

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ОСЖД)**

I издание

Разработано совещанием экспертов Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу с 28 по 30 мая 2003 г. в г. Сенограбы

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу с 27 по 30 октября 2003 г.

Дата вступления в силу: 30 октября 2003 г.

**Р
618**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА
ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

Содержание

1. Общие положения	4
2. Система информационных технологий	7
2.1. Структура системы	7
2.2. Технические и программные средства	9
2.3. Базы данных и знаний	12
3. Концепция приобретения электроэнергии для электрифицированных линий	12
Питающие сети тяговых подстанций.	12
Способы расчета за электроэнергию и выход на оптовый рынок	
Электроэнергии	13
Рекомендации по прогнозированию электропотребления и цены электрической энергии по периодам суток	14
3.4. Рекомендации по применению тарифов при закупке электроэнергии	17
4. Оптимизация режимов движения подвижного состава с учетом методов закупки электроэнергии	22
Оптимизация режимов движения поездов по критерию минимума расхода электроэнергии	22
Компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов для показателей потребления и стоимости электрической энергии	23
4.3. Оптимизация режимов движения по стоимостным показателям	25
4.3.1. Условия применения дифференцированных тарифов	25
4.3.2. Условия оптового рынка электроэнергии	28
Приложение	30

Перечень условных обозначений

- АРМ–Д – автоматизированное рабочее место поездного диспетчера;
- АРМ–Э – автоматизированное рабочее место энергодиспетчера;
- АСКУЭ – автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии;
- БД – база данных;
- БЗ – база знаний;
- ВМД – вагонная модель процесса перевозки дороги;
- ДТ – дифференцированный тарифов оплаты электрической энергии;
- ЗДТ – задача перевода тяговых подстанций на дифференцированный тариф;
- ЗРВП – задача расчета оптимальных режимов ведения поезда;
- ИМ – имитационные модели процессов;
- ОРЭ – оптовый рынок электроэнергии;
- ОСЖД – организация сотрудничества железных дорог;
- ПП – процесс перевозок;
- РК – режимная карта ведения поезда;
- СЧЭ – счетчик электроэнергии;
- ТП – тяговая подстанция;
- ЭПС – электрический подвижной состав железнодорожного транспорта;
- ЭС – экспертная система;
- ЭВМ – электронная вычислительная машина;
- ЭМД – энергетическая модель дороги;
- ЭОТ – энергооптимальные технологии управления электрической тягой.

1. Общие положения

1.1. Рекомендации направлены на реализацию энергетической политики железнодорожного транспорта стран-членов организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) и повышение эффективности использования энергии в процессе перевозок на электрифицированных линиях.

1.2. Целью настоящих рекомендаций является разработка комплекса научно обоснованных предложений, условий и мер, обеспечивающих:

- снижение оплаты за электропотребление на тягу поездов в условиях работы с различного рода тарифами;

- оптимизацию режимов движения подвижного состава по критерию минимума расхода электроэнергии и стоимостным показателям этого расхода.

1.3. Настоящие рекомендации тесно увязаны с принятой структурой интегрированной системы управления электроснабжением железнодорожного транспорта (см. Р612/4) и дополняют ее в области создания экспертных систем анализа и регулирования электропотребления.

1.4. Энергооптимальные технологии управления электрической тягой (ЭОТ) в процессе перевозок на железнодорожном транспорте представляют собой систему моделей, методов и средств, позволяющих максимально снизить потери, повысить энергетическую эффективность оборудования и расширить функциональные возможности бесперебойного снабжения электроэнергией электрифицированных линий с использованием различного рода тарифов и моделей оптовых рынков электроэнергии (ОРЭ).

1.5. Повышение энергетической эффективности и экологической безопасности систем электроснабжения железных дорог обеспечивается:

- на уровне организационно-экономического управления – возможностью использования информационных технологий в процедурах принятия решений по приобретению электроэнергии для электрифицированных линий,

- на уровне организационно-технологического управления – улучшением качества электроэнергии, снижением потерь энергии и влияния транспортных систем на окружающую среду,
- на уровне технологического управления – применением экспертных систем диагностики оборудования электротяговых систем, новых методов его обслуживания, а также оптимизации режимов движения подвижного состава на базе отображения процесса перевозок и связанных с ним данных о соответствующем электропотреблении на тягу поездов.

1.6. Создание интегрированных информационных систем

железнодорожного транспорта, использующих технологии интеллектуальных экспертных систем, баз данных, является одной из современных и актуальных задач реализации энергооптимальных перевозок.

1.7. В состав интегрированных информационных систем целесообразно включить следующие задачи с учетом эволюционного подхода при их внедрении:

1.7.1. Повышение энергетической эффективности и экологической безопасности систем тягового электроснабжения железных дорог. Развитие энергосберегающих систем электроснабжения с линиями обратного тока. Создание управляемых преобразовательных агрегатов и коммуникационной аппаратуры нового поколения.

1.7.2. Организация оперативного учета, анализа и оценки эффективности использования электроэнергии на базе широкого использования современных микропроцессорных счетчиков электроэнергии, передовых технологий обработки данных, систем обслуживания и сопровождения.

1.7.3. Обоснование перевода тяговых подстанций на дифференцированные тарифы оплаты с целью минимизации электропотребления в пиковые периоды, выравнивания электропотребления, уменьшения стоимости электроэнергии.

1.7.4. Обоснование эффективности и реализации перехода к закупке электроэнергии для электрифицированных линий железных дорог на основе перспективных моделей оптовых рынков электроэнергии стран ОСЖД.

1.7.5. Оперативное регулирование электропотребления на тягу на базе автоматического управления режимами работы тяговых подстанций с использованием экспертных систем (ЭС). Имитационное моделирование систем электроснабжения тяги поездов в условиях применения дифференцированных тарифов или оптового рынка электроэнергии.

1.7.6. Определение энергооптимальных интервалов между поездами на основных направлениях железных дорог, формирование энергооптимальных (и оптимальных по стоимости электроэнергии) годовых графиков движения поездов различных категорий (пассажирские, грузовые и др.).

1.7.7. Обеспечение эффективного взаимодействия автоматизированных рабочих мест поездного диспетчера и энергодиспетчера путем реализации имитационных моделей с возможностью быстрых эквивалентных преобразований при оценке и выборе перетоков мощности при различных сочетаниях тяговых подстанций, работающих по одноставочным и многоставочным тарифам.

1.7.8. Оперативное прогнозирование потребности в электроэнергии на тягу поездов на основе данных, накапливаемых в вагонной модели процесса перевозки (ВМД) и энергетической модели дороги (ЭМД), учет применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии.

1.7.9. Создание базы данных для перехода от анализа компромиссно-оптимальной задачи с показателями “участковая скорость” – “электропотребление” к решению задачи выбора участковой скорости с учетом суточных тарифов стоимости электроэнергии, а также возможностей сортировочных станций по формированию поездов.

1.7.10. Обеспечение эффективного информационного взаимодействия автоматизированных систем АРМ–Д и АРМ–Э с целью решения оперативных задач управления процессом перевозки.

2. Система информационных технологий

2.1. Структура системы.

2.1.1. Информационные технологии управления объединяют системы электрической тяги, организации процесса и режимы ведения подвижного состава. Изолированно, без обеспечения системного анализа этих взаимосвязанных процессов, нельзя выявить все резервы и найти эффективные пути для решения проблемы энергооптимальной организации процесса перевозок.

2.1.2. Уровни информационных технологий следующие:

1. Формирование вагонопотоков по направлениям, определение оптимальных межпоездных интервалов и весов поездов (в том числе в различных временных тарифных зонах оплаты электроэнергии).
2. Система электрической тяги в условиях использования дифференцированных тарифов оплаты и оптового рынка электроэнергии.
3. Выбор оптимальных режимов ведения поездов по заданным участкам (в том числе в различные периоды суток).

2.1.3. Основные задачи, технологии железнодорожного транспорта, их показатели как связи между уровнями, которые образуют общесистемную структуру, представлены на рис. 1. На уровне I выделено повагонное отображения процесса перевозок (вагонная модель – ВМД) как одна из базовых технологий, использование которой обеспечивает решение комплекса задач управления перевозками.

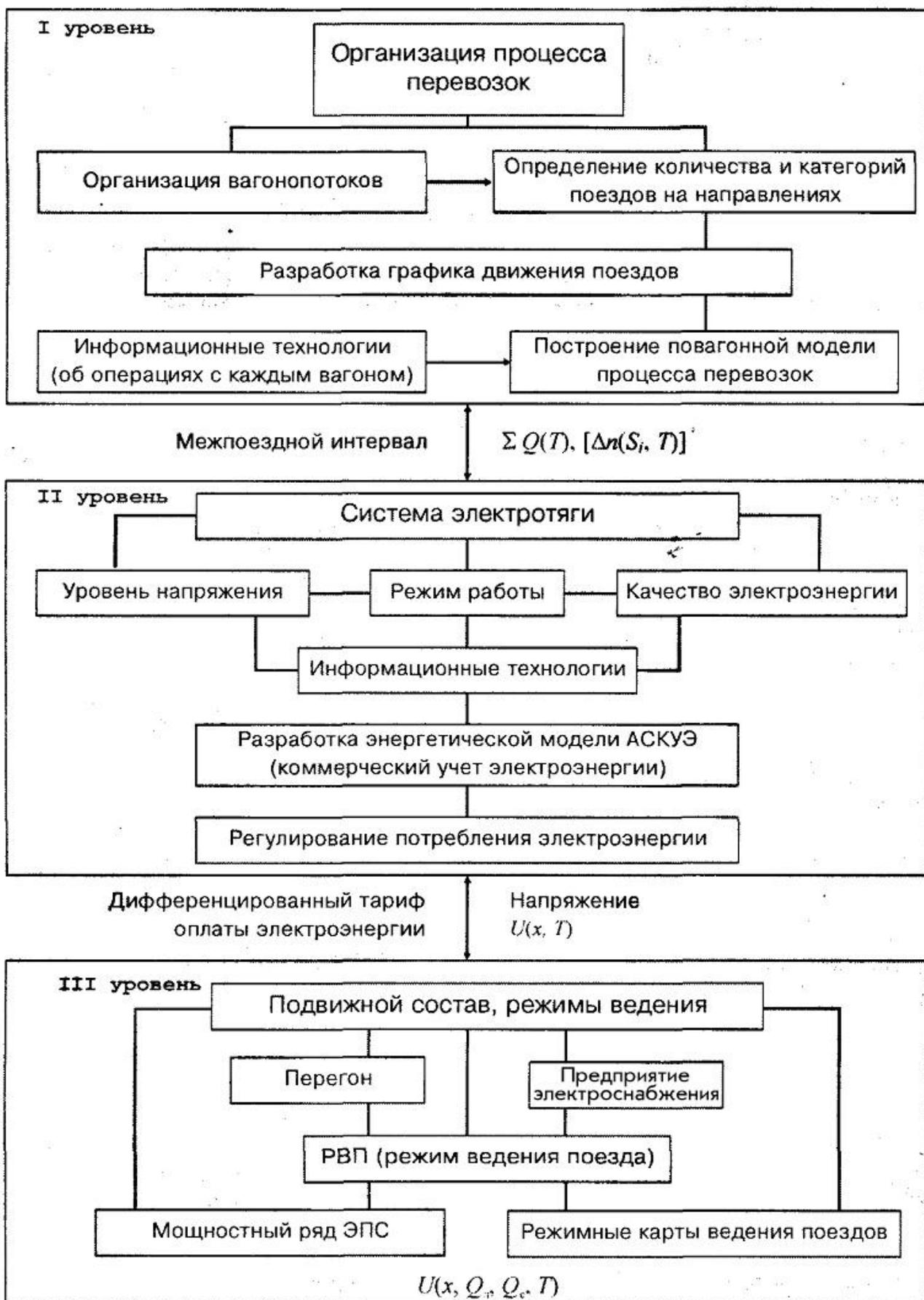


Рис. 1. Иерархическая структура задачи по обеспечению энергооптимального процесса перевозок

2.1.4. Связь между I и II уровнем устанавливается параметрами: $\sum Q(S, T)$ – объем перевозок; $\{\Delta n(S, T)\}$ – межпоездной интервал по участкам S в период суток T . Зависимость от T обусловлена учетом дифференцированных тарифов и условиями оптового рынка электроэнергии (ОРЭ). На уровне систем электрической тяги II выделяются технологии коммерческого учета электроэнергии, задачи по созданию энергетической модели процесса перевозок, интегрированных систем регулирования электропотребления тяги поездов.

2.1.5. Уровни II и III связаны величинами напряжения контактной сети $U(x, T)$ в точке с координатой x . Основной задачей уровня III является выбор режимов $u(x, Q_n, Q_g, T)$ ведения ЭПС в зависимости от положения x , периода суток T , Q_n – массы электроподвижного состава (ЭПС), массы поезда – Q_g , а также графика движения (связь с уровнем I).

2.1.6. Применение дифференцированных тарифов и моделей ОРЭ при закупке электроэнергии существенно влияют на режимные карты ведения поездов, что ограничивает использование методик расчета режимов, рекомендованных для одноставочных тарифов.

2.1.7. Многоуровневая система моделей обеспечивает возможность всестороннего исследования взаимосвязей между основными характеристиками выделенных процессов, и это позволяет выбрать параметры энергооптимального процесса перевозки.

2.1.8. Представленная структура информационных технологий (рис. 1), позволяет решить задачи, перечисленные в п. 1.7.

2.2. Технические и программные средства.

2.2.1. Техническими средствами ЭОТ являются – микропроцессорные счетчики электроэнергии, сети ЭВМ, первичные датчики, системы передачи информации и другие средства, перечисленные в Р612/4.

2.2.2. Функциональный состав системы должен обеспечивать возможность решения задач п. 1.7, используя общую информационную базу.

2.2.3. В качестве данных, необходимых для получения решений, выступают:

- оперативные и архивные данные, предоставляемые моделями ВМД и ЭМД;
- расчетные результаты анализа данных, накапливаемых в этих моделях;
- результаты имитационного моделирования процессов (ИМ);
- данные, представленные в системах АРМ–Э и АРМ–Д и других системах, необходимые для информационного обеспечения процедур регулирования электропотребления на тягу поездов.

2.2.4. Информационно-технологические характеристики систем ЭОТ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Информационно-технологические характеристики
задач ЭОТ в процессе перевозок (ПП)

№ п\п	Название задачи	Информационная база	Оперативность	Технические средства	Информ. технология
1.7.1, 1.7.2	Мониторинг электропотребления на тягу	ЭМД, Расчеты по ВМД	Оперативная	Счетчики электроэнергии (СЧЭ)	Сопровождение СЧЭ
1.7.3,	Перевод ТП на дифференцированные тарифы	ЭМД, Расчеты по ВМД	Нет	ЭВМ	Мониторинг ПП, ЭМД
1.7.4	Переход на модели ОРЭ	ЭМД, Расчеты по ВМД	Нет	ЭВМ	Мониторинг ПП, ЭМД
1.7.5	Оперативное регулирование переключений	Обмен АРМ–Э, АРМ–Д	Оперативная	Сети ЭВМ, связь	Реальный режим систем

	ТП				
1.7.6, 1.7.7, 1.7.8	Оперативное прогнозирование электропотребление на тягу	ВМД, ЭМД, ИМ	Оперативная	Счетчики электроэнергии, ЭВМ	Прогнозирование ПП
1.7.9	Выбор участковой скорости с учетом стоимости электроэнергии	БД ИМ, ВМД, ЭМД	Нет	ЭВМ	Мониторинг процесса перевозок (ПП)
1.7.10	Интеграция систем АРМ – Д и АРМ – Э	ВМД, ЭМД, АРМ–Э	Оперативная	Сети ЭВМ, связь	Мониторинг ПП

2.2.5. Решение задач п. 1.7 требует единства используемых процедур обработки данных, анализа информации, прогнозирования и оптимального регулирования электропотребления в процессе перевозок.

2.2.6. В состав программных средств ЭОТ должны быть включены программы дискретного сетевого моделирования на базе сетей Петри, E-сетей, F-сетей, специализированные программы имитационного моделирования систем тягового электроснабжения, современные системные программные средства.

2.2.7. Программное обеспечение должно включать подсистему по организации интеллектуального интерфейса, обеспечивающую эффективное взаимодействие с пользователями всех категорий, в том числе аналитическую обработку данных в реальном масштабе времени.

2.3. Базы данных и знаний.

2.3.1. Для реализации задач п. 1.6. система ЭОТ должна содержать перечисленные ниже компоненты:

- график объемов перевозок по периодам суток, полученный на основе ВМД в реальном масштабе времени;

- условия реализации процесса перевозки и схемы питания электротяговых систем;

- матрицы $\{A^{(k)}\}$ прогнозируемого электропотребления на тягу поездов по периодам суток;

- обобщенные данные о процессах перевозок и электропотребления, преобразованные в базы знаний экспертных систем.

2.3.2. На основе сравнений профилей нагрузок и профилей поездной работы на одних и тех же электрифицированных участках вычисляются относительные значения удельных коэффициентов, использование которых позволяет рассчитать потребность в электроэнергии по объемам перевозок.

3. Концепция приобретения электроэнергии для электрифицированных линий.

3.1. Питающие сети тяговых подстанций.

3.1.1. Питающие сети как правило должны представлять собой ЛЭП 110-220 кВ и обеспечивать надежное питание тяговых подстанций как потребителей категории I для магистральных электрифицированных участков и потребителей категории II для слабозагруженных участков.

3.1.2. Питающие сети могут быть принадлежностью железных дорог, других энергоснабжающих организаций или представлять их комбинацию.

3.1.3. В условиях работы ОРЭ перспективными являются такие комбинации внешнего и тягового электроснабжения, которые обеспечивают

экономичную работу электрифицированных линий железных дорог на базе двухсторонних договоров с элементами балансирующего рынка.

3.1.4. Интегрированные системы управления (см. Р612/4) должны обеспечивать передачу в центральный диспетчерский пункт данных о нагрузках и мощностях питающих сетей, тяговых подстанций для обеспечения возможности формирования в реальном масштабе времени получасовых (минутных) графиков мощности для эффективной работы с ОРЭ.

3.1.5. Экономические законы ОРЭ не должны превалировать над технологией передачи электроэнергии по питающим сетям и режимами работы систем электроснабжения тяги поездов в процессе перевозок.

3.2. Способы расчета за электроэнергию и выход на оптовый рынок электроэнергии.

3.2.1. Расчеты за электроэнергию должны осуществляться в соответствии с существующими концепциями ОРЭ стран-членов ОСЖД, или другими национальными правилами расчетов за электроэнергию.

3.2.2. Для обеспечения субъектов ОРЭ полной, своевременной, достоверной и узаконенной действующими нормативными документами информацией об электроэнергии и мощности, а также проведения расчетов между объектами оптового рынка, необходимо создание автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ).

3.2.3. Метрологическое обеспечение средств АСКУЭ осуществляется на этапе проектирования, изготовления, внедрения и эксплуатации в соответствии с нормативными актами стран-членов ОСЖД – «Об обеспечении единства измерений».

3.3. Рекомендации по прогнозированию электропотребления и цены электрической энергии по периодам суток

3.3.1. Прогнозирование электропотребления на тягу поездов позволяет решить задачи об эффективности применения дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии, а также о переходе к моделям закупки электроэнергии в рамках ОРЭ.

3.3.2. Удельные характеристики оптимальных движений поездов с высокой точностью могут быть описаны уравнением регрессии вида

$$a'(Q_p) = a(Q_*)(c_1 + c_2(Q_p/Q_*)) / (c_3 + c_4(Q_p/Q_*)), \quad (3.1)$$

где

a' – прогнозируемое удельное электропотребление поезда;

a – удельное электропотребление поезда с эталонной массой;

Q_p, Q_* – соответственно расчетная и эталонная масса поезда;

c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты уравнения регрессии.

3.3.3. Зависимости вида (3.1) необходимо получить для поездов различных категорий (грузовых, пассажирских, скоростных, и др.).

3.3.4. Для оперативного прогнозирования расхода электроэнергии на тягу может быть использована модель вида

$$Q(t+1) = C(E(t), V(t)) (S_E(E(t), \alpha, n_E) + S_\Delta(\Delta(t), \beta, n_\Delta)), \quad (3.2)$$

где обозначено : $\Delta(t) = E(t) - Q(t)$, ; $\alpha + \beta = 1$;

$$S_E(.) = [\alpha E(t) + \alpha(1-\alpha)E(t-1) + \alpha(1-\alpha)^2 E(t-2) + \dots + (1-\alpha)^{n_E-1} E(t-n_E)];$$

$$S_\Delta(.) = [\beta \Delta(t) + \beta(1-\beta)\Delta(t-1) + \beta(1-\beta)^2 \Delta(t-2) + \dots + (1-\beta)^{n_\Delta-1} \Delta(t-n_\Delta)];$$

$E(t)$ - расход электроэнергии за период t ; $Q(t)$ – прогноз величины $E(t)$;
 $V(t)$ – объем перевозок за период t ; n_E, n_Δ – количество периодов,
учитываемых для прогноза; здесь $C(E(t), V(t))$ устанавливает связь величин
 $E(t), V(t)$, исходя из результатов мониторинга профиля объемов перевозок и
профиля электропотребления.

Параметры $x = (\alpha, \beta, n_E, n_\Delta)$ модели (3.2) определяют из решения
оптимизационной задачи вида:

$$\text{Найти } x^* : F(x^*) = \min_{x \in D_x} \{ F(x) = P(Q(t, x) - E(t, x)) \}. \quad (3.3)$$

Здесь $t \in T$ задает период наблюдений, а $P(.)$ - выражает меру близости
прогнозируемых и фактически реализованных значений за период T . В качестве
 $P(.)$ могут быть использованы суммы квадратов и суммы модулей отклонений.

На практике в области D_x достаточно принять $n_E, n_\Delta = 1$, или $n_E, n_\Delta = 2$.

3.3.5. В рамках ОРЭ прогноз цены определяет стратегию закупок
электроэнергии для электрифицированных участков.

3.3.6. Вероятностные характеристики цены электроэнергии по периодам
суток (средние, средние квадратические отклонения, коэффициент вариации)
представлены на рис. 2. При расчетах оптимальных режимов движения поездов
выделяются четыре временные зоны:

- 23 – 24, 0 – 6 час, первая;
- 6 – 10, час, вторая,
- 10 – 17, 22 – 23 час, третья;
- 17 – 22 час, четвертая.

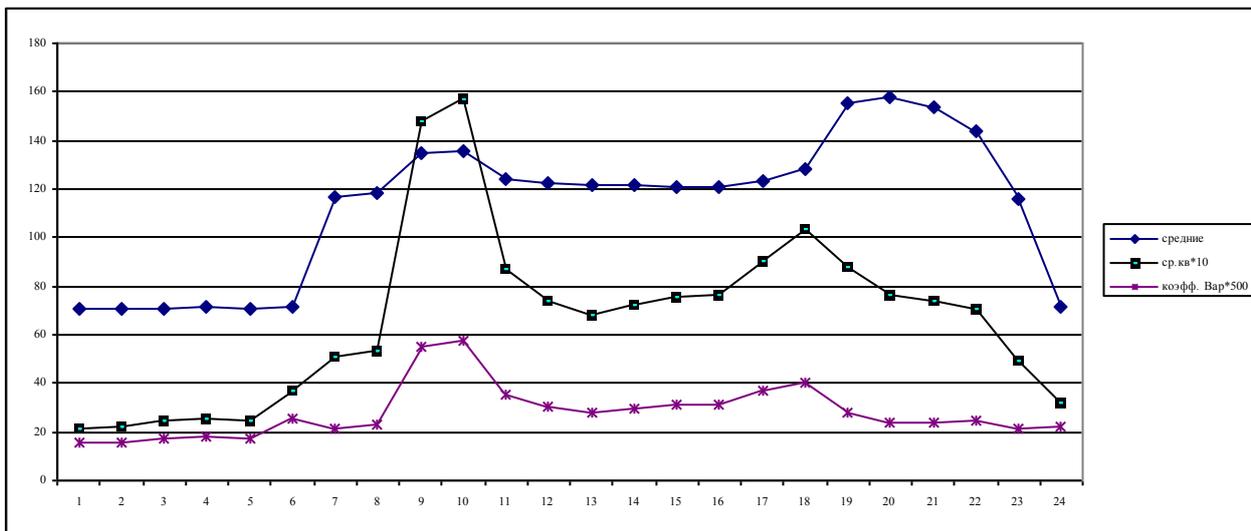


Рис. 2. Вероятностные характеристики цены электроэнергии, потребленной на тягу поездов, по периодам суток

3.3.7. Режимные карты, оптимальные по критерию минимума электропотребления, рекомендуется использовать для первой и третьей временных зон, см. п. 3.3.6.



Рис. 3. Графики цены электроэнергии ОРЭ по временным интервалам и дням недели

3.3.8. Возможное снижение цены электроэнергии в пиковые часы выходных дней (см. рис. 3), а также другие закономерности ценообразования необходимо учитывать при формировании графика движения поездов.

3.3.9. Различия нижних и верхних значений цены электроэнергии для различных периодов суток лежат в пределах 8 – 10% (см. рис. 4).

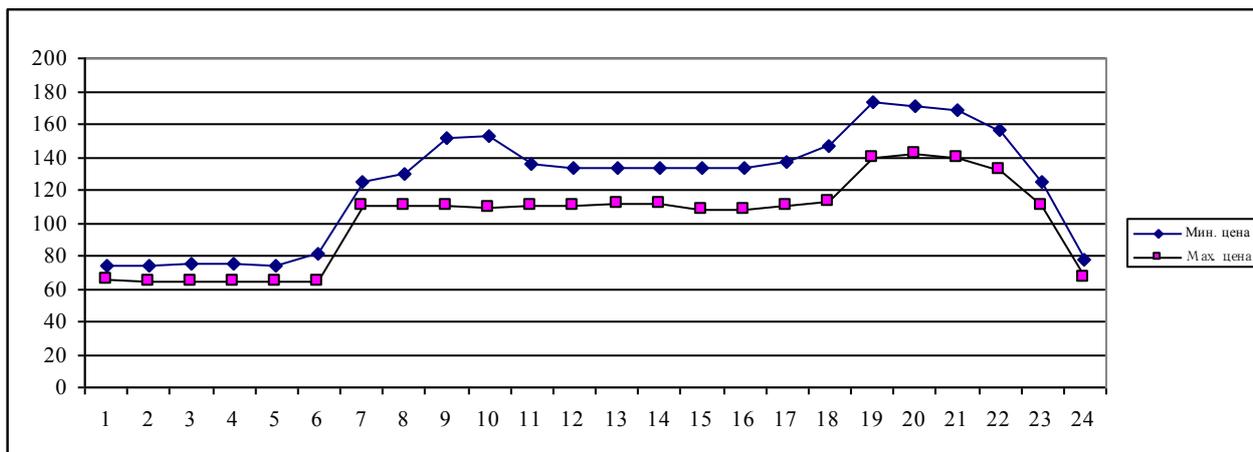


Рис. 4. Диапазон цен электроэнергии в ОРЭ по периодам суток

3.3.10. Функция цены на оптовом рынке электроэнергии прогнозируется оператором рынка. Для использования при расчетах режимов ведения поезда в условиях функционирования ОРЭ модель цены $C(x, t)$ представима в следующем виде

$$C(x, t) = \{(N(M[c(x_k, t_1)], \sigma(x_k, t_1)), \dots, N(M[c(x_k, t_{24})], \sigma(x_k, t_{24})))\}_{k \in N_k}, \quad (3.4)$$

где

$N(a, \sigma)$ – функция Гаусса, $M[*]$ – знак математического ожидания, x – координата пути, t – времени.

Рекомендации по применению тарифов при закупке электроэнергии

3.4.1. Информационные технологии минимизации оплаты электропотребления тяговых подстанций разделяются на две основанные группы: допускающие или не допускающие изменения графика движения

поездов при использовании накопителей энергии, или же собственных источников энергии железнодорожного транспорта.

3.4.2. Постановка задачи о применении ДТ без изменения графика движения поездов состоит в следующем.

Пусть имеется N_T тяговых подстанций, $i = 1, 2, \dots, N_T$, которые необходимо отнести к $C = (C_t^{(k)}) = (C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_{l_k}^{(k)})$ тарифам, $k = 1, 2, \dots, l$; через $C_j^{(k)}(t)$ обозначены коэффициенты стоимости электроэнергии по тарифу 'k' для периода (t), относящегося к тарифной зоне 'j'. Для каждого тарифа $C_t^{(k)}$ считаются заданными матрицы оценок распределения потребленной электроэнергии по тарифным зонам $A^{(k)} = [\hat{a}_{ij}^{(k)}]$, где $\hat{a}_{ij}^{(k)}$ – оценка (прогноз) потребления электроэнергии подстанция 'i' в зоне 't = j' тарифа 'k'. Обозначим через X_{ik} неизвестную переменную (со значениями 0 или 1), устанавливающую, что подстанция 'i' платит по тарифу 'k', если $X_{ik} = 1$. С учетом сказанного задача оптимального перевода ТП на дифференцированные тарифы оплаты может быть представлена в виде.

Найти множество значений $X^* = \{ X_{ik}^* \}$, $i = 1, 2, \dots, N_T$, $k = 1, 2, \dots, l$, удовлетворяющее требованиям минимума оценки показателя стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов :

$$K_1 = S_{(l)} = \sum_{k=1}^l [\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{l_k} (a_{ij}^{(k)} - W_{in} \eta \lambda_j) C_j^{(k)} X_{ik})] \Rightarrow \min_{X_{ik} \in D_X \cap D_P}, \quad (3.5)$$

$$D_X = \{ \sum_{k=1}^l X_{ik} = 1; i = 1, \dots, N_T \}, \quad X_{ik} \in \{0, 1\}, \quad (3.6)$$

$$D_P = \{ (i, j) : i, j \in N_T; \sum_{(i, j) \in D_N} P(X_{ik}, X_{jk}) = 0; P(\alpha, \beta), \alpha, \beta \in \{0, 1\}; k \in l \}. \quad (3.7)$$

В (3.5) W_{in} – энергоемкость накопителя i-ой ТП, η – КПД накопителя энергии или же собственных источников энергии железнодорожного транспорта;

$\lambda_j \in \{-1; 0; 1\}$, причем $\lambda_j = 1$ соответствует максимальному значению $C_{jt}^{(k)}$, $\lambda_j = -1$ соответствует минимальному значению $C_{jt}^{(k)}$, а 0 – остальным случаям. Ограничения (3.6) показывают, что каждая ТП относится к одному тарифу $C_t^{(k)}$, а ограничения (3.7) – задают требования, устанавливающие, что ТП с номерами $(i, j) \in D_N$ должны производить оплату по одному и тому же тарифу $C_t^{(k)}$; если для ТП_i, ТП_j такие условия выполнены, то значение функции “суммирование по модулю два” $P(X_{ik}, X_{jk}) = (X_{ik} \oplus X_{jk}) = 0$; $D_J \subseteq N_T \times N_T$ - совокупность тех пар элементов, относящихся к множеству номеров ТП, для которых заданы условия эквивалентности тарифов $C_t^{(k)}$ (3.7).

При отсутствии накопителей или же собственных источников энергии железнодорожного транспорта $W_{in} = 0$.

3.4.3. Стоимостно – технологическая модель задачи о применении ДТ учитывает технологическую связность подстанций, опыт регулирования электропотребления и другие факторы. Дополнительно к матрицам $A^{(k)}$ и другим компонентам модели (3.5) – (3.7) задается граф технологической связности подстанций

$$G(U, V, W), \quad (3.8)$$

где:

$U = (u_1, u_2, \dots, u_{N_T})$ – узлы, тяговые подстанции, $V = U * U$ – ребра, связи тяговых подстанций, $W : V \rightarrow N$ – веса, отражают значимости связей.

Граф (3.8) выполняет две функции: - 1) представляет в модели “технические возможности ТП и технологический опыт” и позволяет получить более обоснованное решение $X^* = \{ X_{ik}^* \}$, - 2) ограничивает число вариантов отнесения ТП к различным тарифам оплаты. Для задания весов ребер графа (3.8) могут использоваться данные о статистических зависимостях параметров электропотребления различных ТП для периодов (t), данные о наличии на ТП накопителей энергии, данные о перетоках мощности между различными ТП, экспертные методы.

Количественный учет связей, существующих между ТП, предполагает рассмотрение нового показателя. При задании связей (3.9) рассматривается новая оптимизационная задача:

определить разбиение множества узлов графа U на два подмножества $\{U_1, U_2\}$, ($l_k = 2$), минимизируя суммарный вес “разорванных” связей:

$$\{G_1(U_1, V_1, W_1); \quad G_2(U_2, V_2, W_2)\}$$

$$U_1 \subseteq U, \quad U_2 \subseteq U, \quad U_1 \cap U_2 = \emptyset, \quad U_1 \cup U_2 = U; \quad (3.9)$$

$$| U_1 | + | U_2 | = n_1 + n_2 = N_T.$$

Отношения (3.9) устанавливают свойства разбиения графа (3.8) на два подграфа – $G_1(*)$, $G_2(*)$ путем оптимального дихотомического разбиения

$$K_2(U_1, U_2) = \sum_{u_i \in U_1} \sum_{u_j \in U_2} W(u_i, u_j) \Rightarrow \min_{(U_1, U_2 \in D_U)} . \quad (3.10)$$

На основе задания соотношений (3.5) – (3.10) получают двухкритериальную стоимостно-технологическую постановку вида

$$opt(K_1(X), K_2(U)) \quad (3.11)$$

$$\{ X \in D_X \cap D_P, \quad \forall (r, q) : U_r, U_q \in D_U, \quad n_l = 0, 1, \dots, N_T \}. \quad (3.12)$$

В модели (3.11) оператор $opt(*, *)$ задает принцип компромиссной оптимальности для показателей стоимости электроэнергии $K_1(X)$ и технологической связности ТП $K_2(U)$ в точке эффективного решения X^* .

3.4.4. Реализация представленных моделей связана со значительными вычислительными трудностями комбинаторного характера, из-за большого числа ТП на ж.д. *Рекомендуется* при оценке эффективности перевода отдельной ТП, или же зафиксированного множества $J_A = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ ТП, на условия ДТ без изменения графика движения поездов применение правила вида

$$C_S = \sum c_i * A_i^s \leq c_0 * A_S . \quad (3.13)$$

где

$A^*_j = [A^*_{i,j}]_p \quad \forall j \in J_A$, - матрицы электропотребления по периодам суток;

$$A_i^s = \sum_{j \in J_A} A_{i,j}, \quad i = 1, 2, 3; \quad A_S = \sum_i A_i, \quad p = 3;$$

c_0 – одноставочный тариф; c_i – дифференцированные тарифы;

p - число тарифных зон

3.4.5. Для принятия решения о переводе электрифицированного участка на ДТ достаточно рассчитать $\hat{m}_C(\bar{c})$ – математическое ожидание цены электроэнергии и проверить отношение

$$\hat{m}_C(\bar{c}) = M[\sum \alpha_i * c_i] < c_0 , \quad (3.15)$$

где

c_0 – цена одноставочного, а c_i – цена электроэнергии согласно ДТ. Если (3.14) выполнено, то перевод линии на ДТ выгоден. Условие (3.14) позволяет установить предельные относительные объемы электропотребления по зонам ДТ, при которых рассматриваемый ДТ эффективен по стоимости.

3.4.6. Критерий (3.14) может применяться и для оценки эффективности перехода на модели ОРЭ, если характеристики c_i представляют прогнозируемые оценки цены электроэнергии в i -ом часу суток, а α_i – есть относительное электропотребление на тягу в тот же период. Обращение (3.14) в равенство позволяет рассчитать предельные значения цены электроэнергии в

заданных периодах суток, при которой переход на закупку электроэнергии в рамках модели ОРЭ экономически выгоден.

4. Оптимизация режимов движения подвижного состава с учетом методов закупки электроэнергии

4.1. Оптимизация режимов движения поездов по критерию минимума расхода электроэнергии

4.1.1. Расчет оптимальных участковых скоростей ведения поезда согласно правилам тяговых расчетов для поездной работы, а также выбор соответствующих режимов по управлению тяговыми электродвигателями и построение режимных карт (РК), являются известными базовыми задачами для реализации энергосберегающей технологии процесса перевозок. Поскольку при оптимизации по критерию минимума электропотребления расход электроэнергии не связывается ни с периодами суток, ни с местом электропотребления, в настоящее время использование этих методик имеет ограниченное применение. В частности, такие режимы могут быть рекомендованы, если в условиях ОРЭ изменение цены электроэнергии за время движения можно не учитывать, а при использовании ДТ движение поезда происходит в одной тарифной зоне (или преимущественно в одной).

4.1.2. Методики по расчету оптимальных режимов управления ТЭД являются более полными, чем расчеты оптимальных участковых скоростей движения, и им следует отдавать предпочтение при решении задачи ЗРВП по минимизации электропотребления на тягу поездов. Как показывает практика, факторы длины поезда, изменения напряжения на токоприемнике движущегося электровоза, потери электроэнергии в электротяговой сети от активного тока ЭПС являются существенными, в первую очередь для методик по расчету РК. Эти факторы необходимо учитывать при оптимизации управления движением поездов по критерию минимума электропотребления.

4.1.3. Расчеты участковых скоростей и режимов движения поезда по критерию минимума расхода электроэнергии являются основными для методики перевода ТП на условия ДТ, когда не допускается изменение графика движения, а также режимов ведения поездов при переменной цене электроэнергии, разд. 3.5. При отклонениях массы поезда от расчетной для прогнозирования электропотребления оптимальных режимов движения могут быть использованы уравнения (3.1). При расчете интегральной оценки электропотребления для прогнозируемого объема перевозок по электрифицированному участку возможно применение методов (3.2), (3.4), использующих данные информационных систем ВМД и ЭМД, разд. 3.4.

4.1.4. Наиболее полный учет случайных и неопределенных факторов задачи ЗРВП возможен в рамках модели стохастического оптимального управления. При этом в качестве целевой функции необходимо рассматривать оценку математического ожидания электропотребления на тягу. Учет переменного напряжения на токоприемнике ЭПС, других случайных и неопределенных факторов задачи ЗРВП, существенных при оценке показателей электропотребления, может быть выполнен в рамках двухэтапной модели стохастического программирования, в которой целевая функция равна математическому ожиданию электропотреблению оптимального режима движения плюс дополнительных затрат на корректировку режимов при их отклонении от оптимальных.

4.2. Компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов для показателей потребления и стоимости электрической энергии

4.2.1. Стоимостные показатели эффективности движения поездов, изменение цены электроэнергии по периодам суток, требуют новых подходов к разработке графиков движения и расчету режимных карт ведения поездов. Для анализа целесообразности перехода на режимы движения, оптимальные по стоимости электроэнергии, необходимо выполнить исследования

компромиссно-оптимальных решений, эффективных для вектора показателей: расхода $A(Q,t)$ и стоимости электроэнергии $C(Q,t)$ при заданном объеме перевозок Q и графике движения. Компромиссно-оптимальные режимы представляют набор условно-оптимальных режимов движения (или же участковых скоростей), которые применяются в зависимости от заданного предпочтения характеристик векторной целевой функции $(A(Q,t), C(Q,t))$.

4.2.2. Формулировка векторной задачи расчета эффективных режимов:

$$\bar{F}(x, v, u, t) = \{F_A(x, v, u, t), F_C(x, v, u, t)\} \Rightarrow \min, \quad (4.1)$$

где

$$F_A(x, v, u, t) = M[A(u, t, \theta) * C(t)], \quad (4.2)$$

$$F_C(x, v, u, t) = C[A(u, t, \theta)], \quad (4.3)$$

$F_A(*)$, $F_C(*)$ – показатели расхода и стоимости электроэнергии, $C(t)$ – дифференцированные тарифы оплаты электроэнергии (отношение цен для ночного, полупикового и пикового периода суток – 0,25:1,08:1,8); $M[*]$ – знак математического ожидания.

4.2.3. Компромисс показателей $\{F_A(*), F_C(*)\}$ обусловлен резким изменением стоимости электроэнергии $C(t)$ при переходе поезда из одной тарифной зоны в другую. Во временной зоне с меньшей ценой электроэнергии становится выгодной более высокая скорость движения, позволяющая компенсировать замедленное движение во временной зоне, имеющей более высокую цену энергии. Такой же характер изменений участковых скоростей и РК имеет место в условиях ОРЭ, когда цена электроэнергии должна *прогнозироваться* почасово.

4.2.4. Компромиссно-оптимальные режимы движения могут быть рассчитаны путем варьирования весовых коэффициентов α оптимизационных задач вида

$$(\alpha F_A(*) + (1 - \alpha) F_C(*)) \Rightarrow \min_{u \in D_U}, \quad \forall \alpha \in [0, \dots, 1]. \quad (4.4)$$

или же методом ограничений, который при задании ограничения по времени хода по участку принимает вид

$$F_A(*) \Rightarrow \min_{u \in D_U}, \quad t^{(1)} \leq t_{1(\alpha)}^{(1)}, \quad t_{1(\alpha)}^{(1)} \in [t_{1(c)}^{(1)}, t_{1(A)}^{(1)}], \quad (4.5)$$

если для цен электроэнергии по дифференцированным тарифам $c(t_1), c(t_2)$ выполнены отношения: $c(t_2) < c(t_1), t_2 > t_1$. В задачах (4.5) через $\{t_{1(c)}^{(1)}, t_{1(A)}^{(1)}\}$ обозначены времена движения $t^{(1)}$ в тарифной зоне с ценой энергии $c(t_1)$, рассчитанные согласно модели (4.4) при $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$, соответственно. При обратном отношении стоимостей $c(t_1), c(t_2)$ знаки отношений в (4.5) противоположны.

4.2.5. Исследование свойств компромиссно-оптимальных режимов ведения поездов является необходимым этапом применения стоимостных критериев оптимизации электропотребления электрифицированных линий железных дорог.

Примеры, демонстрирующие некоторые свойства компромиссно-оптимальных режимов, рассчитанных для движения пассажирского поезда, указаны в табл. 2 и на рис. 5.1 – 5.2, см. приложение.

4.3. Оптимизация режимов движения по стоимостным показателям

Расчет участковых скоростей движения поездов и выбор режимов управления ТЭД, оптимальных по критерию минимума стоимости электроэнергии, потребленной на тягу, должен учитывать возможности корректировки графика движения поездов, а также вид условий закупки электроэнергии (ОРЭ, ДТ). При этом задача о переводе ТП на многотарифную оплату решается одновременно с расчетами режимов движения поездов.

4.3.1. Условия применения дифференцированных тарифов.

4.3.1.1. Особенность расчетов режимов движения поездов, оптимальных по стоимости электроэнергии, состоит в необходимости учета как переменной цены электроэнергии по периодам суток, так и изменения цены электроэнергии по пространственным координатам. Задача выбора оптимальных режимов ведения поезда должна решаться во взаимосвязи с задачей по рациональному переводу тяговых подстанций на дифференцированный тариф.

4.3.1.2. Необходимо различать две основные формы задачи перевода ТП на дифференцированный тариф:

- при известной матрице прогнозов электропотребления на тягу поездов по временным зонам дифференцированных тарифов для каждой из ТП,
- при неизвестной матрице прогнозов электропотребления.

4.3.1.3. Зависимость режимов движения от цены электроэнергии по периодам суток обуславливает комбинаторный характер задачи по расчету оптимальных РК (участковых скоростей). Для повышения эффективности решения этой задачи может быть рекомендована итерационная процедура расчетов со следующей схемой:

- 1) на основе графика движения поездов получить оценки матриц *прогнозируемого* электропотребления по временным зонам ДТ $\bar{A}^{(0)} = \{A_{i,j}^{(0)}\}$, установить номер этапа $k = 0$;

- 2) на основе $\bar{A}^{(k)}$ задать распределение ТП(k) по ДТ(k), используя модель (3.6) – (3.8) или же (3.15); заменить $k \leftarrow (k + 1)$; расчет оптимальных условий применения ДТ(k) определяет функцию цены электроэнергии $C^{(k)}(x,t)$;

- 3) рассчитать режимы движения поезда $PK^{(k)}$, оптимальные для функции $C^{(k)}(x,t)$, определить *расчетные* матрицы электропотребления тяговых подстанций по зонам ДТ $\tilde{A}^{(k)} = \{\tilde{A}_{i,j}^{(k)}\}$;

- 4) если матрицы $\tilde{A}^{(k+1)} = \{\tilde{A}_{i,j}^{(k+1)}\}$ и $\tilde{A}^{(k)} = \{\tilde{A}_{i,j}^{(k)}\}$ являются “близкими”, им соответствует одно и то же распределение ТП по ДТ согласно (3.15), тогда *расчет* оптимальных режимов $PK^{(k)}$ и распределения ТП по ДТ закончен;

$\bar{A}^{(*)} = \tilde{A}^{(k+1)} = \{\tilde{A}_{i,j}^{(k+1)}\}$, перейти к п. 6);

- 5) заменить прогнозируемую матрицу $\bar{A}^{(k)}$ на расчетную для k-ого этапа процедуры $\tilde{A}^{(k+1)}$, перейти к п.2.

- 6) для матриц $\bar{A}^{(*)}$ проверить условие (3.15);

если отношение (3.15) не выполнено, то переход на дифференцированный тариф является невыгодным для ж.д., в том числе при корректировке режимов в рамках графика движения поездов.

4.3.1.4. Для получения начальных значений оценок элементов матриц прогнозируемого электропотребления $\bar{A}^{(0)} = \{A_{i,j}^{(0)}\}$, п. 4.3.1.3, соответствующих заданному графику движения поездов, используются данные о поездном положении на электрифицированных участках: число поездов различных категорий (грузовые, пассажирские и др.), находящихся на участке в каждый час суток согласно графика движения. Поскольку для оценки эффективности применения ДТ (3.15) достаточно задания относительных значений электропотребления ТП по периодам суток (для ОРЭ часам), нормируя количество поездов на участках в каждый период с учетом общего числа поездов, получают искомые матрицы прогнозированного электропотребления.

4.3.1.5. Учет особенности электропотребления каждой категории поездов выполняется путем использования относительных весовых коэффициентов, на которые умножается число поездов на участке. При расчетах коэффициентов относительного электропотребления поездов могут быть использованы методики прогнозирования, приведенные в разд. 3.4.

4.3.2. Условия оптового рынка электроэнергии.

4.3.2.1. Методики по оценке эффективности применения моделей ОРЭ должны учитывать основной фактор – на сколько влияют закупки электроэнергии на тягу на цену электроэнергии в ОРЭ. Во многих случаях этим

фактором можно пренебречь. Далее рассматриваются методы оптимизации режимов движения поездов, когда закупки электроэнергии на тягу не влияют на ее цену в ОРЭ.

4.3.2.2. Основной задачей в рамках ОРЭ является *прогнозирование* цены электроэнергии по периодам суток (часам), которая устанавливает характеристики цены $\tilde{C}(x,t)$ (п. 4.3.1.3, этап 2), необходимые для расчета оптимальных режимов движения поездов. С учетом п.4.3.2.1 она решается однократно, заменяя процедуру распределения ТП по ДТ.

4.3.2.3. Для условий ОРЭ существенным является исследование графика движения поездов на основе векторной модели: анализ компромиссно-оптимальных режимов, разд. 4.2. Целью анализа эффективных режимов движения поездов, рассчитанных с использованием функции прогноза цены электроэнергии $\tilde{C}(x,t)$, является отбор тех поездов, для которых вариации стоимости и цены являются значимыми.

4.3.2.4. Компромиссно-оптимальные режимы используются в условиях оперативного прогнозирования цены электроэнергии в ОРЭ, выполненного, например, методами экспертных систем. Они применяются при ограниченных условиях работы электротяговых сетей, когда фиксирован объем электропотребления и др.

4.3.2.5. Выбор экономически более выгодной модели оплаты за электроэнергию (ОРЭ или дифференцированных тарифов) при заданных (рассчитанных или прогнозируемых) матрицах распределения электропотребления $\tilde{A}^{(t)}$ выполняется на основе сравнения левых частей (3.16), рассчитанных для каждого из методов закупки энергии. Предпочтение отдается тому методу, для которого математическое ожидание показателя меньше.

Графики участковых скоростей компромиссно-оптимальных режимов и оценка эффективности оптимизации режимов движения по стоимости $\alpha=0.5$



$\alpha=0$



$\alpha=1$



Рис. 5.1. Графики эффективных скоростей движения пассажирского поезда

$\alpha = 0.3$



$\alpha = 0$



$\alpha = 1$



Рис. 5.2. Графики эффективных скоростей движения пассажирского поезда

На рис. 5.1 – рис. 5.2 показаны графики оптимальных скоростей движения пассажирского поезда при прохождении границы двух временных зон, имеющих разные тарифы оплаты электроэнергии (полупиковый и ночной). Коэффициент α устанавливает компромисс показателей стоимости (кривая C справа от таблицы соответствует $\alpha = 0$) и расхода электроэнергии (кривая E справа от таблицы соответствует $\alpha = 1$), когда стоимость электроэнергии не учитывается. Промежуточные значения α дают компромиссно-оптимальные решения для этих показателей (C , E). На графиках изменения скоростей поезда вдоль координаты пути вертикальной чертой показана граница, разделяющая временные зоны дифференцированных тарифов. Как видно из примеров, компромиссно-оптимальные режимы ведения поезда претерпевают существенные изменения, а характер связи показателей позволяет за счет увеличения расхода электроэнергии на 4,8% получить снижение стоимости электроэнергии на 12,5% (рис. 5.2); подобные оценки для графиков, представленных на рис. 5.1, равны: уменьшение стоимости на 11,6% при увеличении электропотребления на 11,1%.

Таблица 2

Энергия	Стоимость	α
582	430	0
581	452	0,2
562	452	0,4
563	452	0,6
554	471	0,8
559	477	0,9
555	484	1

