задачи векторной оптимизации с тремя показателями, можно свести к решению двух самостоятельных задач:

– определение скорости номинального режима из условия реализации заданной ходовой скорости движения при минимальном расходе электроэнергии на тягу поездов;

– выбор мощности номинального режима тягового модуля при заданном значении скорости этого режима из условия минимизации кратности тяги и избыточной мощности потребного электровозного парка.

Полученный результат позволяет существенно упростить построение алгоритма поиска оптимальных параметров номинального режима грузового электровоза и позволяет наглядно интерпретировать результаты решения.

Каждая из указанных задач может быть рассмотрена в классе задач векторной оптимизации с двумя показателями. Возможные пути их решения изложены в [1, 4].