

# I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 629.424.2

И. А. Орловский канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

## Измерение параметров режима дизель-поезда ДЕЛ-02 во время эксплуатации и сравнение их с математической моделью

*Приведена методика и результаты измерений параметров режима дизель-поезда ДЕЛ-02 для различных случаев в процессе эксплуатации. Выполнен анализ результатов и их сравнение с результатами моделирования, разработанной ранее математической модели асинхронного тягового электропривода дизель-поезда. Показаны изменения в математической модели физических величин, не измеряемых в процессе эксплуатации.*

**асинхронный тяговый электропривод, дизель-поезд, математическая модель, моделирование**

Растет число мировых компаний операторов пассажирских перевозок, которые в проектах не электрифицированных участков железных дорог с небольшим пассажиропотоком [1] отдают предпочтение дизель-поездам (ДП). Во всех развитых странах разработаны концепции наполнения парка дизель-моторного вагонного подвижного состава, отвечающего современным требованиям. Для повышения технико-экономических показателей (скорости движения, экономичности, простоты обслуживания) в ДП серии ДЕЛ производства ХК «Лугансктепловоз» применен асинхронный тяговый электропривод (АТЭП), что стало возможным благодаря созданию мощных полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов [1, 2]. В настоящее время четыре ДП находятся в эксплуатации и два в разработке. АТЭП обладает лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с приводом постоянного тока. Однако, широкое внедрение на железных дорогах Украины АТЭП сдерживается трудностями создания его надежной и экономичной системы управления [3]. Проблемы создания такой системы вызваны 1) изменяющимися условиями работы ДП (изменяются профиль пути, условия сцепления колеса с рельсом, загруженность поезда, климатические условия, износ деталей ДП), 2) сложностью математического описания совместной работы дизеля, генератора, механического движения ДП и его частей, процессов в электрических цепях, 3) особенностями распределенной тяги, 4) невозможностью получения оптимальных алгоритмов управления из-за нелинейностей параметров АТЭП ДП [3]. В связи с этим, перспективной является разработка самонастраивающихся систем оптимального управления тяговым приводом,

обеспечивающих оптимальное согласование режимов работы силовых тяговых агрегатов АТЭП с учетом распределенной тяги, упругости механизмов и изменяющегося коэффициента сцепления колеса с рельсом. Представляет интерес использование в таких системах средств искусственного интеллекта [4–7].

Важным этапом проектирования оптимальных систем управления, обеспечивающих качественные характеристики АТЭП ДП в переходных и установившихся режимах работы, является разработка его математической модели, это позволяет формировать и исследовать динамические процессы в АТЭП ДП на стадии проектирования (аналитический синтез, анализ и компьютерное моделирование) и уменьшает трудоемкость и себестоимость исследований. Для этого с участием автора создана единая математическая модель электромеханической системы, включающая силовую электрическую схему, тяговым приводом, его систему управления и механическую часть ДП [8–10]. Предложено усовершенствование системы управления ДП, которое заключается в следующем: 1) применена векторная система управления ТАД, 2) задающим воздействием от контроллера машиниста принята скорость ДП (вместо мощности дизеля в существующей системе [1, 3]), 3) обороты дизеля поддерживаются автоматически по экономичной характеристике дизеля, 4) в системе управления распределенным приводом осуществлены дополнительные меры по обеспечению равенства моментов двигателей и снижению амплитуды колебаний между вагонами. Использование этой модели позволяет выявить основные факторы, определяющие движение ДП (колебания скоростей вагонов, тележек, колес, режимы буксования и юза, расход электрической энергии

© И. А. Орловский 2010 г.

гии), выполнить поиск настроек, обеспечивающих максимальное использование установленных мощностей, уточнить физические процессы, протекающие в АТЭП ДП. Было проведено исследование математической модели методом моделирования, однако отсутствовало сравнение результатов моделирования с данными режима реального оборудования.

Исследование параметров режима АТЭП тепловоза на математической модели рассмотрено в [11]. Модель состоит из синхронного генератора, трехфазного управляемого мостового выпрямителя, индуктивного фильтра, автономного инвертора тока, двух параллельно соединенных ТАД. В механической части привода рассматриваются два колесно-моторных блока тележки. Модель учитывает угловые колебания системы в продольно-вертикальной плоскости по отношению к оси пути и нелинейные характеристики сцепления колес с рельсами. Выполнен анализ динамики нештатных режимов, вызываемых отказами вентилей инвертора тока при отсутствии срабатывания защиты по управляющему электроду. Однако, в системе не моделируется работа дизеля, не учитываются упругости между тепловозом и вагонами и не выполнена проверка модели с реальным оборудованием.

Необходимым условием использования разработанных математических моделей является их точность, которую можно определить сравнением результатов моделирования с реальными данными режима работы оборудования. В [12] выполнена разработка системы управления, обеспечивающей движение тепловоза с тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения без проскальзывания и максимальным использованием мощности дизеля, показана эффективность использования системы поосного регулирования касательной силы тяги. Исследования выполнялись на математической модели с последующей проверкой результатов на реальном тепловозе. При этом не рассматривался распределенный привод (такой как в ДП) и ТАД с силовыми преобразователями.

Исходя из проведенного анализа, в существующей научно-технической литературе отсутствуют данные

динамических режимов работы АТЭП ДП ДЕЛ-02 во время эксплуатации и не выполнено сравнение этих результатов с данными моделирования его математической модели.

**Цель статьи.** Описание методики и представление результатов измерения параметров режимов работы АТЭП ДП ДЕЛ-02 во время эксплуатации, их анализ и сравнение с данными, полученными методом моделирования его математической модели.

### Общее устройство АТЭП ДП

Упрощенная схема ДП ДЕЛ-02, состоящего из трех вагонов: двух моторных (М1 и М2) и одного пассажирского, показана на (рис. 1). В каждом моторном вагоне установлено по два ТАД (обозначенных на рис. 1, как Д1, Д2, Д3, Д4), каждый из которых через редуктор приводит во вращение одну колесную пару. Связь между вагонами представляется упругим звеном без зазора и гасителей колебаний.

На рис. 1 для пояснения измеряемых далее величин сделаны следующие обозначения:  $m_1, m_2, m_3, m_4$  – электромагнитные моменты, развиваемые двигателями Д1, Д2, Д3, Д4 соответственно;  $F_{C1}, F_{C2}, F_{C3}$  – силы сопротивления движению первого, второго и третьего вагонов соответственно;  $C_{12}, C_{23}$  – коэффициенты упругости между первым и вторым, и вторым и третьим вагонами;  $m_M$  – масса моторного вагона,  $m_P$  – масса пассажирского вагона;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – радиусы колес первой, второй, третьей и четвертой моторной пары соответственно;  $V_1, V_2, V_3$  – скорости первого, второго и третьего вагонов соответственно;  $F_{12}, F_{23}$  – силы, действующие через сцепки между первым и вторым, вторым и третьим вагонами поезда соответственно.

Функциональная схема тягового привода одного моторного вагона ДП ДЕЛ-02(04) приведена на рис. 2. Тяговые двигатели каждого моторного вагона питаются от синхронного генератора через неуправляемые выпрямители (В1 и В2) и автономные инверторы напряжения (АИН1 и АИН2). Генератор приводится во вращение дизелем, который оснащен электронным ре-

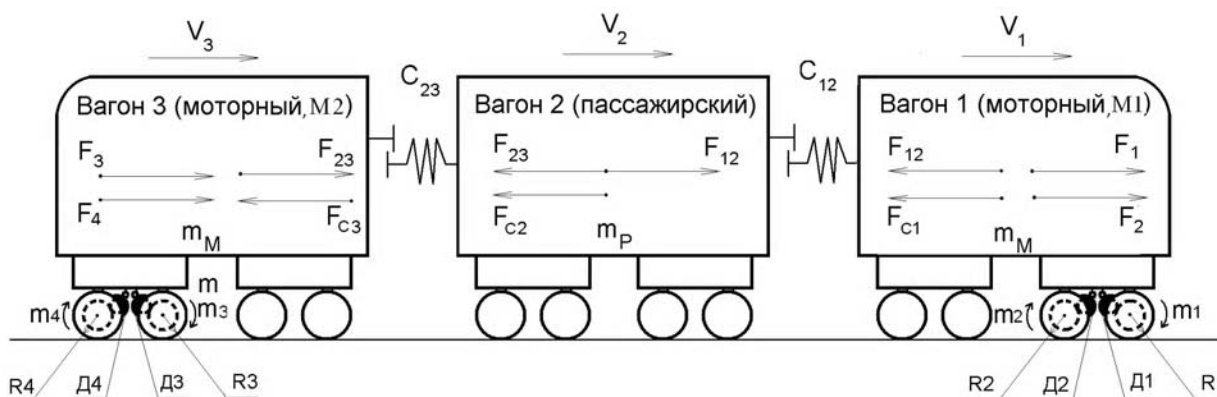


Рис. 1. Упрощенная схема ДП

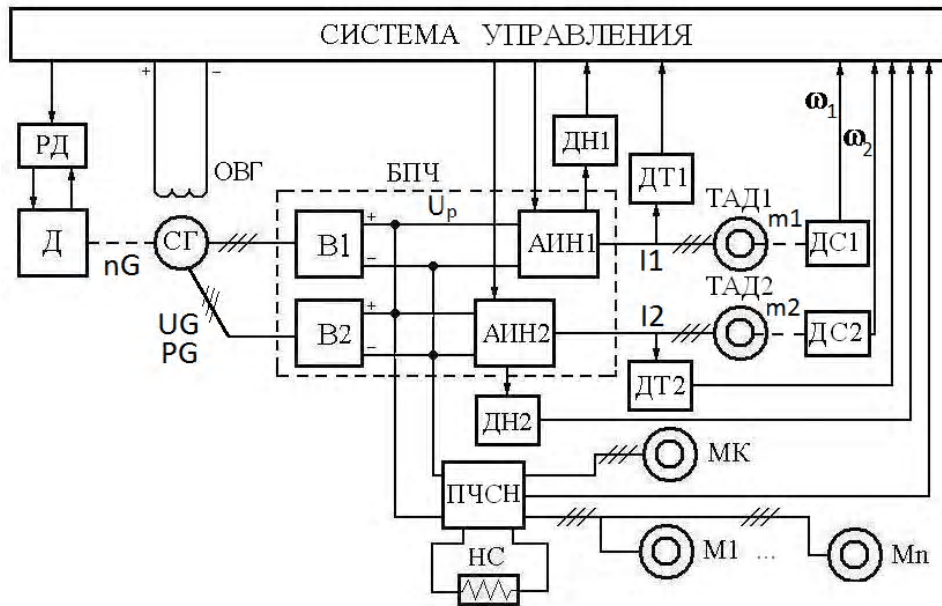


Рис. 2. Функциональная схема силовой электропередачи одного моторного вагона ДП ДЕЛ-02(04)

гулятором [1, 3, 13]. Для питания системы управления и вспомогательных механизмов (компрессоров, кондиционеров, отопительной системы и др.) установлен преобразователь частоты собственных нужд ПЧСН. АИН обеспечивают изменение амплитуды и частоты основных гармоник трехфазных напряжений, питающих ТАД [2]. В тяговом режиме мощность передается от источника питания к ТАД, а в режиме торможения – от ТАД к тормозным резисторам. На рис. 2 обозначены величины, измеряемые в процессе исследований.

Для управления движением поезда машинист задает частоту вращения дизеля (уровень мощности), изменяя позицию контроллера машиниста. Заданный уровень мощности, отработанный дизелем, сравнивается с используемой мощностью АТЭП и оборудования собственных нужд и по запасу свободной мощности изменяется ток в обмотке возбуждения синхронного генератора и, следовательно, выходное напряжение на его статорных обмотках. Характер движения ДП определяется свободной мощностью дизельной установки [1, 3]. Управление оборудованием осуществляет комплектное устройство автоматики. На вход его приходят сигналы от машиниста, сигналы управления мощностью от электронного регулятора дизеля и сигналы электрических и механических величин электропередачи.

Система управления напряжением ТАД выполнена двухконтурной. Внешний контур регулирует возбуждение тягового синхронного генератора и задает величину напряжения, подводимого ко входу инверторов напряжения. Внутренний контур осуществляет регулирование частоты напряжения ТАД. Управление тяговыми инверторами выполняется по скалярному принципу: изменением частоты и амплитуды напряжения, которое подается на ТАД. При пуске регулирование

происходит по закону  $U/f = \text{const}$ , а в установившемся режиме – по экономичному закону М. П. Костенко [1, 3, 13].

При возникновении буксования колес система управления вырабатывает сигнал на уменьшение магнитного потока синхронного генератора, благодаря чему уменьшается напряжение на выходе генератора, падают моменты ТАД, уменьшается их угловая скорость и буксование исчезает. Далее система управления восстанавливает значение магнитного потока синхронного генератора. В режиме электрического торможения (до скоростей ДП, не превышающих 5 км/час) энергия от двигателя через автономный инвертор, работающий в данном режиме как выпрямитель, поступает в звено постоянного тока, где рассеивается в тормозном резисторе [1, 3].

### Измерения параметров режимов работы АТЭП ДП в условиях эксплуатации

Для анализа работы ДП и сравнения измеренных параметров режима с математической моделью использовалась карта сокращенного продольного профиля пути Вапнярка-Христиновка, разработанная Одесжелдорпроектом. Участки этой карты, при прохождении которых выполнялись измерения, приведены на рис. 3 и рис. 4, руководящий подъем составлял 11 тысячных, цифрами в кружках показаны участки пути для соответствующих случаев.

Исследования работы ДП в условиях эксплуатации выполнялись для четырех случаев.

*Первый случай.* Режим разгона при создании моментов всеми четырьмя двигателями. Запись значений величин осуществлялась каждые 0,2 с, что объясняется имеющимися возможностями существующей на ДП

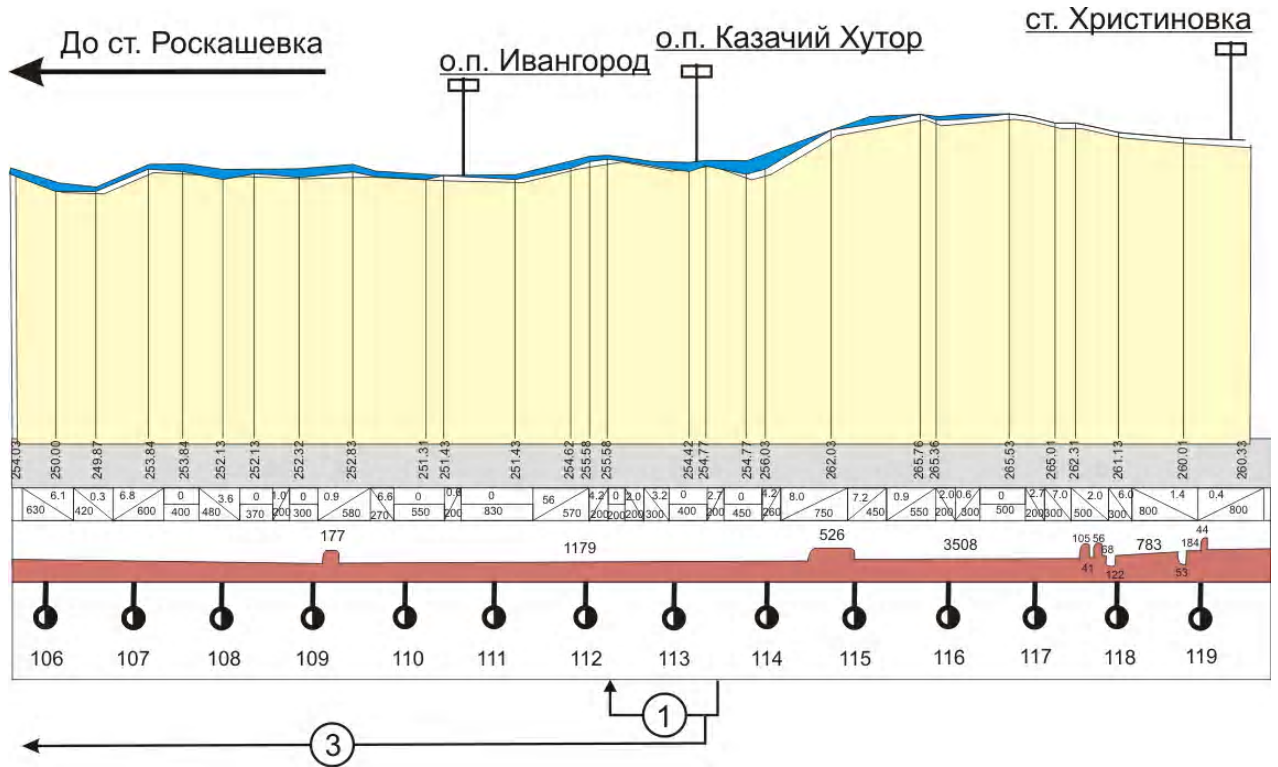


Рис. 3. Карта сокращенного профиля пути на первых километрах от Христиновки до Вапнярки

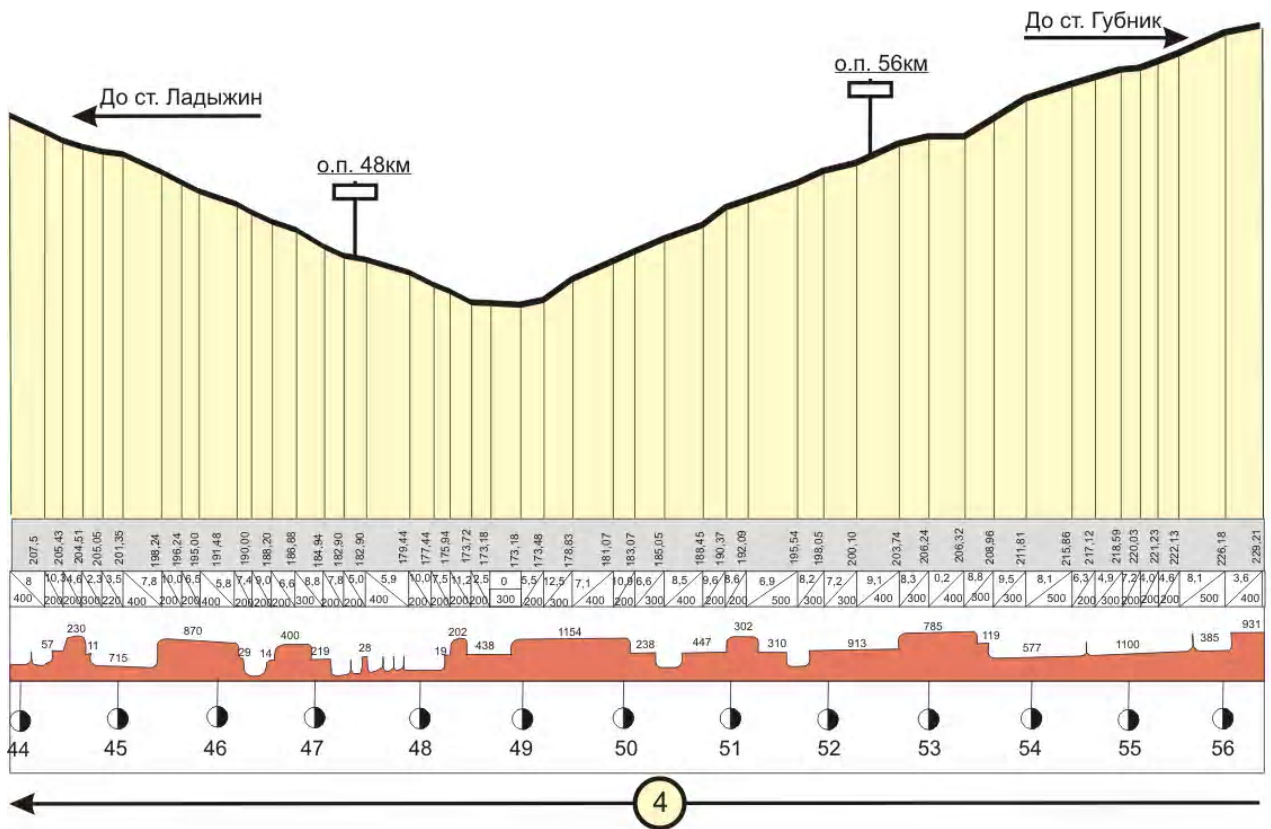
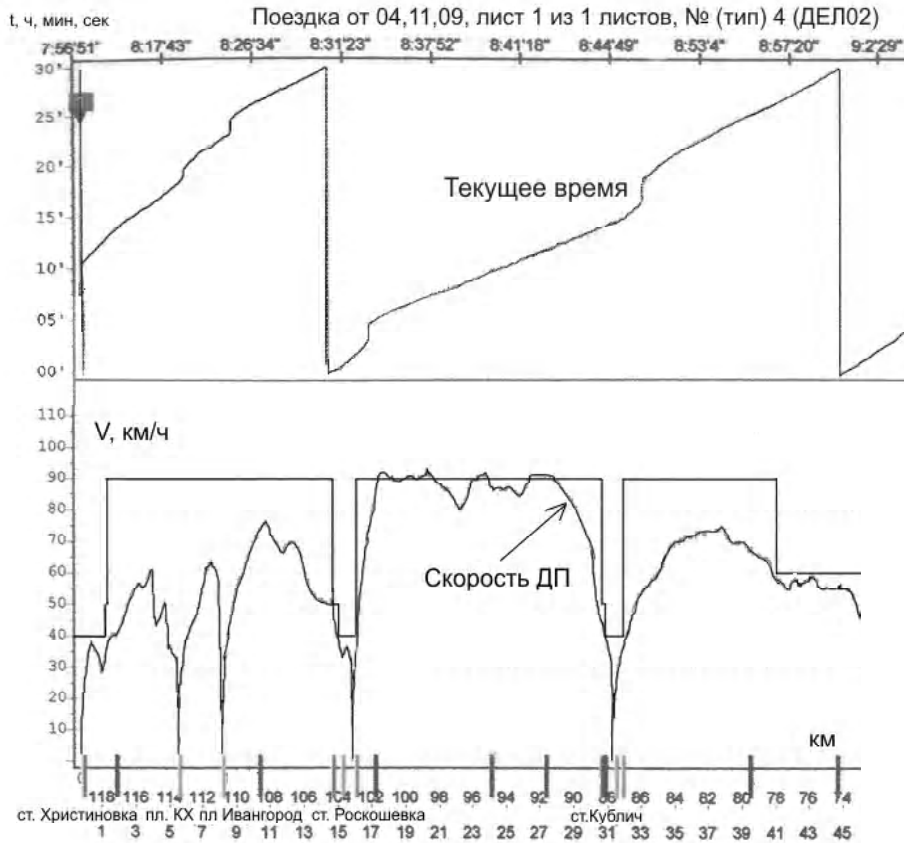
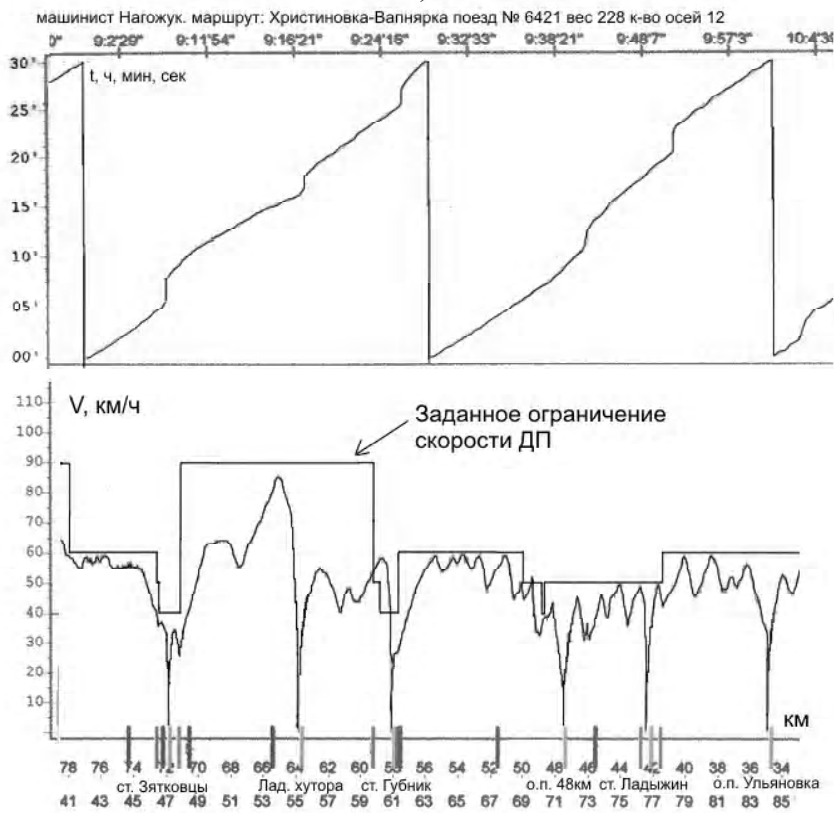


Рис. 4. Карта сокращенного профиля пути на спуске и определяющем подъеме участка Христиновка–Вапнярка



а)



б)

Рис. 5. Фрагменты результатов записи пройденного пути и времени, регистрируемые флеш-картой машиниста; а) – начало движения, б) прохождения спуска и определяющего подъема

системы хранения и отображения информации. Так как зафиксированные в многофункциональном дисплее машиниста данные необходимо переписывать вручную, результаты представлены для 30 секунд (что превышает 1000 измерений).

*Второй случай.* Режим разгона при создании тяговых моментов двумя двигателями одного моторного вагона в течение 200 секунд.

*Третий случай.* Режимы разгона, движения с разными установившимися скоростями и торможения на прямолинейном участке в течение 34 минут.

*Четвертый случай.* Режимы движения ДП на уклонах с применением электрического торможения в течение 25 минут.

Для третьего и четвертого случаев данные снимались один раз в минуту непосредственно во время дви-

жения ДП. Программа исследований включала в себя измерения для всех рассмотренных случаев частот вращения дизелей и ТАД, токов, напряжений и мощностей в силовом оборудовании АТЭП ДП; определение режимов, когда возникают буксование и юз колес ДП.

Измерения проводились совместно со специалистами моторвагонного депо Христиновка Одесской железной дороги на участке ст. Христиновка – ст. Вапнярка в ноябре 2009 года в дневное время суток во время поездки ДП с пассажирами согласно расписанию. Погодные условия при выполнении испытаний следующие: температура – 0 °С, влажность – 90 %, осадков и ветра нет.

Для выполнения измерений использовались датчики, устройства измерения, измерительные блоки тока, напряжения частоты вращения, скорости, пути, вычис-

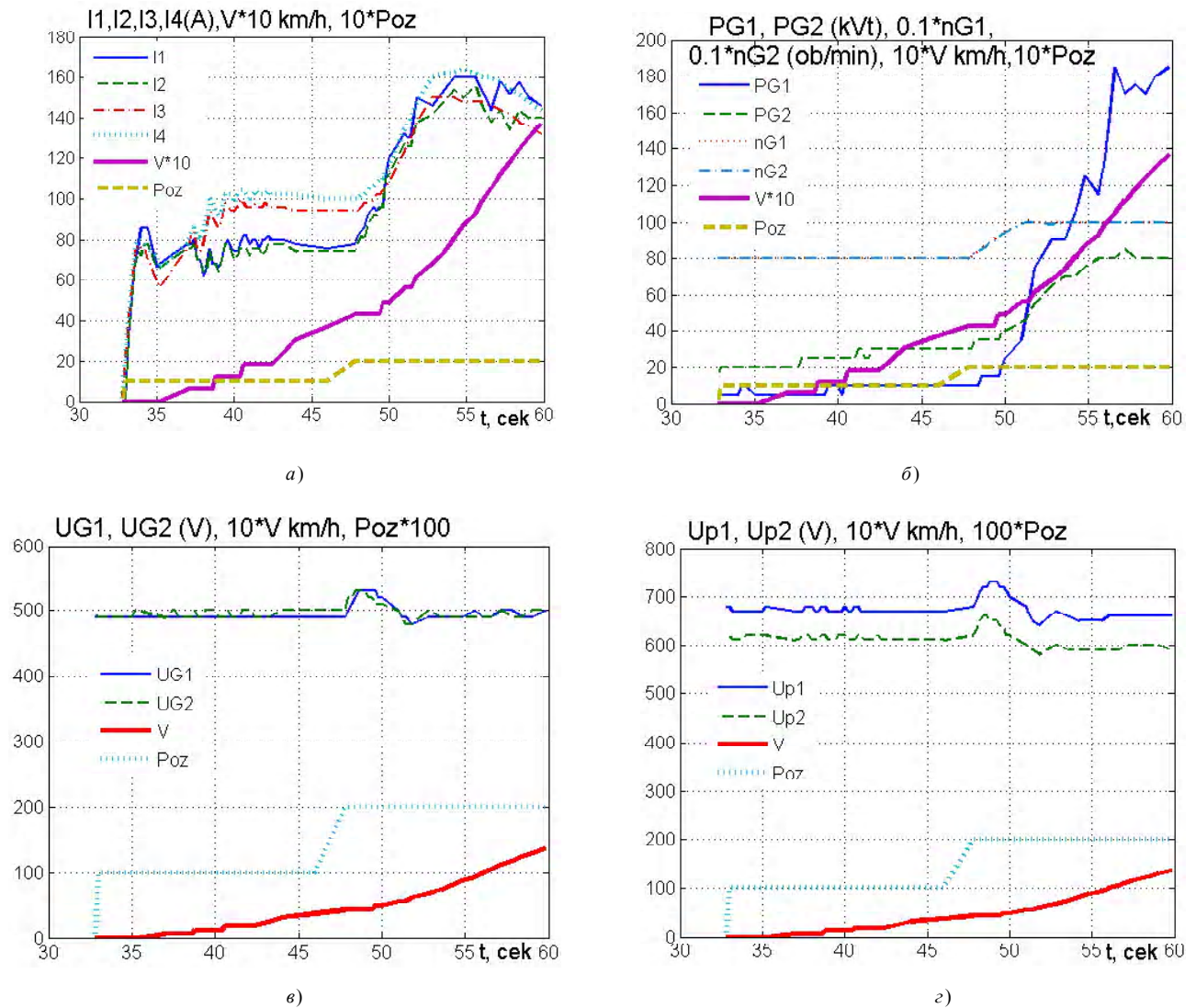
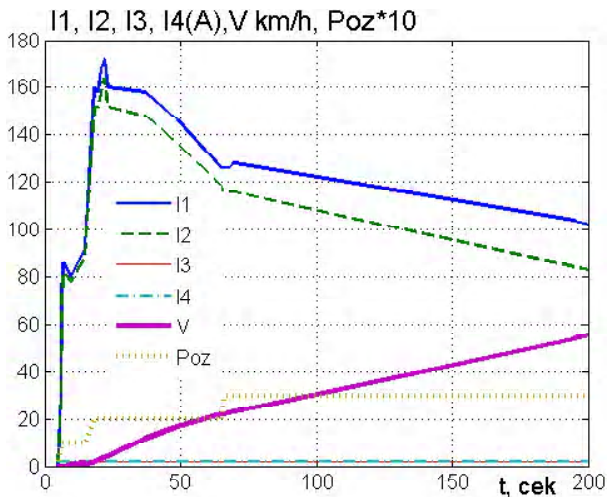
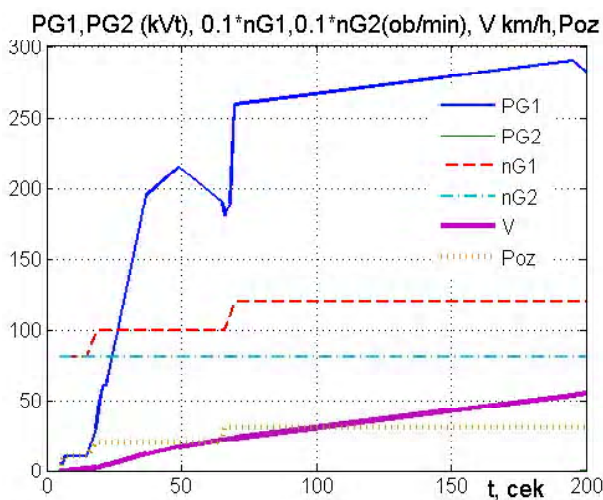


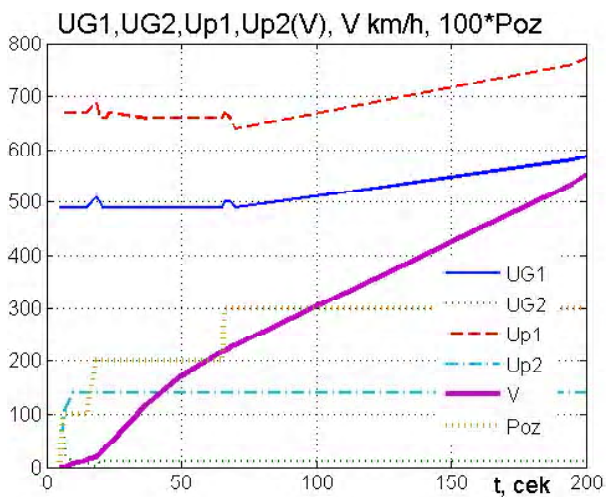
Рис. 6. Результаты измерений параметров режима ДП для первого случая; а) диаграммы токов ТАД; б) диаграммы мощностей и числа оборотов синхронных генераторов; e) диаграммы напряжений синхронных генераторов; з) диаграммы напряжений постоянного тока силовых преобразователей; на всех рисунках показаны скорость поезда и значение позиции контроллера машиниста



а)



б)



в)

Рис. 7. Результаты измерений параметров режима ДП для второго случая; а) диаграммы токов ТАД; б) диаграммы мощностей и числа оборотов синхронных генераторов; в) диаграммы напряжений синхронных генераторов и напряжений постоянного тока силовых преобразователей; на всех рисунках показаны скорость поезда и значение позиции контроллера машиниста

ленные значения мощностей, выносные индикаторы, многофункциональный дисплей машиниста, установленные в АТЭП и системе управления ДП.

Кроме данных, фиксирующихся в многофункциональном дисплее машиниста, использовалась запись пройденного пути и времени на флеш-карте машиниста, фрагменты которой для участков, где выполнялись измерения, представлены на рис. 5.

Результаты измерений параметров режима ДП для первого случая показаны на рис. 6. Данные снимались при разгоне ДП от платформы Казачий хутор от 5,5 км до 6 км от ст. Христиновка (или от 113,5 км до 113 км от ст. Вапнярка, рис. 3) с 8 ч. 18 мин. 32 с до 8 ч. 18 мин. 60 с через каждые 0,2 секунды. Движение ДП, согласно карте профиля пути рис. 3, выполнялось на ровном участке (без уклонов и поворотов).

Измеряемые величины показаны на рис. 6–рис. 9 линиями разного типа и разной толщины. Для них сделаны следующие обозначения: I1–I4 действующие значения токов, соответственно, первого – четвертого ТАД; V – скорость поезда; Poz – позиция контроллера машиниста (со знаком «минус» показаны позиции при электрическом торможении); UG1 и UG2 – напряжения синхронных генераторов; PG1 и PG2 – мощности нагрузки синхронных генераторов; nG1 и nG2 – число оборотов дизелей, следовательно, и синхронных генераторов, первого и второго моторного вагонов, соответственно; Up1 и Up2 – напряжения постоянного тока силовых преобразователей. Например, толстой сплошной линией на рис. 6 дана скорость поезда V.

Результаты измерений параметров режима ДП для второго случая показаны на рис. 7. Данные снимались при разгоне ДП на 32 км от ст. Христиновки (или 87 км от ст. Вапнярка) с 8 ч. 47 мин. 05 с до 8 ч. 51 мин. 50 с через 0,2–10 с при снятом возбуждении синхронного генератора второго моторного вагона, следовательно, при создании тяговых моментов двумя ТАД первого моторного вагона. Движение ДП, согласно рис. 4, также выполнялось на ровном участке (без уклонов и поворотов).

Для третьего случая результаты измерений даны на рис. 8. Измерения выполнялись, примерно, через 1 минуту, в течение более длительного времени с 8 ч 32 мин до 8 ч 53 мин на участке с 5 по 35 км от ст. Христиновка. Рассматривались разгон, торможение и движение ДП с постоянной скоростью на участке, не имеющем практически поворотов и уклонов.

Графики измеряемых величин для четвертого случая приведены на рис. 9. Измерения выполнялись при спуске и подъеме ДП с 59 км (58) по 77 км (42) от ст. Христиновка (Вапнярка) (рис. 4) в течение времени с 9 ч 25 мин до 9 ч 51 мин. Выполнялись также измерения при электрическом торможении поезда на 1–3 позициях торможения контроллера машиниста.