

внеполосной складова, багатозондового
мікрохвильової мультиметр.

Рецензент д.т.н., професор, професор кафедри СКС
Листровой С.В. (УкрГАЗТ)

Поступила 27.05.2014 г.

УДК 621.31

ЩЕРБАКОВА И.А., к.т.н., доцент,
СТАСЮК А.И., д.т.н., профессор (Государственный экономико-технологический университет
транспорта)

Математические модели и компьютерно – ориентированные методы оптимизации стоимости электропотребления на основе дифференцированных коммерческих тарифов

Рассмотрены пути и методы организации математических моделей и критериев минимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии железнодорожными дорогами, предложены математические модели, описывающие процессы движения поездов и, на основе теории графов, сформулирована задача назначения вагонопотоков.

Ключевые слова: Модель, критерий, процесс, минимизация, система.

Постановка проблемы

Возникновение рынка электроэнергии и, как следствие, введение коммерческих тарифов на потребление электроэнергии, дифференцированных по зонам суток явилось основой экономического стимулирования потребителей электроэнергии для оптимизации режимов, как энергосистемы, так и выравнивания собственного графика нагрузки путем минимизации коммерческой стоимости электроэнергии собственного потребления. На сегодняшний день это, в первую очередь, касается отраслей, и предприятия доля энергоресурсов в себестоимости продукции составляет более 30% [1]. Учитывая тенденции роста цен на электроэнергию энергозависимые предприятия, к которым, в первую очередь, относится железнодорожный транспорт, должны иметь оперативную возможность управлять электропотреблением, с тем, чтобы проводить планомерное снижение удельного веса платы за электроэнергию в себестоимости выпускаемой продукции. Поскольку основой электроэнергетики Украины является Объединенная энергетическая система, которая осуществляет централизованное обеспечение электроэнергией потребителей, взаимодействует с энергосистемами смежных государств, обеспечивает экспорт, импорт и транзит электроэнергии, то возникла потребность в проведения

единой ценовой политики и отстаивания интересов потребителей на рынке естественных энергетических монополий. Для решения этих задач сформирована

© И.А. Щербакова, А.И. Стасюк, 2014

Национальная комиссия регулирования электроэнергетики для разработки и внедрения единой тарифной политики, отражающей все издержки по производству, передаче и распределению электроэнергии. Используя различные современные тарифные системы энергозависимые предприятия, имеют возможность управления энергопотреблением, с тем, чтобы планомерно снижать удельный вес платы за электроэнергию в себестоимости своей продукции. Это возможно только при налаженном коммерческом и техническом учете электроэнергии. Современная торговля электроэнергией основана на использовании автоматизированного микропроцессорного энергоучета, сводит к минимуму участие человека в процессе сбора, обработки и передачи коммерческой информации и обеспечивает достоверный, точный, оперативный и гибкий, адаптируемый к различным тарифным системам учет. Предприятие, используя автоматизированную систему коммерческого учета электроэнергии, имеет возможность, воспользовавшись тарифам, дифференцированными по зонам суток на оплату за потребляемую электроэнергию, проводить планирование таким образом, чтобы максимально перевести энергоемкие технологии на время действия льготных тарифов. Очевидно, что при этом объективно возрастает необходимость в повышении научного подхода и методов оптимизации процесса электроснабжения. В этой связи, в условиях функционирования субъектов энергорынка возникает потребность поиска новых способов и путей создания современных математических моделей, методов и компьютерно-ориентированных алгоритмов оптимизации энергопотребления которые адекватно описывают процессы обмена электрической энергией между участниками отношений по купле-продаже.

Анализ последних исследований и публикаций

Новые экономические отношения в сфере управления быстропротекающими технологическими процессами управления электропотреблением проявляются в формировании единого рынка электроэнергии. Одной из самых важных компонентов рынка электроэнергии является его инструментальное обеспечение, основой формирования которого являются автоматизированные системы контроля и коммерческого учета потребления электроэнергии. Создание систем коммерческого учета электроэнергии является необходимым условием режима экономии энергии на промышленном предприятии [1]. Благодаря применению систем современного коммерческого учета предприятие имеет возможность полностью контролировать весь процесс энергопотребления, а по согласованию с поставщиками энергоресурсов гибко переходить к различным тарифным системам и тем самым проводить оптимизацию коммерческую

стоимость потребляемой электроэнергии. Организация коммерческого и технического учета электроэнергии позволяет получить картину энергопотребления каждого объекта в режиме реального времени, минимизировать свои энергозатраты и, соответственно, планировать подключение своих объектов с максимальной эффективностью. В то же время, не смотря на глубокие исследования в сфере управления электроэнергетикой, в особенности исследование процессов электроснабжения на тягу железнодорожному транспорту, на сегодняшний день не достаточно развиты методы создания математических моделей для формализованного описания их функционирования. Достаточно также слабо развиты способы и методы решения комплекса задач управления режимами с общесистемных позиций и не рассмотрены вопросы согласования решения этих задач [1, 2].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Современные системы диспетчерского управления на основе средств коммерческого учета ориентированные, в основном, на выполнение контролирующих функций, а не на решение задач оптимизации электропотребления и только в отдельных случаях, в современных компьютерных системах управления, имеется возможность моделировать динамику штатных и аномальных режимов функционирования. Этот факт подтверждается в первую очередь тем, что разработчики компьютерных систем коммерческого учета электроэнергии основное внимание уделяют, как правило, техническому и программному обеспечению, а не постановке и решению математических задач системного анализа процесса генерации электроэнергии, оптимизации электропотребления, а также качеству функционирования электрических сетей. А именно этот комплекс задач и есть решающим фактором интеллектуализации тяговых электрических сетей и, как следствие, оптимизации электропотребления та экономии электроэнергии. Особую роль при этом предоставляется решению задач регистрации та интеллектуальной обработке первичной информации и формирования ее с единых общесистемных позиций для оптимизации коммерческой стоимости электроэнергии и созданию энергосберегающих технологий. Поэтому, на современном этапе, стала доминирующей тенденция разработки математических моделей, методов, алгоритмов и использования современных компьютерных способов оптимизации коммерческой стоимости электропотребления, а также режимов функционирования тяговых электрических систем на основе перспективных информационных и распределенных сетевых технологий.

Формулирование целей

Целью настоящей работы является разработка математических моделей и критериев минимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии железнодорожными дорогами, базирующихся на коммерческих тарифах, дифференцированных по зонам суток, особенностях назначения движения поездов, зависимых или независимых задержках на станциях, возможностей накопления вагонов в пунктах обслуживания и задержек, которые зависят от времени суток и приоритета поездов. Полученные математические модели и методы могут быть положены в основу разработки специализированных пакетов программ моделирования для обеспечения энергооптимальной технологии перевозок.

Основной материал исследования

Разработка математических моделей и на их основе компьютерно - ориентированных методов, которые могут быть положены в основу оптимизации стоимости потребляемой на тягу электроэнергии по коммерческим тарифам дифференцированных по зонам суток, является важной научной проблемой, решение которой открывает возможность создания новых энергосберегающих технологий в сфере энергообеспечения железнодорожного транспорта. Поскольку объектом исследования являются процессы протекающие в тяговых электрических сетях, представляющих собой территориально - распределенные системы снабжения электроэнергией поездов, то для синтеза математических моделей оптимизации перевозочного процесса, с точки зрения энергопотребления, а также методов моделирования динамики перевозок, в качестве базового математического аппарата применим теорию графов.

Предположим, что задан ориентированный граф G без петель и циклов, назначения вагонопотоков (рис.1). Представим граф G в виде матрицы C смежности, n вершин которого определяют станции железной дороги как

$$C = (c_{ij} / (i,j) \in G), \quad (1)$$

где c_{ij} - это время нахождения поезда на пути между станциями i и j.

Обозначим начальные станции $i=1,2,\dots,r$, промежуточные станции $i=r+1, r+2, \dots, m$ и конечные станции $i=m+1, m+2, \dots, n$. Каждой начальной станции i, ($i=1,2,\dots,r$) соответствует вектор который формируется по правилу

$$I \Rightarrow (n_{i,j}, \tau_{i,j} / (i,j) \in G), \quad i=1..r, \quad (2)$$

где $n_{i,j}$ - количество вагонов, отправляемых со станции i на станцию j одновременно, $\tau_{i,j}$ - время интервала между отправлениями вагонов в количестве $n_{i,j}$ из станции i на станцию j.

Поступая по аналогии, для каждой промежуточной станции i, ($i=r+1, r+2, \dots, m$) сформируем вектор по правилу

$$I \Rightarrow (n_{i,j}, \Delta(i) / (i,j) \in G), \quad i=r+1, r+2, \dots, m. \quad (3)$$

Предполагается, что если на станции i, ($i=r+1, r+2, \dots, m$) собралось необходимое число вагонов $n_{i,j}$, то они отправляются на станцию j с задержкой $\Delta(i)$. При этом сохраняется временной интервал $\tau_{i,j}$ отправок вагонов $n_{i,j}$ из станции i на станцию j до тех пор, пока все станции назначения не будут обеспечены. После этого процесс повторяется. Обозначим время $t_{pr}(i)$ прибытия поезда на станцию j, а также время $t_{ot}(i)$ отправления поезда из станции i. Будем также считать, что задержка поездов на станции i ограничены заданной величиной \mathcal{E} . Это означает, что

$$0 \leq \Delta(i) \leq \mathcal{E}, \quad i=r+1, r+2, \dots, m, \quad (4)$$

где $\Delta(i)=0$ при $i=1,2,\dots,r$.

На основе выражения (4) сформируем вектор Δ задержек как

$$\Delta = (\Delta(r+1), \Delta(r+2), \dots, \Delta(m)). \quad (5)$$

Отметим, что в случае когда $\Delta(1), \Delta(2), \dots, \Delta(r)$ не равняются нулю, то это может быть учтено в величинах $t_{1j}, t_{2j}, t_{3j}, \dots, t_{rj}$ отправления поездов из начальных станций i, ($i=r+1, r+2, \dots, m$) на промежуточные станции j, ($j=r+1, r+2, \dots, m$), $(i,j) \in G$.

Учитывая тот факт, что с появлением рынка электроэнергии были введены коммерческие тарифы, дифференцированные по зонам суток, то введем k коэффициентов различных тарифов оплаты за электропотребление в виде $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. Каждому тарифу α_s , ($s=1, 2, \dots, k$) соответствует временной интервал β_s сформулированный по правилу

$$\alpha_1 \Rightarrow \beta_1 = [0, t_1], \quad \alpha_2 \Rightarrow \beta_2 = [t_1, t_2], \dots \alpha_k \Rightarrow \beta_k = [t_{k-1}, 24]. \quad (6)$$

Сегодня на энергорынке существуют следующие тарифные зоны:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \Rightarrow \beta_1 = [0, 6] = 0,35, \quad \alpha_2 \Rightarrow \beta_2 = [6, 8] = 1,02, \quad \alpha_3 \Rightarrow \beta_3 = [8, 10] = 1,68, \\ \alpha_2 \Rightarrow \beta_4 = [10, 18] = 1,02, \quad \alpha_3 \Rightarrow \beta_5 = [18, 22] = 1,68, \quad \alpha_2 \Rightarrow \beta_6 = [22, 23] = 1,02, \\ \alpha_1 \Rightarrow \beta_6 = [23, 24]. \end{aligned}$$

Будем считать, что T_s - суммарное время поездов во временном интервале β_s может быть пребывания поездов в интервале β_s , ($s=1, 2, \dots k$). представлено в следующем виде:
Тогда суммарное время A_s пребывания в дороге

$$A_s = F_s [\Delta, \mathcal{E}, \beta_s, \{n_{ij}, \tau_{i,j}, (i,j) \in G\}, \{t_{pr}(j), t_{or}(i), t_v(i) \in \beta_s, t_{pr}(j) \in \beta_s\}] \quad (7)$$

$$i=1, 2, \dots, r, \quad j=r+1, r+2, \dots, m, \quad s=1, 2, \dots, k.$$

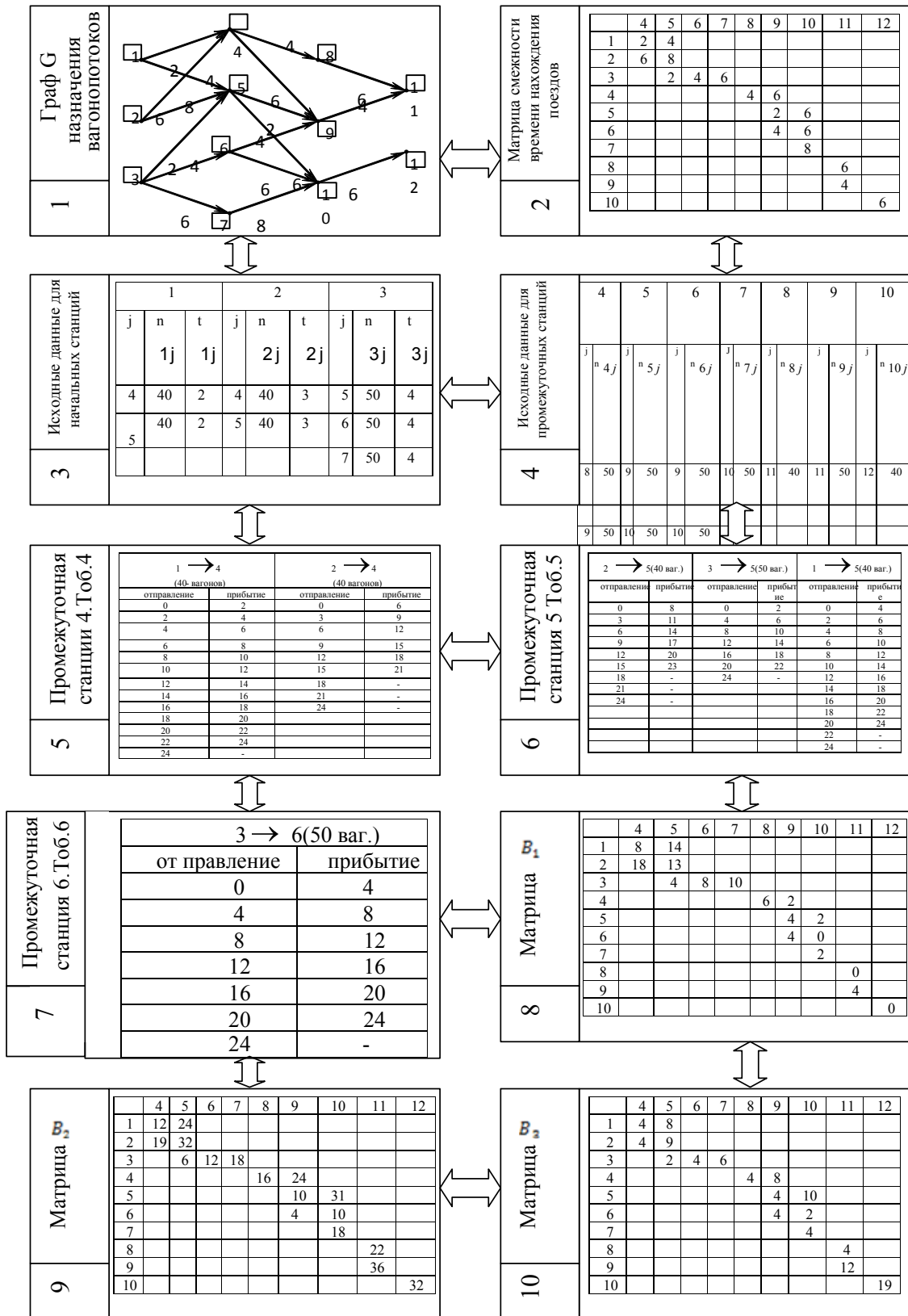


Рис.1. Схема вычисления коэффициентов A_i

Функция F_s , при прочих равных условиях, является алгоритмом, благодаря которому открывается возможность вычислять значение времени A_s пребывания поезда во временном интервале β_s ($s=1,2,..k$).

В соответствии с выражениями (1)-(7) рассмотрим методы формирования ряда математических моделей, глобального характера, благодаря каждой из которых открывается возможность нахождения такого оптимального расписания поездов, что коммерческая стоимость потребленной электроэнергии на тягу, благодаря тарифам, дифференцированным по зонам суток, будет существенно ниже. Количество математических моделей определяется совокупностью возможных вариантов станций, а конкретное применение математических моделей будет определяться специфическими условиями конкретной железной дороги. Если, в соответствии с (7), весь комплекс параметров для нахождения A_s задан или их можно найти на основе исходных данных, то в разрабатываемых математических моделях для оптимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии проблема состоит в нахождении вектора Δ в соответствии с (5).

Модель 1. Если на произвольной станции i задержки $\Delta(i)$, ($i=r+1, r+2,..m$) отправления числа вагонов $n_{i,j}$ на станцию j , ($j=m+1, m+2,..n$) жестко не зависят друг от друга, то процесс минимизации критерия (7), представляется в виде

$$F(A, \alpha, s) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_s, \quad (8)$$

сводится к поиску вектора задержек Δ формируемого в соответствии (5).

Модель 2. Если на каждой промежуточной станции i задержки $\Delta(i)$ существенно зависят от задержек на предыдущих станциях, то это означает, что существует некоторая функция θ_i , формируемая в соответствии с выражением ($i=r+1, r+2,..m$)

$$\Delta(i) = \theta_i(\Delta(r+1), \Delta(r+2), \dots, \Delta(m)). \quad (9)$$

При этом, для минимизации критерия $F(A, \alpha, s) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_s$ необходимо найти вектор Δ компоненты которого имеют вид (9).

Модель 3. Если задержки $\Delta(i)$ на каждой промежуточной станции i зависят от времени, то это

означает, что существует ряд функций φ_i , ($i=r+1, r+2,..m$), таких, что

$$\Delta(i) = \varphi_i(t), 0 \leq t \leq 24. \quad (10)$$

Ставим задачу: найти вектор

$\Delta = (\varphi_{r+1}(t), \varphi_{r+2}(t), \dots, \varphi_m(t))$, который минимизирует критерий

$$F(A, \alpha, s) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_s.$$

При планировании и организации перевозок, во многих случаях, отдельным поездам предоставляются приоритеты. Поскольку в моделях 1-3 поезда не имеют приоритетов, то сформируем модель, базирующуюся на применении совокупности приоритетов движения поездов.

Модель 4. Если имеется совокупность приоритетов движения поездов, то, в этой связи, нормированный вектор приоритетов запишется в виде

$$\gamma = (\gamma(1), \gamma(2), \dots, \gamma(p)), 0 \leq \gamma(i) \leq 1. \quad (11)$$

Максимальный приоритет равен единице $\gamma(i)=1$, а если поезд не имеет приоритета, то $\gamma(i)=0$. Если задержка $\Delta(i,j)$ поезда на станции i зависит от приоритета поезда j , то это означает существование функций ξ_j , ($i=r+1, r+2,..m$) таких, что можно записать

$$\Delta(i,j) = \xi_j(\gamma(j)), j=1,2,\dots,p. \quad (12)$$

Вместо вектора Δ , как было в предшествующих моделях, получим матрицу Λ задержек

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Delta(r+1,1) & \Delta(r+1,2) & \dots & \Delta(r+1,p) \\ \Delta(r+2,1) & \Delta(r+2,2) & \dots & \Delta(r+2,p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta(m,1) & \Delta(m,2) & \dots & \Delta(m,p) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

а количество поездов p можно подсчитать по формуле:

$$p_0 = 24 \sum_{i=1}^r \frac{d(i)}{t_{ij}}, p=[p_0], (i,j) \in G$$

где $[p_0]$ означает целую часть p_0 , меньшую p_0 , а $d(i)$ - полустепень выхода графа G для вершины i .

Ставим задачу: найти матрицу Λ , которая минимизирует критерий

$$F(A, \alpha, s) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_s.$$

При організації перевозок неизбежны накопления вагонов на проміжних станціях, кількість яких обмежено. Для урахування цих особливостей сформуємо наступну модель.

Модель 5. Пусть $w(i)$ – найбільше число вагонів, які одночасно можуть знаходитися на кожній

$$\Delta = (\eta_{r+1}(r+1, w(r+1)), \eta_{r+2}(r+2, w(r+2)), \dots, \eta_m(m, w(m))), \quad (15)$$

що мінімізує критерій

$$F(A, \alpha, s) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_s.$$

В вищеразглянутих моделях 1-5 тарифи α_s були незалежними. Однак, при переході на весняно-літній або осінньо-зимній режими споживання на ринку електроенергії можуть бути сформовані така сукупність тарифів, коли збільшення тарифної ставки на будь-якому інтервалі часу призводить до зниження цієї ставки на іншому інтервалі часу. Для урахування цих можливих змін сформуємо наступну модель.

$$F(A, \alpha, k) = A_1 \zeta_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) + A_2 \zeta_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) + \dots + A_k \zeta_k(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$$

був мінімальним.

Модель 7. Пусть k – кількість часових підінтервалів фіксована величина. Представимо суточний часовий інтервал $[0, 24]$ на k підінтервалів

$$[0, 24] = [0, t_1] \cup [t_1, t_2] \cup \dots \cup [t_{k-1}, 24].$$

Допустимо також, що відомі тарифні коефіцієнти α_i , ($i=1, 2, \dots, k$) і затримки $\Delta(i)$ на проміжних станціях ($i=r+1, r+2, \dots, m$). Задача оптимізації складається в наступному: якими повинні бути t_1, t_2, \dots, t_{k-1} , а також залежні від них A_i , ($i=1, 2, \dots, k$), щоб критерій

$$F(A, \alpha, k) = A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_s \alpha_k$$

був мінімальним.

Аналізуючи вищеописане, можна зробити висновок, що розглянуті моделі – це глобально поставлені задачі і в кожній з них обов'язково присутні коефіцієнти A_i , ($i=1, 2, \dots, k$), які

є проміжними станціями i , ($i=r+1, r+2, \dots, m$). При цьому, залежність затримки вагонів на станції i від граничних значень $w(i)$ може бути представлена сукупністю відповідних функцій

$\eta_{r+1}, \eta_{r+2}, \dots, \eta_m$ такими, що

$$\Delta(i) = \eta_i(i, w(i)), \quad i=r+1, r+2, \dots, m. \quad (14)$$

Поставимо задачу: знайти вектор

Модель 6. Если существует взаимозависимость тарифов α_i между временными зонами β_j , то существуют функции $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ такие, что

$$\alpha_i = \zeta_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k), \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (16)$$

Поставим такую задачу: для известных функций ζ_i , ($i=1, 2, \dots, k$) и известных коэффициентов A_j , ($j=1, 2, \dots, k$) найти такие $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$, чтобы критерий

являются сложными функциями от нескольких аргументов, см. (7). Какие конкретные математические модели будут связаны с решением этих задач, зависит от полноты информации, типов графов G и существования функций

$$\vartheta_i, (i=1, 2, \dots, m), \quad \varphi_i, (i=r+1, r+2, \dots, m),$$

$$\gamma_i, (i=1, 2, \dots, p), \quad \xi_i, (i=1, 2, \dots, p),$$

$$\eta_i, (i=r+1, r+2, \dots, m), \quad \zeta_i, (i=1, 2, \dots, k).$$

Для отдельных участков железных дорог и разных объединений этих участков необходимо проводить разного рода исследования с существующими и возможными функциями.

Рассмотрим процедуру вычисления коэффициентов A_i . На рис. 1 задан граф G назначений вагонопотоков для 12 станций и, соответственно, матрица смежности в виде таблицы для заданного участка железной дороги. В графе G обозначены начальные станции 1, 2, 3, промежуточные станции 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и конечные станции 11, 12. Для

вычисления A_i зададимся конкретными значениями. Будем считать, что в начальных станциях 1, 2, 3 накапливается соответственно 480,320,300 вагонов за сутки. Промежуточные станции 4,5,6,7,8,9,10 могут принять за сутки соответственно 400,500,100,100,200,500,400 вагонов. Конечные станции 11,12 принимают соответственно 700 и 400 вагонов.

Время нахождения поездов в пути между станциями i и j для 12 станций заданных графом G , представлено матрицей смежности C , а исходные данные для начальных и промежуточных станций находятся, соответственно, в таблицах 2, 3 (рис. 1). Эти данные будем использовать для подсчета оплаты за электропотребление. Далее, для каждой промежуточной станции, на которую прибывают поезда, составляем таблицы 4,5,6.

Для того, чтобы найти коэффициенты $A_i, i=1,2,3$, строим матрицы B_1, B_2, B_3 , используя данные предыдущих таблиц

$$B_1 = (b^1(i,j)), B_2 = (b^2(i,j)), B_3 = (b^3(i,j)).$$

Тогда

$$A_1 = \sum_{(i,j)} b^1(i,j), A_2 = \sum_{(i,j)} b^2(i,j), A_3 = \sum_{(i,j)} b^3(i,j). (17)$$

В нашем примере $A_1 = 99, A_2 = 326, A_3 = 108$ и, соответственно

$$F(A, \alpha, 3) = 99\alpha_1 + 326\alpha_2 + 108\alpha_3.$$

Проведенные расчеты можно использовать, если тариф зависит не только от времени, а также от станции, с которой отправляется поезд. Тогда будем иметь матрицу тарифов

$$\theta = (\alpha_{ij}), \quad i=1,2,\dots, k, \quad j=1,2,\dots, n,$$

где k - это количество временных интервалов разбивки, n - количество станций.

Тогда критерий будет иметь вид

$$A_{11}\alpha_{11} + A_{12}\alpha_{12} + \dots + A_{1n}\alpha_{1n} + \dots + A_{k1}\alpha_{k1} + \dots + A_{kn}\alpha_{kn}.$$

Разумеется, если рассматривать другие задержки, то задача будет более сложной, но результат будет более интересным.

Выводы

1. На основе проведенного анализа существующих тарифных систем и технических средств учета потребления электроэнергии, рассмотрены пути разработки математических моделей, методов и критериев минимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии железнодорожными дорогами, базирующихся на коммерческих тарифах, дифференцированных по зонам суток и перспективных распределенных сетевых технологиях.

2. Сформулирована, на основе теории графов, задача назначения вагонопотоков для организации грузовых и пассажирских железнодорожных перевозок с учетом ограничений на задержки, интервалы движения, отправления, дифференцированные коммерческие тарифы на потребляемую электроэнергию, время прибытия и отправления поездов, время на обслуживание во время стоянок, а также других показателей.

3. Предложено ряд глобальных математических моделей описывающих процессы движения поездов с учетом зависимых друг от друга или независимых задержек на станциях, возможностей накопления вагонов в пунктах обслуживания, задержек, которые зависят от времени суток и приоритета поездов, а также ограничения, которые определяются коммерческими тарифами потребленной электроэнергии на тягу.

4. Разработан критерий минимизации коммерческой стоимости потребленной электроэнергии, который базируется на применении тарифов, дифференцированных по зонам суток, и рассмотрены способы поиска вектора минимизации, в основе которых применены математические модели организации перевозочного процесса и методы моделирования динамики перевозок.

Литература

1. Стогній Б.С. Методы организации компьютерных систем коммерческого управления электрическими объектами. / Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Стасюк А.И., Стасюк И.А. Зб. наукових праць. Моделювання та інформаційні технології./ Випуск 15, НАН України. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. Київ – 2002.- С.3-15.
2. Стогній Б.С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. ; Технічна електродинаміка 2012, №5 – С. 52-66.
3. Бурдюк Т.А. Определение затрат изменения графика движения поездов на основе дифференцированных коммерческих тарифов на электроэнергию./ Бурдюк Т.А., Щербакова И.А.; Электронное моделирование 2004, Т. 26. №6 – С. 101 – 111.