

Рис. 8. Результаты измерений параметров режима ДП для третьего случая; а) диаграммы токов ТАД; б) диаграммы мощностей синхронных генераторов; в) диаграммы напряжений синхронных генераторов и значения позиции контроллера машиниста; г) диаграммы напряжений постоянного тока силовых преобразователей; на всех рисунках показана скорость поезда

Анализ полученных экспериментальных результатов

Из рис. 6 видно, что при переключении контроллера машиниста в позицию 1 на 33 с начинается движение поезда, вызванное увеличением токов и, следовательно, моментов ТАД. В интервале времени от 38 с до 47 с создаются разные токи ТАД (например, на 41 с максимальные и минимальные значения токов ТАД равны 72 А и 102 А). При этом отличия токов достигает 30 А, что для тока 72 А составляет 41,5 %. Мощности развиваемые генераторами первого и второго моторных вагонов составляют 10 и 30 кВт соответственно.

При переключении на 47 с позиции контроллера машиниста в положение 2 одинаково увеличиваются обороты обоих дизелей с 800 об/мин до 1000 об/мин. Мощности генераторов возрастают до 180 кВт и 80 кВт соответственно. Токи ТАД находятся в ограничении,

отличаются незначительно и составляют 150–160 А, ускорение разгона ДП при этом максимальное и составляет 0,33 м/сек². Напряжения обоих генераторов (рис. 6, в) сразу при возрастании оборотов дизелей на 48 с увеличивается и после нескольких секунд поддерживается на первоначальном уровне 490–500 В. Выпрямленные напряжения преобразователей (рис. 6, г), соответственно, составляют 670 и 610 В (отличие около 10 %), эти напряжения возрастают при увеличении напряжений генераторов и далее (при максимальных токах ТАД) поддерживается на уровне 660 и 610 В соответственно.

В режиме максимальных токов мощность, потребляемая от второго генератора, значительно ниже мощности, потребляемой от первого генератора, при этом отсутствуют броски токов ТАД, питающихся от напряжения второго генератора, и присутствуют броски токов ТАД, питающихся от напряжения первого генера-

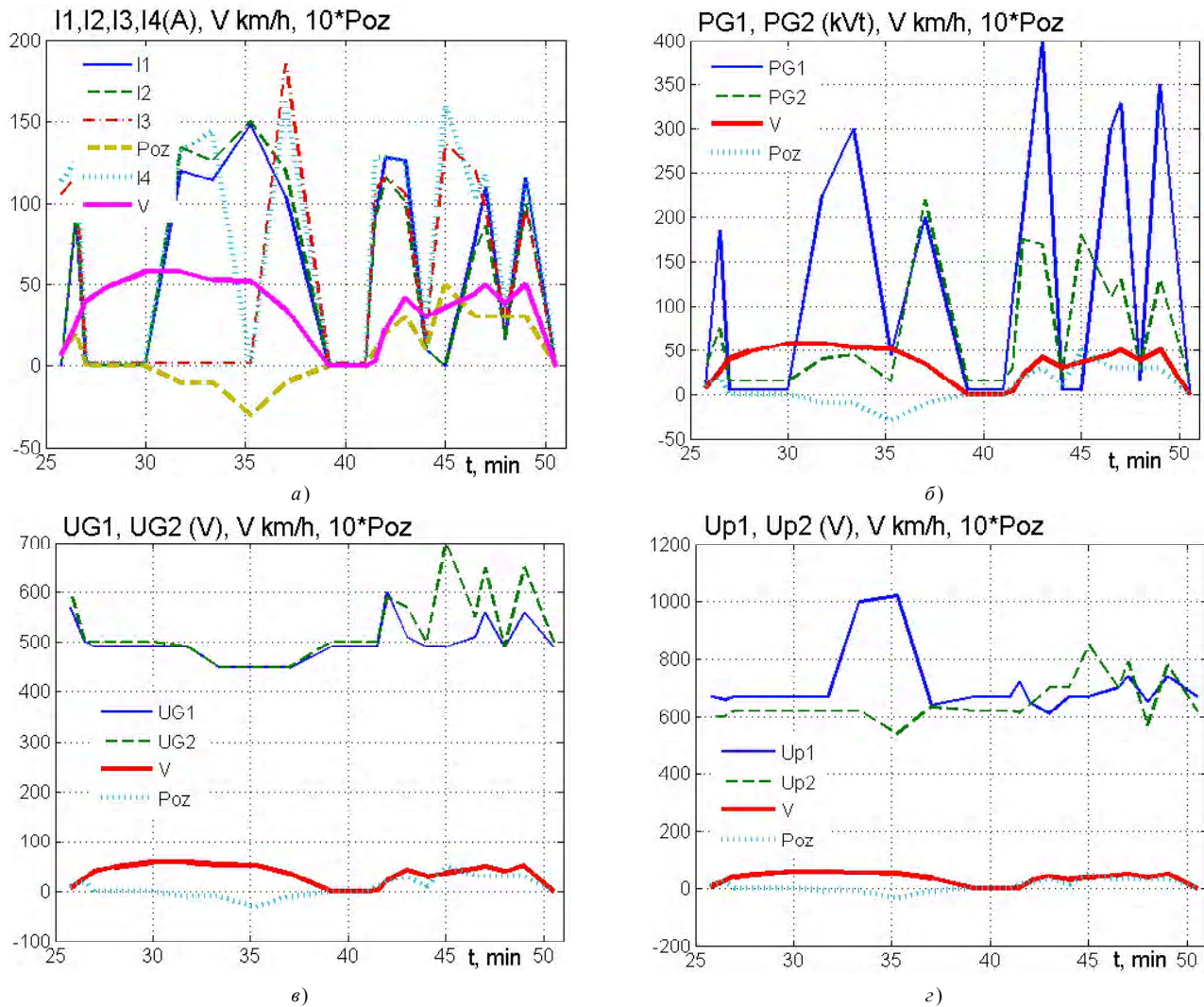


Рис. 9. Результаты измерений параметров режима ДП для четвертого случая; а) диаграммы токов ТАД; б) диаграммы мощностей синхронных генераторов; в) диаграммы напряжений синхронных генераторов; г) диаграммы напряжений постоянного тока силовых преобразователей; на всех рисунках показаны скорость поезда и значение позиции контроллера машиниста

тора, до 15 А. Период колебаний токов на 37–42 с всех тяговых двигателей и на 56–58 с тяговых двигателей первого моторного вагона составляет около 1,2 с.

Отличие токов двигателей и, следовательно, их моментов на 37–42 с можно объяснить разницей диаметров моторных колес. При отбожке бандажей колесных пар выставляется требование обеспечения одинакового диаметра колес в колесной паре, при этом диаметры бандажей разных моторных колесных пар могут отличаться друг от друга. Это приводит к отличию механических характеристик тяговых приводов моторных колесных пар. В нашем случае диаметры моторных колес первого моторного вагона меньше, чем диаметры моторных колес второго моторного вагона.

Колебания с периодом 1,2 с можно объяснить продольными колебаниями вагонов за счет имеющихся упругостей в тележках и буферах между вагонами. При работе на общий механический вал (т. е. на общую массу поезда и неподвижные рельсы) линейные скорости

колес по кругу катания должны быть одинаковые. При разных диаметрах колес возникают разные угловые скорости двигателей, что, при подаче одинакового задания на скорость ТАД и жестких механических характеристиках тяговых приводов, формирует разные моменты ТАД и, следовательно, разные токи двигателей (рис. 6, а).

Несколько раз в начале движения за всю поездку Христиновка-Вапнярка-Христиновка (количество остановок более 30) на доли секунды возникало буксования, что фиксировалось на дисплее машиниста.

Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования математической модели

Значения измерений, полученных во время эксплуатации ДП, сравнивались с результатами моделирования математической модели АТЭП ДП, особенности которой отмечены в начале статьи, а достаточно подробное описание дано в работах [8–10].

В установившемся режиме отличия действующих значений токов ТАД (при управлении от векторной и скалярной систем управления) незначительны [14]. Так как разгон ДП осуществляется за десятки или сотни секунд, то отличия процессов в ТАД от процессов, возникающих при работе в установившемся режиме, также незначительны, что позволяет выполнить корректное сравнение действующих значений токов, протекающих в реальном АТЭП ДП со скалярной системой управления, и на модели с векторной системой управления.

В математической модели АТЭП с векторной СУ используются модели идеализированных ТАД и преобразователей частоты с АИН-ШИМ, которые могут задаваться в виде двух возможных вариантов: 1) – на идеальных силовых ключах с учетом дискретности свойств силовых ключей управляемых выпрямителей и автономных инверторов, 2) – в виде линеаризованных передаточных функций замкнутых контуров регулирования намагничивающей и активной проекций статорного тока, скорости двигателя [10].

В [9, 10] выполнено моделирование режимов работы АТЭП ДП с использованием второго варианта. В [8] моделировались режимы работы АТЭП ДП с использованием, как первого, так и второго варианта. Результаты показали, что при создании одинаковых электромагнитных моментов ТАД для разных вариантов возникали разные мгновенные значения токов и моментов ТАД и достаточно близкие результаты (отличия не превышали 10 %) для действующих значений токов ТАД. При развиваемых одинаковых электромагнитных моментах ТАД, действующие значения токов ТАД для первого варианта всегда больше, чем для второго, так как во втором варианте моделируется только первая (основная) гармоника токов ТАД, а в первом варианте в спектре токов присутствуют различные гармоники.

Моделирование для первого варианта даже одного ТАД с дизелем и синхронным генератором без моделирования проскальзывания и распределенной тяги потребовало в десятки раз больше времени и объема оперативной памяти компьютера, чем при моделировании всего распределенного АТЭП ДП с моделированием проскальзывания и распределенной тяги для второго варианта. Поэтому моделирование выполнялось для второго варианта математической модели.

Для приближения этой математической модели условиям реального эксперимента в ней выполнены следующие изменения: обороты дизелей задавались позицией контроллера машиниста; осуществлялось плавное задание скорости вращения ТАД по остаточной мощности дизелей; изменены скорости вращения дизелей в пределах от 800 до 2100 об/мин (как в дизелях ДП ДЕЛ-02(04)). При моделировании приводного модуля 12V183ДЕ, состоящего из дизеля 183TD13 и синхронного генератора DRTBZ3509-6с, задавались следующие параметры: постоянная времени дизеля по возмущающему воздействию $T_{\mu} = 3$ с; постоянная времени дизеля

по управляющему воздействию $T_{\lambda} = 3$ с; активное сопротивление обмотки статора синхронного генератора $R = 0,216$ Ом; постоянная времени обмотки возбуждения генератора $T_B = 0,5$ с. Задавались передаточные числа редукторов $i = 2,47$ и значения внутренних параметров тяговых двигателей АД906У1. К массам моторных вагонов $m_M = 64$ т и пассажирского вагона $m_P = 46$ т добавлялись массы пассажиров в этих вагонах, коэффициенты упругости между вагонами $C_{12} = C_{23} = 938600$ Н/м, силы сопротивления движению вагонов F_{C1} , F_{C2} и F_{C3} вычислялись по уравнениям удельного сопротивления движению ДП [1, 3].

При моделировании первого случая рассматривались три варианта. Для первого варианта задавались небольшие отличия в радиусах тяговых колес: $R_1 = 0,4700$ м, $R_2 = 0,4704$ м, $R_3 = 0,4741$ м, $R_4 = 0,4750$ м при удвоении жесткостей упругостей между вагонами. Для второго варианта задавались большие отличия в радиусах тяговых колес: $R_1 = 0,464$ м, $R_2 = 0,467$ м, $R_3 = 0,4735$ м, $R_4 = 0,475$ м. Для третьего варианта задавались радиусы колес такие же, как во втором варианте, и задавались дополнительные обратные связи в системе управления и корректоры разности моментов ТАД и разности скоростей вагонов [9, 10].

Результаты моделирования для первого варианта первого случая представлены на рис. 10.

При моделировании задавались значения позиции контроллера машиниста и задание скорости ДП такие же, как при реальном движении ДП. Сопротивления движению вагонов поезда задавались с использованием уравнения основного удельного сопротивления, так как повороты и уклоны для этого случая отсутствуют, поэтому отличия в оборотах дизелей и скорости ДП в модели и в реальном эксперименте практически отсутствуют. Максимальные отличия мгновенных значений токов ТАД не превышают 25 %. Значения выпрямленного напряжения для обоих моторных вагонов одинаковые, отличия этих напряжений для второго вагона не превышают 16 %.

В АТЭП ДП формирование импульсов управления силовыми ключами выполняется по алгоритмам фирмы «Стромберг», что увеличивает спектр гармоник по сравнению с ШИМ модуляцией, используемой в математической модели, это объясняет возникновение меньших на 10–30 % действующих значений токов ТАД в математической модели по сравнению с реальными значениями.

Преимуществом математической модели является также то, что можно проследить изменения величин, измерения которых сложно или невозможно. Так на рис. 10, б показаны изменения моментов ТАД. На рис. 10, в показаны изменения разностей скоростей вагонов. На рис. 10, д – сил сопротивления движению вагонов ДП и сил, действующих между вагонами через сцеп-

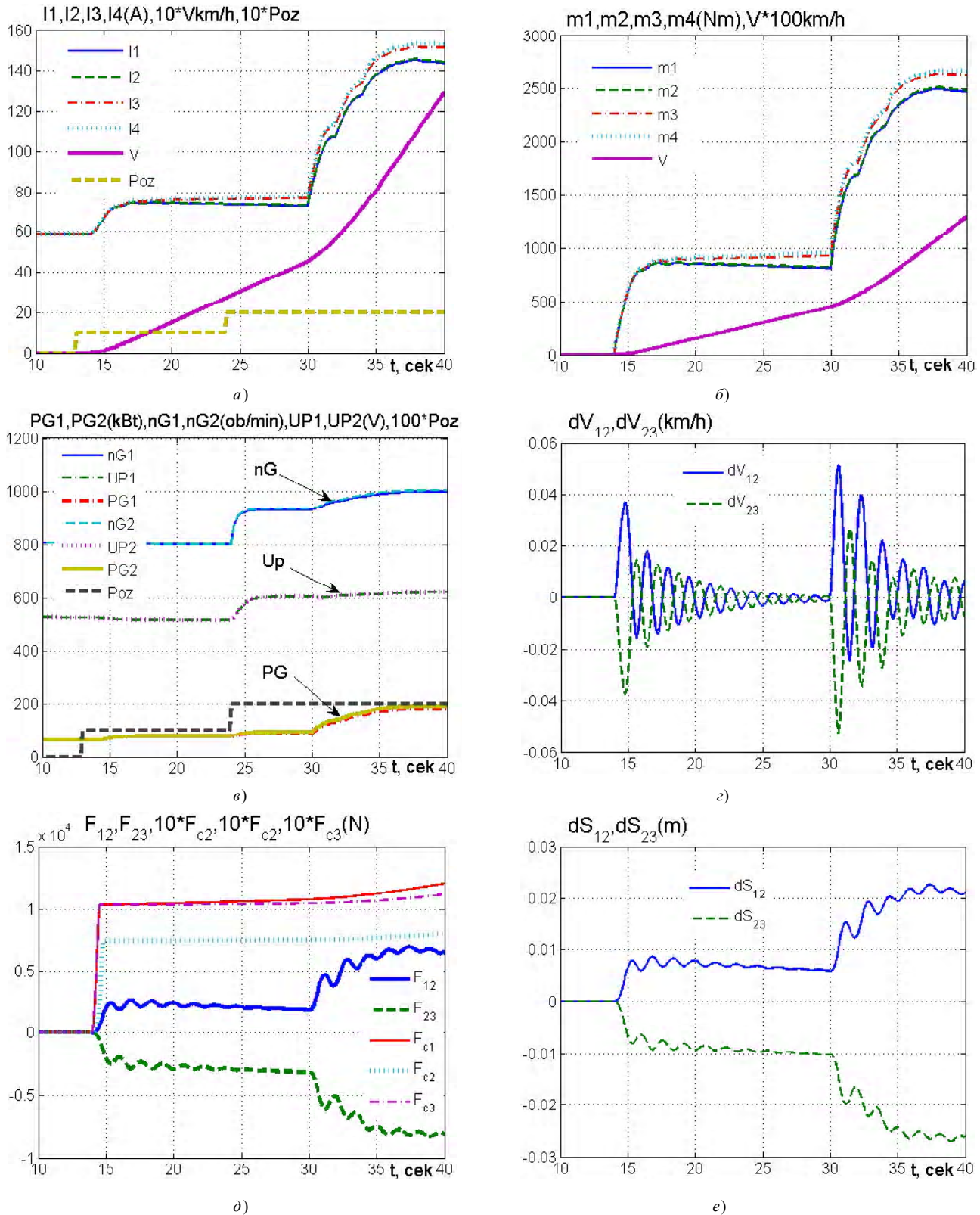


Рис. 10. Результати моделювання параметрів режиму ДП для першого випадку при розгоні ДП для першого варіанта (с малим відхиленням радіусів колес і підвищеною жорсткістю еластичностей між вагонами): а) токи ТАД, швидкість поїзда і позиція контролера машиніста; б) моменти ТАД і швидкість поїзда; в) число оборотів синхронних генераторів, швидкість поїзда і позиція контролера машиніста; г) різниці швидкостей вагонів і сили між вагонами; д) сили між вагонами і сили опору руху кожному вагону; е) зміни відстаней між вагонами

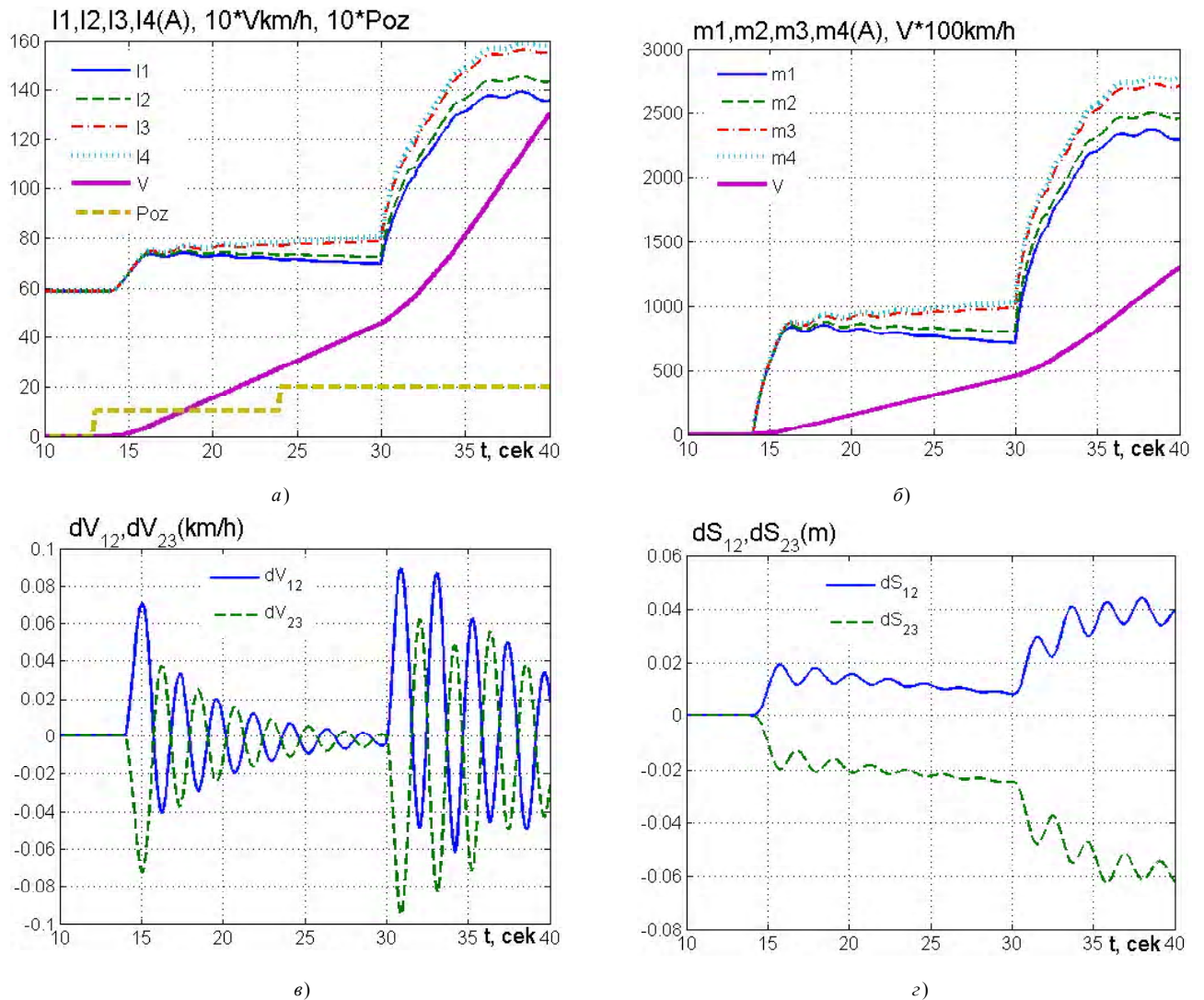


Рис. 11. Результаты моделирования параметров режима ДП для первого случая при разгоне ДП для второго варианта (с большим отличием радиусов колес); а) токи ТАД, скорость поезда и позиция контроллера машиниста; б) моменты ТАД и скорость поезда; в) разности скоростей вагонов; г) – изменения расстояний между вагонами

ку. На рис. 10, е – изменения расстояний между вагонами. При этом амплитуда колебаний сил между вагонами превышает 1000 Н. Колебания изменений расстояний между вагонами во время разгона достигают 3 см. Амплитуды колебаний разностей скоростей вагонов достигают 0,04 км/ч. Период колебаний, рассмотренных выше величин, составляет 1,6 с, что превышает период колебаний в эксперименте на 30 %. При увеличении в модели установленных коэффициентов упругостей между вагонами период колебаний уменьшается и может точно соответствовать периоду колебаний в эксперименте.

Из-за разных радиусов колес возникают отличия токов и моментов ТАД, однако эти отличия в модели для первого варианта меньше, чем в эксперименте. Для исследования процессов при большем отличии радиусов колес рассматривается второй вариант моделирования.

На рис. 11 показаны результаты моделирования па-

раметров режима разгона ДП с большим отличием радиусов моторных колес и первоначально заданной жесткостью упругостей между вагонами. В этом случае значительно возрастают разницы между токами тяговых двигателей (рис. 11, а), подобная разница возникает и между моментами этих двигателей (рис. 11, б). Отличия максимальных разностей токов ТАД в эксперименте и на модели также не превышают 25 %. С уменьшением жесткости увеличиваются амплитуды колебаний разностей скоростей между вагонами, амплитуды колебаний расстояний между вагонами, увеличивается период колебаний.

При осуществлении коррекции моментов ТАД и скоростей вагонов (см. работы [9, 10]) (моделируется для третьего варианта), осуществляется практическое равенство моментов двигателей и в несколько раз снижается амплитуда и частота колебаний разностей скоростей вагонов (рис. 12).

Сигналы о разности скоростей вагонов могут быть

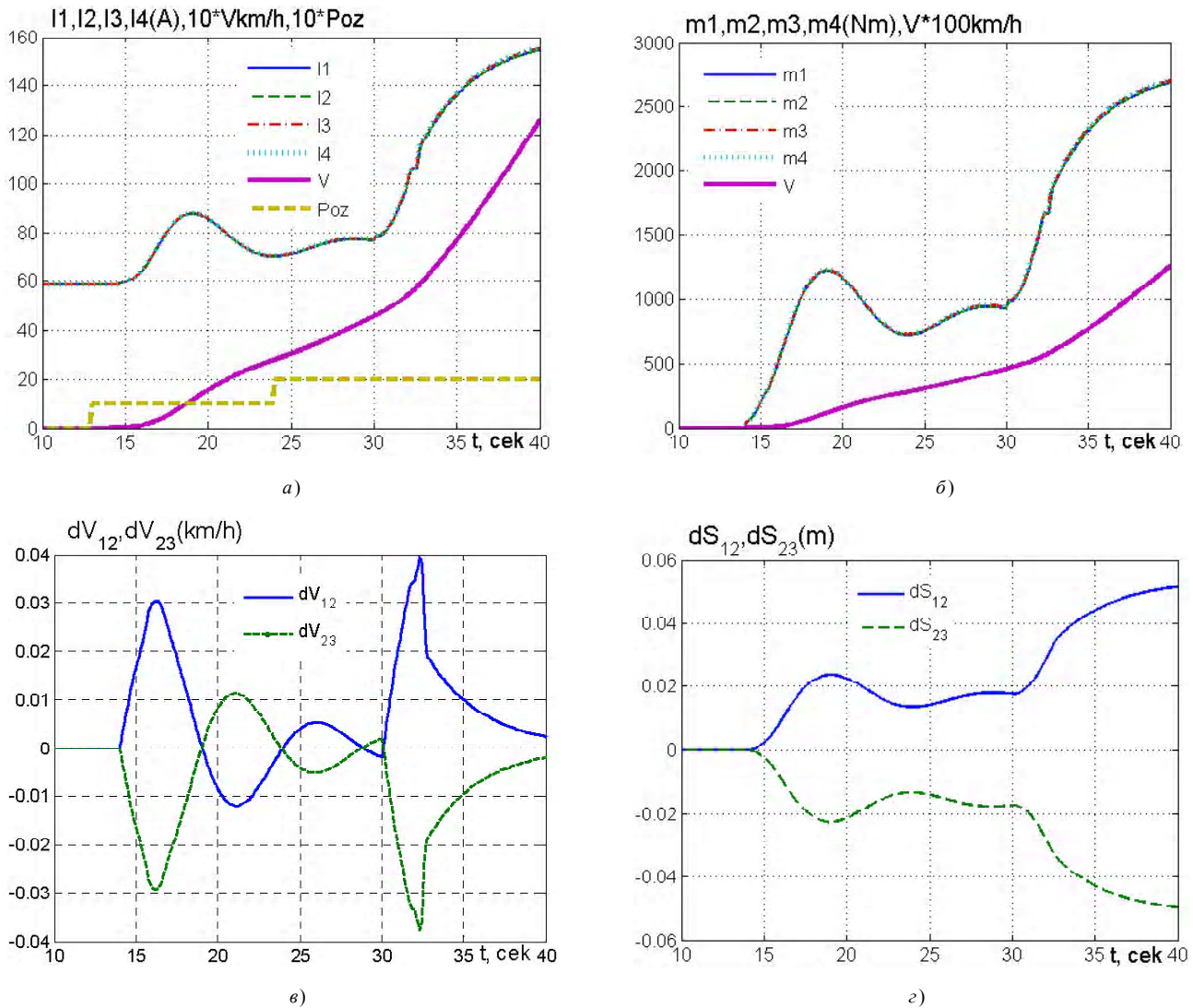


Рис. 12. Результаты моделирования параметров режима ДП для первого случая при разгоне ДП для третьего варианта (с большим отличием радиусов колес и с коррекцией моментов и разностей скоростей вагонов); а) токи двигателей, скорость поезда и позиция контроллера машиниста; б) моменты двигателей и скорость поезда; в) разности скоростей вагонов; г) изменения расстояний между вагонами

найлены путем измерения расстояний между вагонами во время движения. На практике визуально во время движения ДП с учетом направления движения можно по изменению расстояний между вагонами определить на сколько отличаются тяговые усилия одного моторного вагона от другого.

Выполнено моделирование разгона ДП для второго случая, когда отключалось возбуждение синхронного генератора второго моторного вагона, осуществлялась тяга ДП двумя ТАД. Результаты изменения токов, моментов двигателей, разности скоростей вагонов, сил сопротивления вагонам ДП, разности расстояний между вагонами приведены на рис. 13. В соответствии с картой профиля пути моделировалось движение ДП под уклон. Согласно графикам, отличия токов ТАД от эксперимента не превышало 25 %. Период колебаний сил сцепления, разности скоростей вагонов и расстояний между вагонами составлял на разных участках 4,4 с и 2 с.

Результаты эксперимента для третьего и четвертого случаев показывают возможные пределы изменения величин во время эксперимента. Так как данные измерялись через одну минуту (в 300 раз реже, чем для первого случая) без фиксации точного момента времени, когда изменяется положение контроллера машиниста, поэтому затруднительно сравнение переходных процессов в ДП и в его математической модели. Пределы измерений величин в эксперименте соответствуют пределам этих величин при моделировании математической модели АТЭП ДП.

После проведения исследований были получены результаты замера диаметров бандажей колесных моторных пар по кругу катания: $R_1=0,4745$ м, $R_2=0,476$ м, $R_3=0,477$ м, $R_4=0,477$ м. Радиусы колес моторных пар первого вагона меньше моторных колес второго на 0,1–0,25 см, что подтверждает сделанные выводы о наличии разницы в радиусах моторных колес, приводящей

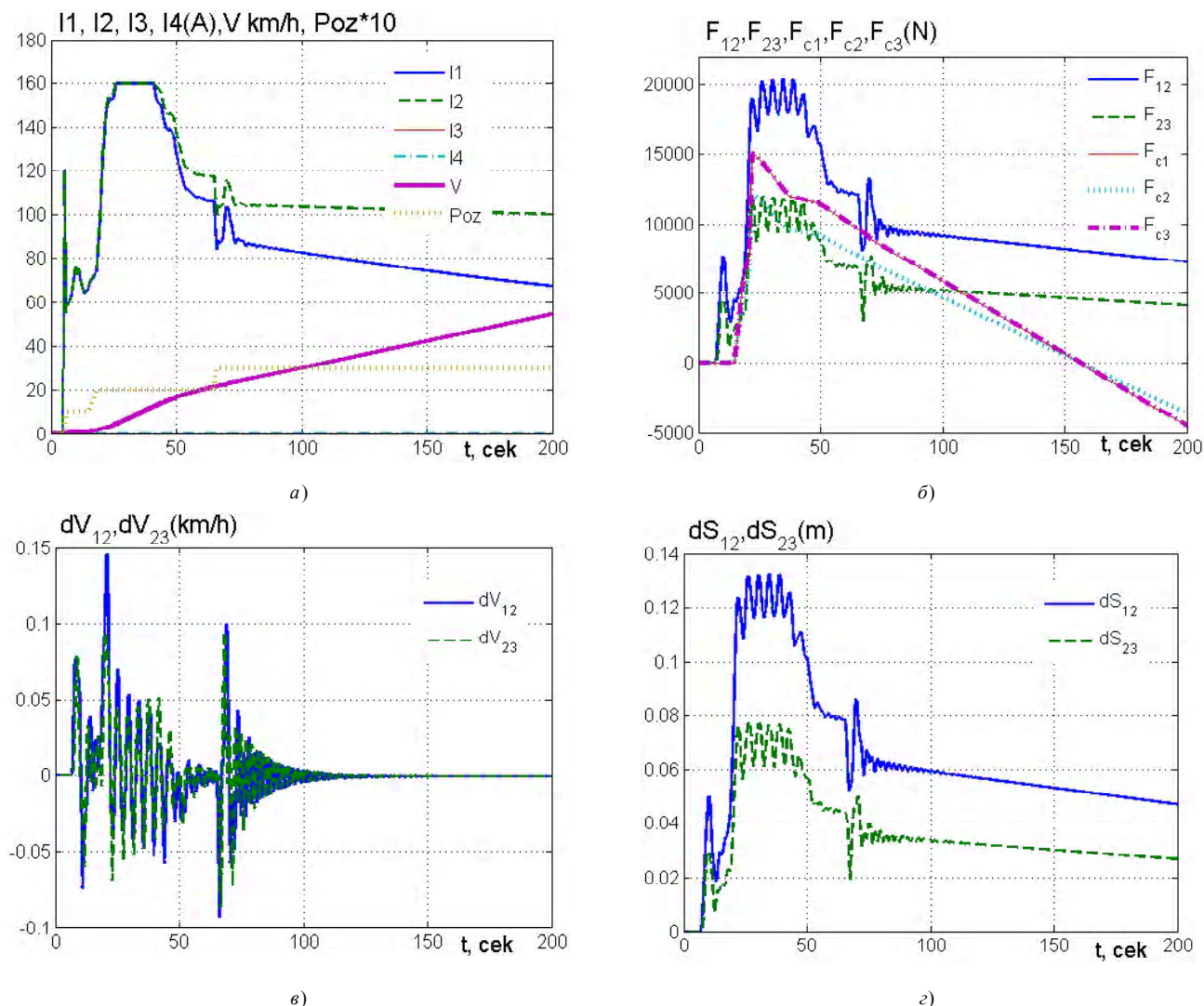


Рис. 13. Результаты моделирования параметров режима ДП для второго случая а) токов двигателей, скорости поезда и позиции контроллера машиниста; б) силы между вагонами и силы сопротивления движению вагонов; в) разности скоростей вагонов; г) изменения расстояний между вагонами

к разным моментам ТАД.

Выводы

Впервые выполнено сравнение значений параметров режима ДП при его эксплуатации с результатами моделирования математической модели АТЭП ДП, которое показало:

1. Отличия токов ТАД во время разгона не превышало 25 % (отличия объясняются наличием спектра гармоник токов ТАД в реальном оборудовании и моделированием только первой (основной) гармоники токов в математических моделях векторных систем управления ТАД), значения выпрямленного напряжения для преобразователей второго моторного вагона не превышает 16 %, как на модели так и в эксперименте возникали колебания токов ТАД, период колебаний отличался на 30 %.

2. Дополнительные исследования на модели пока-

зали возникновение колебаний скоростей вагонов, колебаний сил между вагонами и расстояний между вагонами. При этом амплитуда колебаний сил между вагонами превышает 1000 Н. Колебания изменений расстояний между вагонами во время разгона достигают 3 см. Амплитуды колебаний разностей скоростей вагонов достигают 0,04 км/ч.

3. Параметры режима механической части ДП (скорость поезда, силы сопротивления движению) в модели и в эксперименте отличаются не более, чем на 10 %.

Автор выражает благодарность начальнику моторвагонного депо Христиновка Карашуку Ю. В. за всестороннюю поддержку в проведении исследований и особенно благодарит заместителя начальника депо Кучерука О. А. за организацию измерений, непосредственное участие при их проведении, предоставление необходимой документации и создание комфортных условий для исследований.

Список літератури

1. Басов Г. Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія / Г. Г. Басов. – Ч. 1. – Харків : Апекс+, 2004. – 240 с.
2. Андриенко П. Д. Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта / П. Д. Андриенко, В. Д. Лобода, А. В. Мищенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2001. – № 1. – С. 55–58.
3. Носков В. И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В. И., Дмитриенко В. Д., Заполковский Н. И., Леонов С. Ю.]. – Харьков : ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с. – (Научное издание).
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – [2-е изд.]; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
5. Орловский И. А. Математическая модель на рекуррентной нейронной сети механики движения вагонов дизель-поезда / И. А. Орловский, Ю. В. Голянчук // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – Кременчук. – 2009. – Вип. 3/2009 (056), Ч. 2. – С. 116–119.
6. Орловский И. А. Математические модели дизеля и синхронного генератора тягового электропривода дизель-поезда на нейронной сети / И. А. Орловский // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 2. – С. 62–72.
7. Орловский И. А. Настройка системы управления распределенного электропривода дизель-поезда генетическими алгоритмами / И. А. Орловский, Ю. Ю. Туник // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів : – ЕКОінформ, 2009. – С. 443–446.
8. Орловський І. А. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного тягового электропривода дизель-поезда с усовершенствованной системой управления / И. А. Орловский, Е. В. Страколист // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Днепродзержинск : ДГТУ, 2007. – С. 261–264.
9. Орловский И. А. Учет упругих связей и распределенной нагрузки при векторном управлении асинхронным тяговым приводом дизель-поезда / И. А. Орловский, А. Н. Кулешов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна. Вип. 19. – 2007. – С. 209–213.
10. Волков А. В. Математическая модель многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода дизель-поезда с векторной системой управления / А. В. Волков, И. А. Орловский // Технічна електродинаміка – Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки», Ч. 6. – 2008. – С. 31–36.
11. Федяева Г. А. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронном тяговом приводе тепловоза ТЭМ21 / Г. А. Федяева, В. Н. Федяев // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 6. – С. 39–45.
12. Клименко Ю. И. Исследование электропривода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики; дисс. кандидата техн. наук: 05.22.07 / Клименко Юрий Иванович. – М. : РГБ, 2004. – 188 с.
13. Дизель поезд ДЕЛ-02. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Описание и работа. 1030.00.00.001 РЭ. – 2005. – 105 с.
14. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Днепропетровск : Национальный горный университет, 2006. – 470 с.

Поступила в редакцию 24.11.09 г.

Орловський І. А. Вимірювання параметрів режиму дизель-поїзду ДЕЛ-02 під час експлуатації та порівняння їх з математичною моделлю.

Приведена методика та результати вимірювань параметрів режиму дизель-поїзда ДЕЛ-02 для різних випадків під час експлуатації. Виконано аналіз результатів та їх порівняння з результатами моделювання, розробленої раніше математичної моделі асинхронного тягового електропривода дизель-поїзда. Показано змінення у математичній моделі фізичних величин, що не вимірюються під час експлуатації.

асинхронний тяговий електропривод, дизель-поїзд, математична модель, моделювання

Orlovsky I. A. Measurement regime diesel train DEL-02 during the operation and their comparison with the mathematical mode.

The method and results of measurements of the profile, diesel train DEL-02 for various cases during operation. Completed analysis of the results and their comparison with the simulation results, the previously developed mathematical model of asynchronous traction motor diesel trains. Showing the changes in the mathematical model of physical quantities are not measured during the operation.
asynchronous traction electric drive, diesel trains, mathematical model, simulation