

МАП ГЭТ ОКТЯБРЬ 2026
“ЧЕРГОС”
САНКТ - ПЕТЕРБУРГ

ПРЕИМУЩЕСТВА ТРОЛЛЕЙБУСОВ
С АДАПТИВНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДАТЧИКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ (ДЧВ)

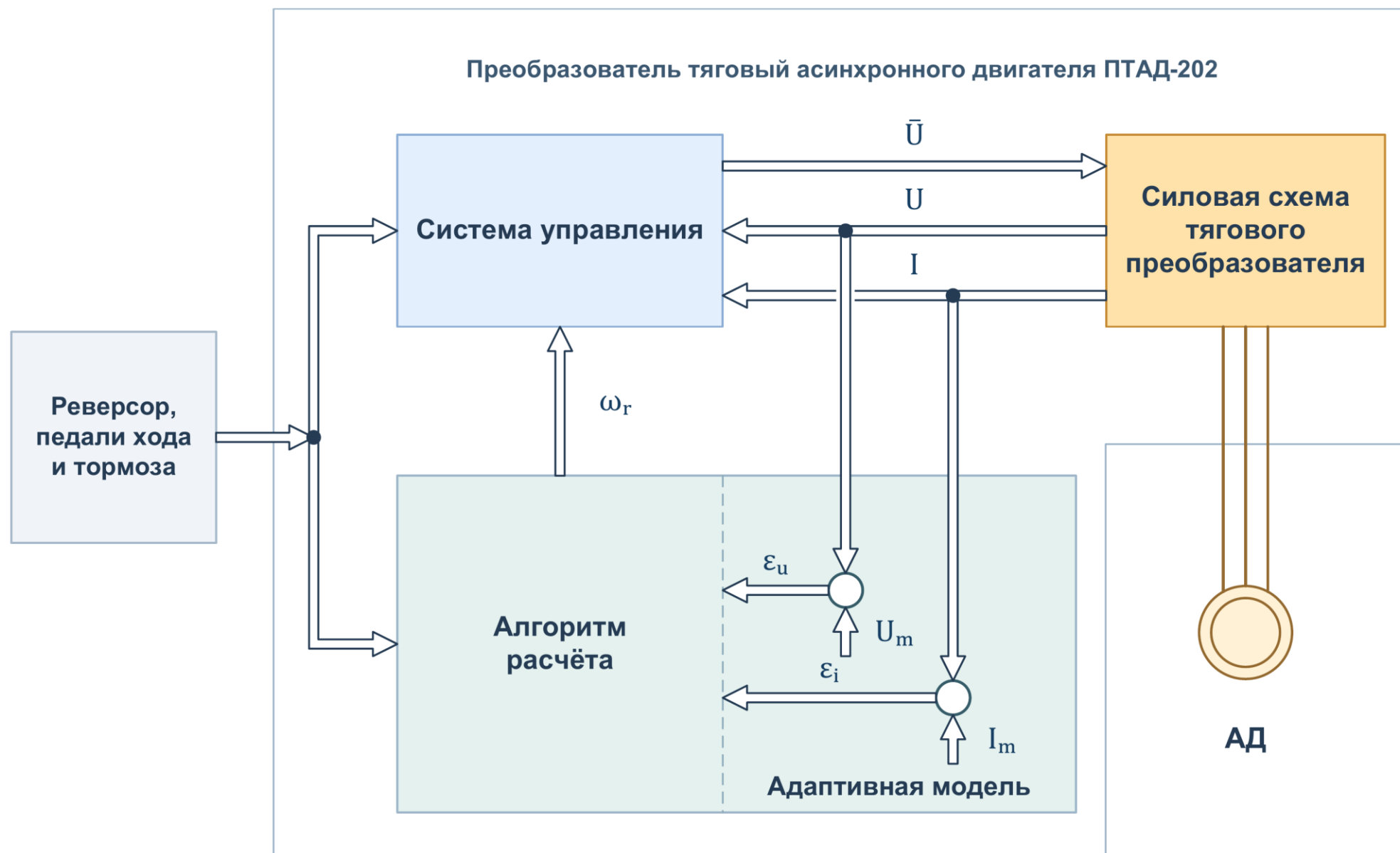
В Санкт-Петербурге с августа текущего года эксплуатируются 20 троллейбусов “СИНАРА 6254” с системой управления без датчика частоты вращения ротора тягового двигателя (ДЧВ).

- В настоящее время троллейбусы “КАМАЗ 62825” с системой управления без ДЧВ эксплуатируются в городах Йошкар-Ола и Ярославль.
- Троллейбус является самой энергоемкой машиной по удельным затратам энергии на тягу по сравнению с трамваем и вагоном метрополитена из-за высокого сопротивления движению, которое изменяется в широких пределах в функции нагрузки от пассажиров, состояния и неровностей дороги, давления в шинах колес и является случайной переменной. Поэтому, исключение ДЧВ из контура управления в приводе троллейбуса является наиболее сложной задачей по сравнению аналогичной задачей в электроприводах трамвая и вагона метрополитена.
- Одним из решений повышения надежности тягового электропривода, достижения высоких динамических показателей и совершенствования управляемости, уменьшения себестоимости двигателя и системы управления является исключение ДЧВ из контура управления. В этом случае дискретные сигналы ДЧВ заменяет непрерывный сигнал, вырабатываемый адаптивной моделью, переменные которой подстраиваются автоматически в функции текущего состояния переменных тягового двигателя. Наряду с перечисленными функциями исключение ДЧВ влечет минимизацию пульсаций тока из-за исключения запаздывания расчета вектора управляющих сигналов относительно текущего состояния двигателя, что повышает КПД двигателя и преобразователя и снижает их нагрев.

- Кратко приведем недостатки привода с ДЧВ:
- 1. Необходим двухканальный датчик, формирующий две квадратурные последовательности импульсов, частота следования которых пропорциональна частоте вращения ротора тягового двигателя.
- 2. На втором конце вала двигателя завод - изготовитель устанавливает зубчатое колесо из стали для формирования датчиком импульсов в функции индукции в зазоре между датчиком и зубцом или впадиной зубчатого колеса.
- 3. Измерение частоты следования импульсов и фильтрация сигналов датчика влекут запаздывание расчета вектора управляющих сигналов относительно текущего состояния двигателя и, в следствии этого, увеличение колебаний тока двигателя. На несущей частоте модуляции амплитуда пульсаций тока достигает 8 А при амплитудном значении 500 А с использованием сигнала ДЧВ на скорости троллейбуса 25 - 60 км/час. Амплитуда пульсаций снижается до 4 А в системе управления без ДЧВ. Пульсации тока на частотах модуляции 1 – 2 кГц приводят к повышенным потерям энергии из-за пульсаций индукции и дополнительным вихревым токам в статоре двигателя.
- 4. Установка ДЧВ требует изоляции корпуса ДЧВ от корпуса двигателя на испытательное напряжение 3,5 кВ, 50 Гц.
- 5. Из-за отсутствия герметичности двигателя, ДЧВ и зубчатое колесо работают в условиях повышенной влаги и загрязнений. В течении эксплуатации происходит износ подшипников двигателя и возникают биения зубчатого колеса, что приводит к необходимости постоянного регулирования зазора между зубчатым колесом и ДЧВ.
- 6. Необходим экранированный кабель с тремя витыми проводами, соединяющий датчик с системой управления приводом, а в системе управления необходим канал, сопрягающий сигналы датчика с управляющим микропроцессором.
- 7. Опыт эксплуатации транспортных средств показывает низкую надежность узла ДЧВ. По мнению специалистов СПб “ГУП Горэлектротранс”, обычно, средний пробег до отказа ДЧВ не превышает 100 тысяч километров. В первом трамвайном парка Петербурга 65% всех отказов электронных систем приходится на ДЧВ.

- Кроме конструктивных и экономических недостатков исключение ДЧВ из контура управления значительно повышает управляемость динамикой движения транспортного средства за счет следующих показателей:
- 1. Запоздывание во времени между измерением токов и рассчитанной скоростью адаптивной модели уменьшается в несколько тысяч раз, что исключает пульсации токов и соответственно момента двигателя, уменьшает магнитные потери в двигателе и электромагнитные поля обмоток.
- 2. По мнению водителей троллейбусов Ярославля и Санкт-Петербурга (3-й парк) машина движется более плавно, и в тоже время, более динамично.
- 3. Минимизируется откат машины при пуске на уклоне за счет мгновенного определения направления и частоты вращения ротора, что повышает безопасность.
- 4. Обеспечивается высокая надежность тягового электропривода, эксплуатируемого в разных климатических условиях России, что особенно важно для транспорта.

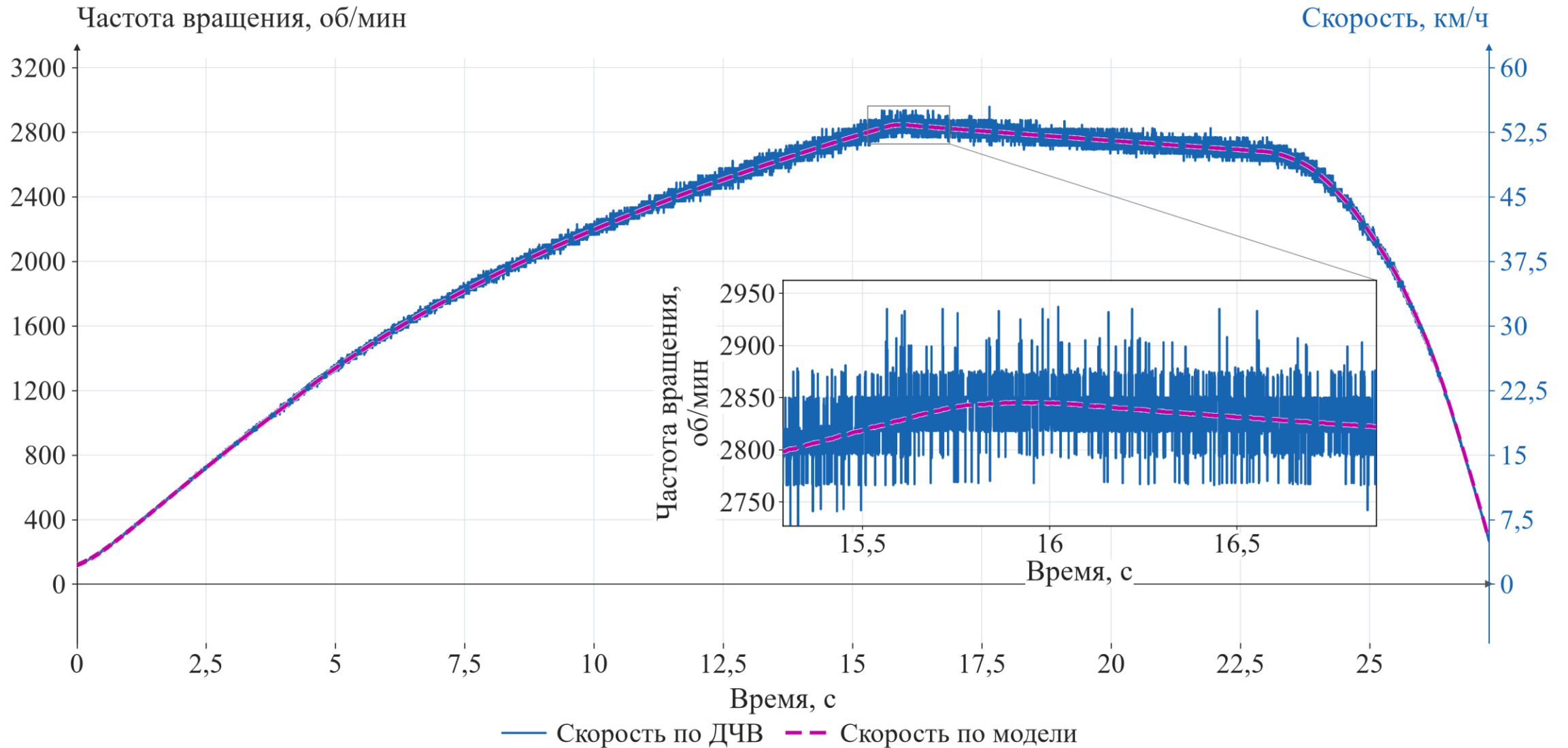
Структурная схема тягового привода без ДЧВ



- 1. ПУЛЬСАЦИИ И ЗАПАЗДЫВАНИЕ СИГНАЛА ДЧВ.

- Приведем осциллограммы движения троллейбусов в разных режимах. Необходимо отметить совпадение динамических и качественных показателей для разных моделей троллейбусов и с разными двигателями. Это показывает совершенство алгоритма адаптации процессора, управляющего приводом. На первом рисунке синей сплошной линией показан сигнал ДЧВ без фильтрации (в центре рис. 1) и с фильтрацией и красной пунктирной линией сигнал, вырабатываемый моделью. Учитывая не приемлемо высокое увеличение пульсаций ДЧВ на высокой скорости, система управления с ДЧВ должна иметь фильтр, что еще больше увеличивает запаздывание в расчете управляющих сигналов и амплитуду колебаний фазных токов. В сигнале скорости, получаемой в модели амплитуда колебаний существенно меньше.

Рис. 1 Сравнение пульсаций сигналов ДЧВ и модели.



- Особенно значительное запаздывание сигнала ДЧВ происходит при пуске машины и в конце торможения, где как раз и требуется ограничение и минимизация отката и рывка, как для пассажиров, так и для трансмиссии электропривода. Это подтверждают приведенные на рис. 2, 3 и 4 осциллограммы.
- Допустим, масса машины равна 18 тоннам и выполняется пуск на положительном уклоне 40 ‰. Из рис. 2 следует, что первое измерение сигнала ДЧВ после нажатия водителем педали “ход” возможно только через $T=0,67$ с, тогда величина отката машины назад составит:
- $$S = mg \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} - f \frac{1}{1000} \right) \frac{1}{m} T^2 \frac{1}{2} = 9,82(0,0598 - 0,012)0,67^2 \frac{1}{2} = 0,11 \text{ м}$$
- Учитывая время разворота токов для формирования требуемого момента запаздывание во времени будет еще больше и соответственно больше величина отката. В связи с этим, водители начинают нажимать на ходовую педаль до отпускания ручного тормоза, что уменьшает его ресурс.

Рис. 2 Сравнение сигналов скорости по ДЧВ и по модели при пуске машины.

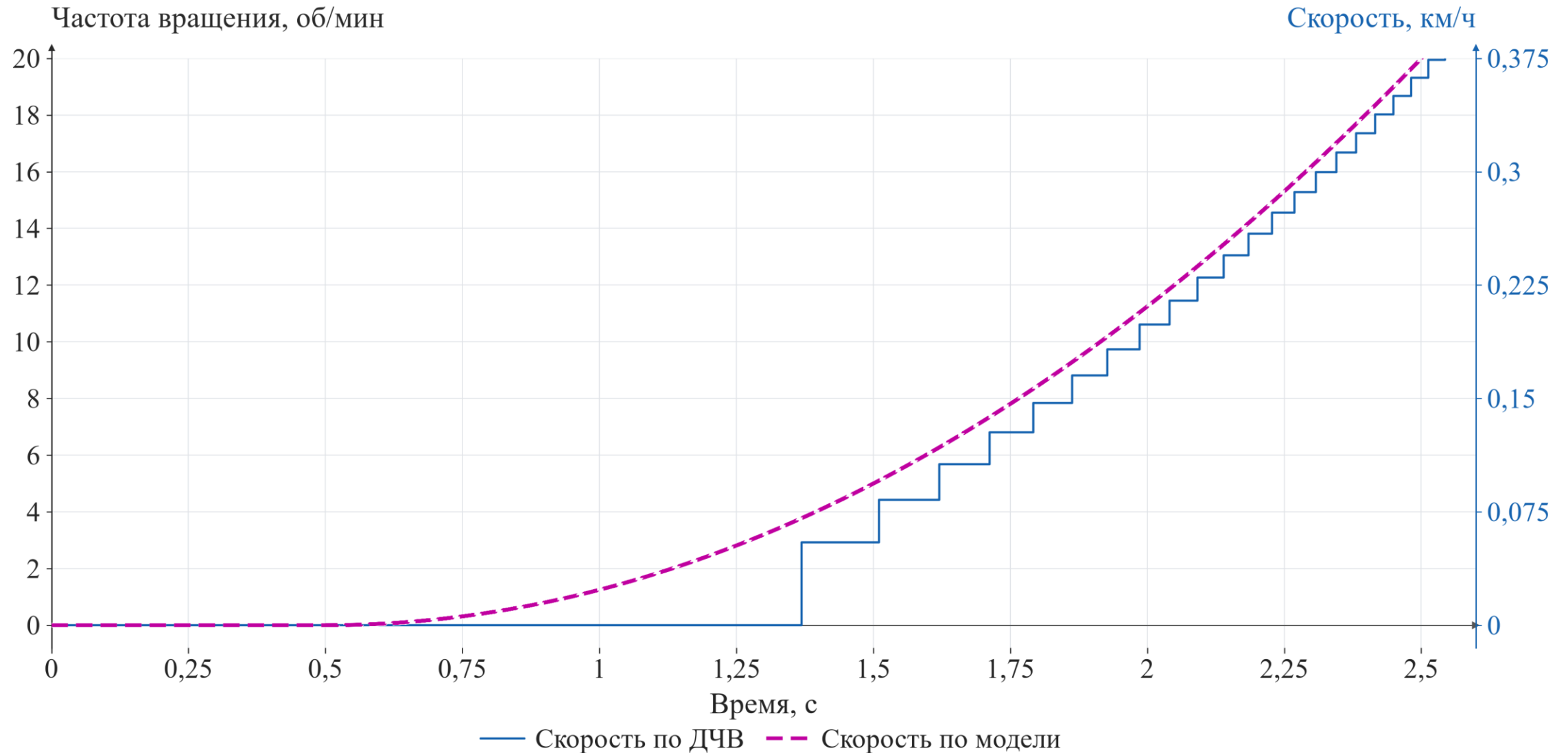


Рис. 3 Сравнение сигналов скорости по ДЧВ
и по модели в конце торможения.

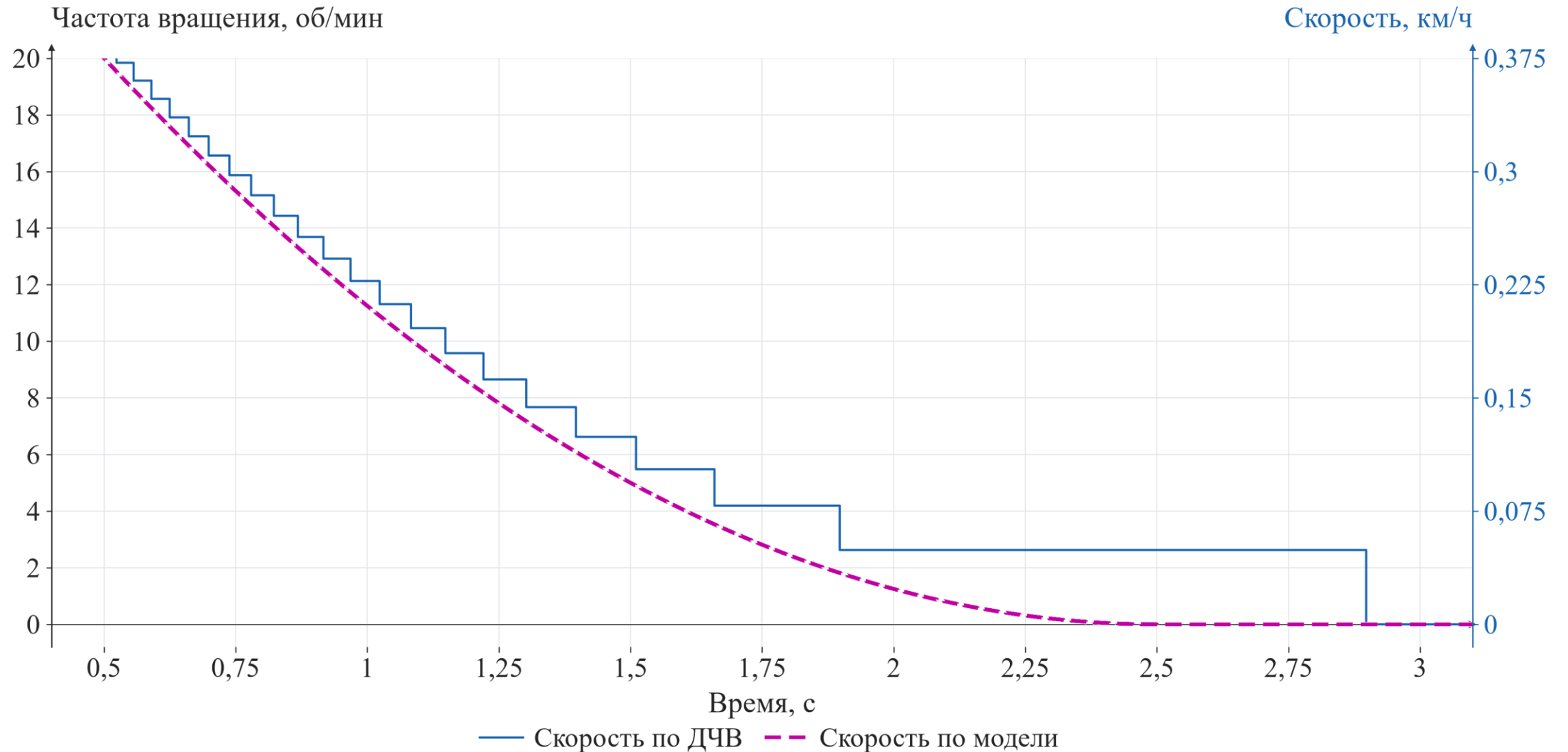
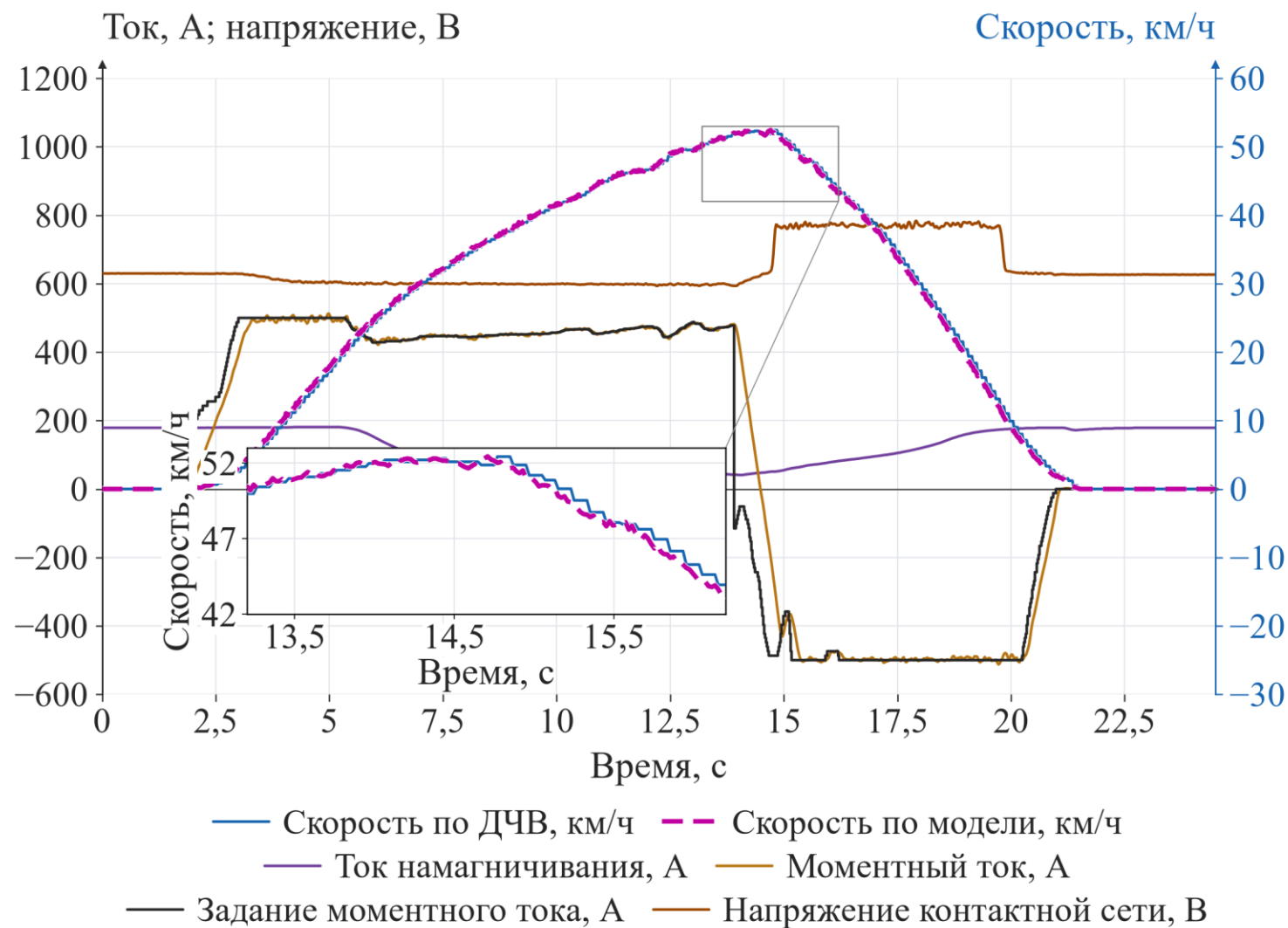
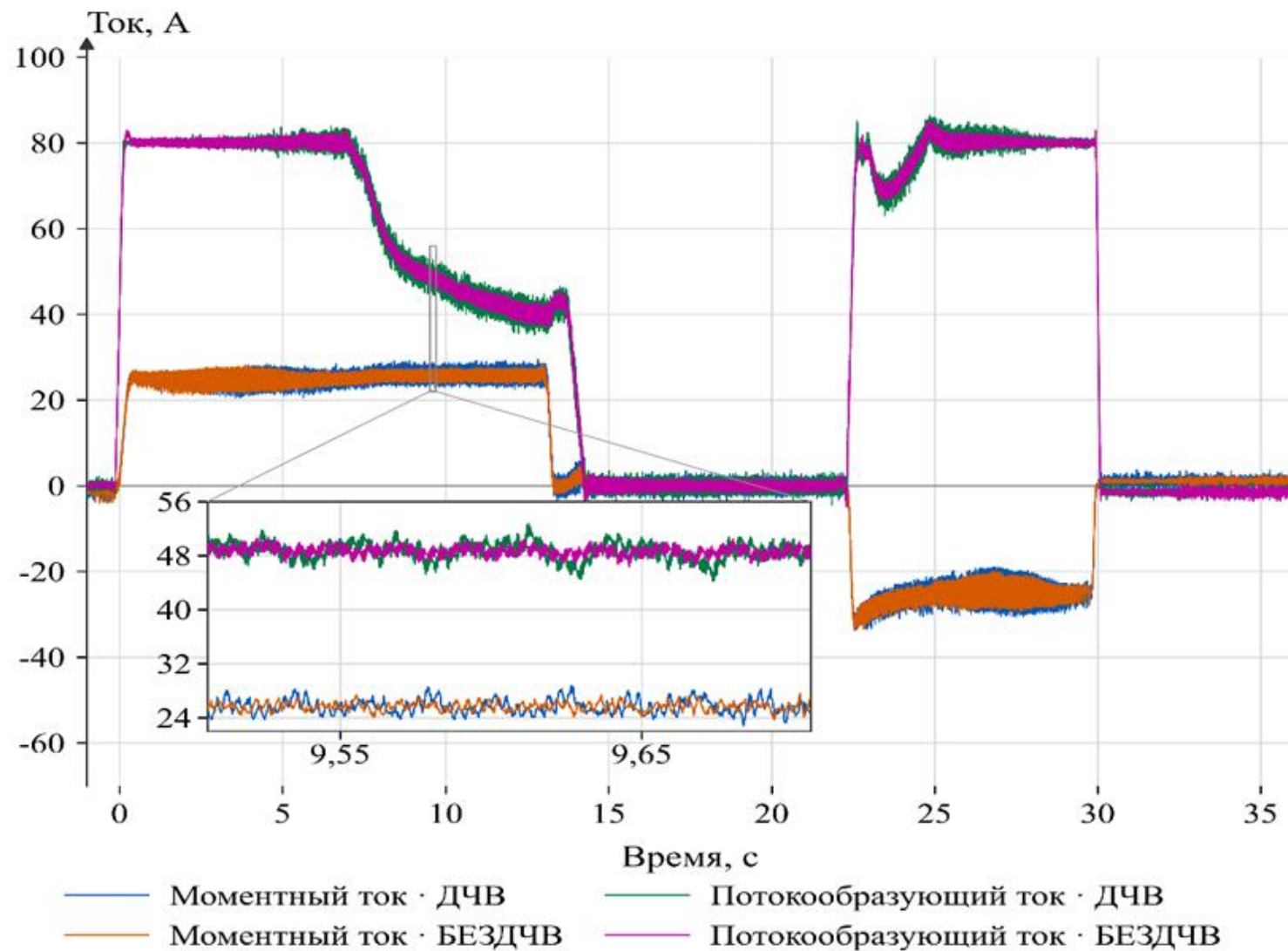


Рис. 4 Сравнение скорости по ДЧВ и по модели при разгоне и торможении.



На осциллограмме рис. 4 видно, что сигнал ДЧВ после измерения и обработки смещен вправо относительно сигнала модели, запаздывание в обработке сигнала ДЧВ составляет 0,1 с на скорости 40 – 50 км/час.

Рис. 5 Осциллограмма пульсаций токов ДЧВ и БЕЗ ДЧВ



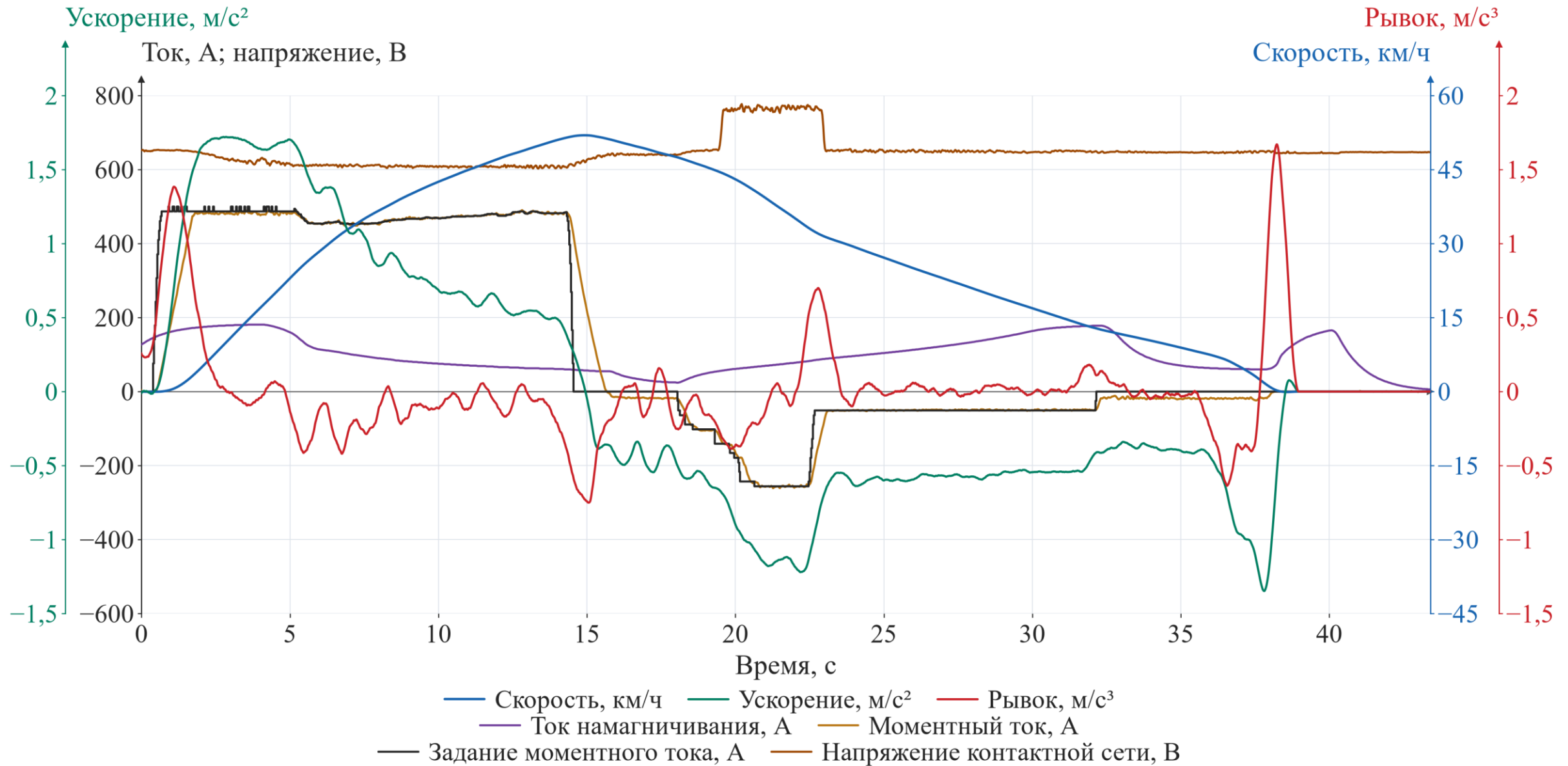
Размах пульсаций тока в приводе с ДЧВ составляет 8 А (рис. 5), пульсации тока без ДЧВ не превышают 4 А.

Далее приводятся осциллограммы скорости, ускорения и рывка при разгоне и торможении между остановками.

2. ОСЦИЛЛОГРАММЫ РАЗГОНА, ВЫБЕГА И ТОРМОЖЕНИЯ.

На рис. 6 и 7 показаны осциллограммы движения троллейбусов “КАМАЗ 62825” с двигателем АТ250LB4 У2.

Рис. 6 Разгон до скорости 52 км/час и торможение до остановки.



Моментный ток (кривая желтого цвета) формируется задатчиком интенсивности в соответствии с сигналом педали (кривая черного цвета). Задатчик интенсивности задает скорость нарастания и сброса моментного тока.

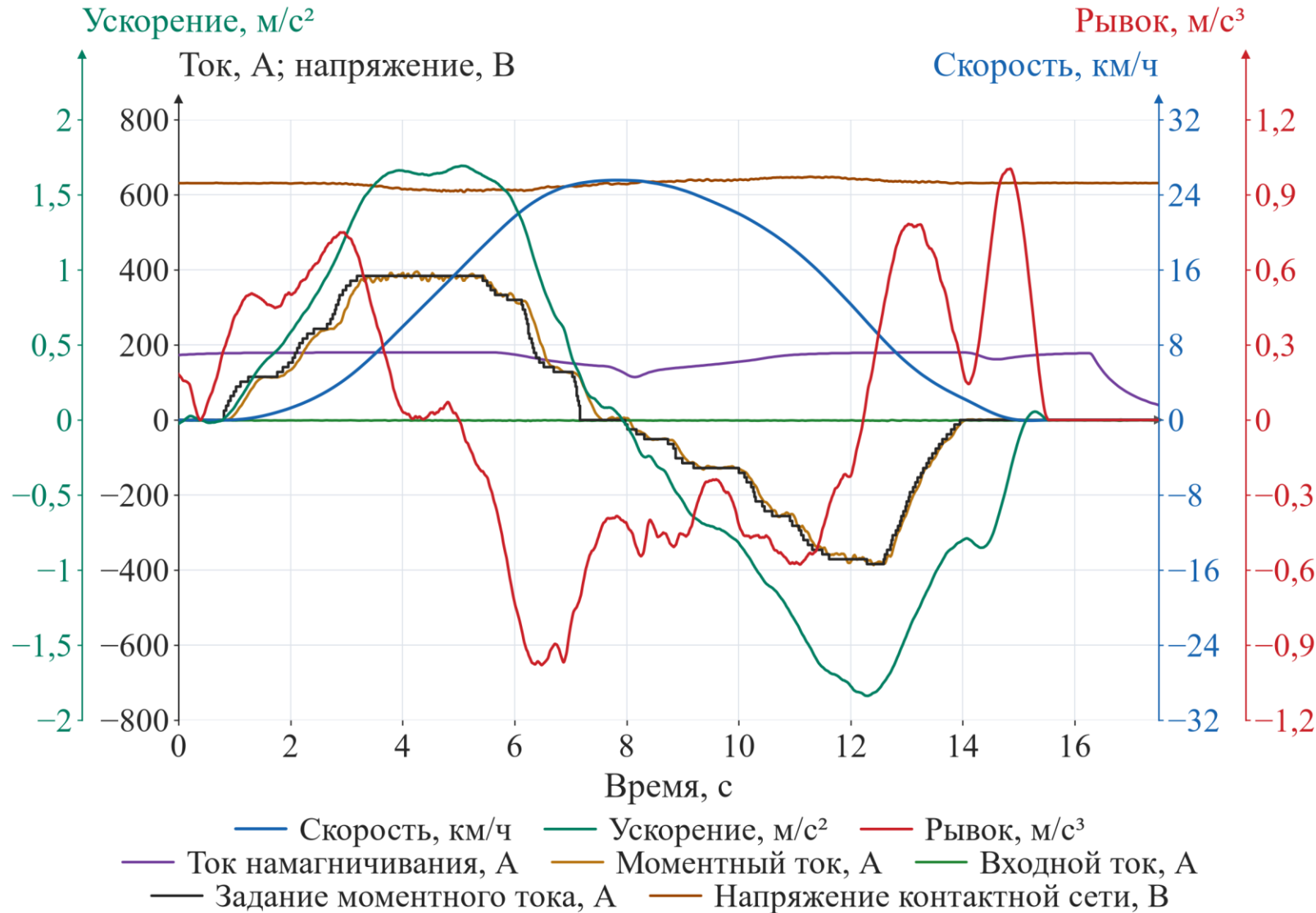
На скорости (кривая синего цвета) выше 23 км/час разгон выполняется за счет уменьшения тока намагничивания (кривая фиолетового цвета) и соответственно ослаблением магнитного потока (с ослаблением поля), ускорение (кривая зеленого цвета) начинает снижаться.

На скорости 52 м/час привод переводится в выбег на 3 – 4 секунды, сигнал педали сбрасывается в ноль, моментный ток сбрасывается с 530 А до 10 А, ток намагничивания плавно спадает, напряжение контактной сети плавно повышается.

В режиме выбега моментный ток не сбрасывается до нуля, стабилизируется на уровне 10А. Это сделано по просьбе одного из заводов - изготовителей для минимизации шума трансмиссии. В обычном варианте управляющей программы моментный ток в выбеге сбрасывается в ноль.

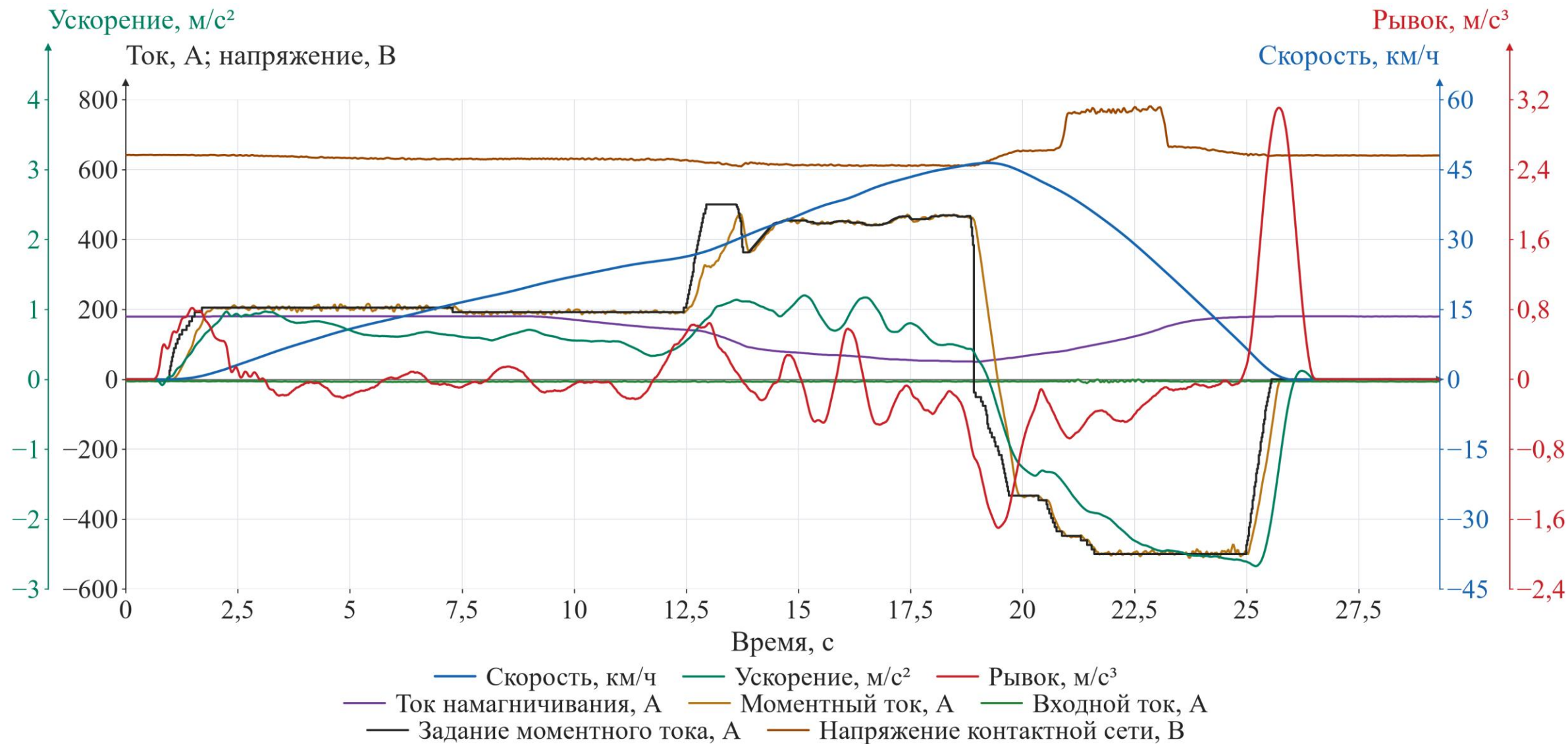
В конце торможения рывок (красная кривая) немного превышает нормируемый уровень 1,5 м/с³ из-за наложения механического системой EBS.

Рис. 7 Разгон и торможение.



Из приведенной осциллограммы на рис. 7 (“СИНАРА 6254”) наглядно видно, что производная ускорения (рывок) резко возрастает и падает при изменениях ускорения. Начиная с четвертой до пятой секунды ускорение почти постоянно и рывок снижается до нуля. На скорости 2,0 км/час после 14 – й секунды накладывается механический тормоз.

Рис. 8 Разгон с разными ускорениями и торможение с одновременным наложением механического тормоза на электрический в конце торможения

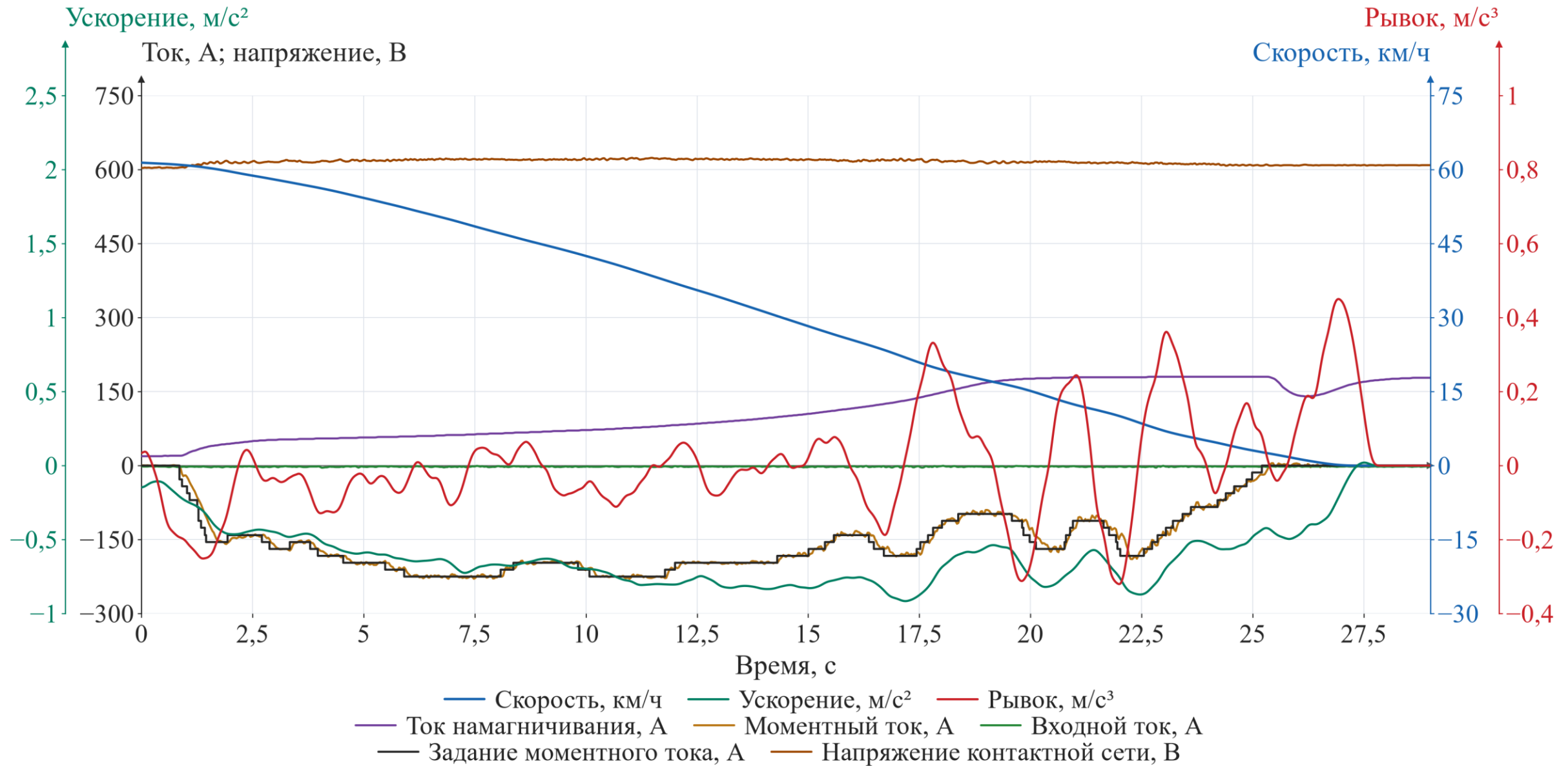


На рис. 8 показаны осциллограммы с заданием водителем разных ускорений машины моментных токов в разгоне: 200 А до момента времени 12,5 с и 420 А до момента времени 19 с. На 19 секунде водитель начинает электрическое торможение, с 25 секунды начинается плавное отпусkanie тормозной педали, которое заканчивается на 27 секунде.

Одновременно с электрической системой EBS накладывается механический тормоз, рывок превышает норму ГОСТ в 2 раза и составляет в пике 3 м/с³. Система EBS должна сравнивать замедление с уставкой тормозной педали.

В настоящее время EBS при нажатой педали торможения сравнивает свой порог по скорости с текущей скоростью, что неправильно. На скорости 2 км/час ЭДС вращения составляет 17 В, что обеспечивает ток рекуперации около 100 А.

Рис. 9 Торможение до полной остановки.



3. ПУСК ТРОЛЛЕЙБУСА НА ПОДЪЕМЕ.

На положительном уклоне рис.10 пуск троллейбуса выполняется с формированием силы тяги, компенсирующей силу скатывания. В разделе 1 было показано, что без фиксации троллейбуса с ДЧВ ручным тормозом или системой EBS на уклоне величина скатывания троллейбуса массой 18 тонн составляет 0,07 м. Для увеличения ресурса за счет разгрузки и подстраховки механического тормоза по сигналу акселерометра автоматически формируется сила, компенсирующая силу скатывания. Компенсирующая сила обеспечивает пуск машины на уклоне без отката.

Рис. 10 Компенсация силы скатывания

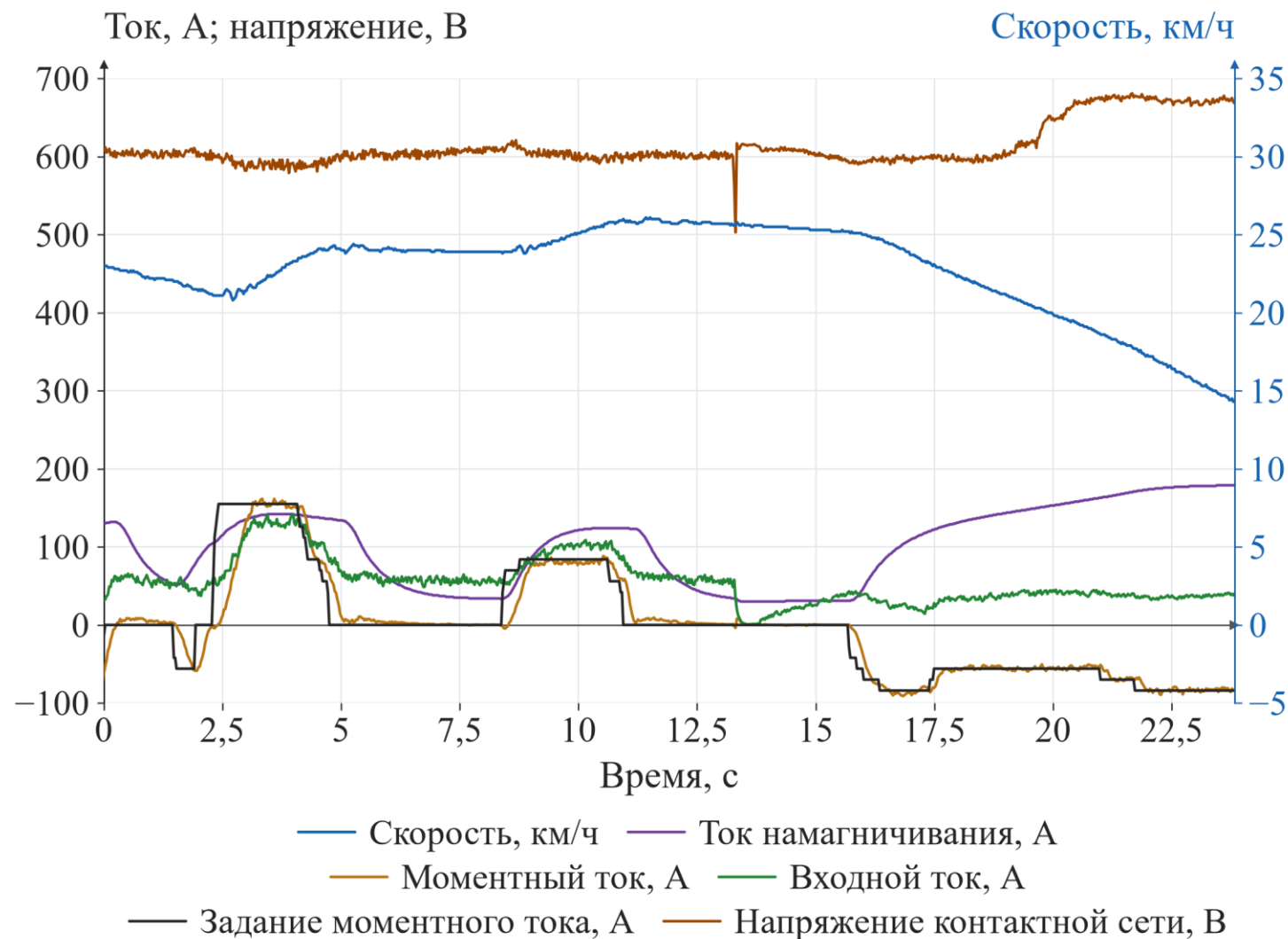


Тормозная педаль отпущена, ручной тормоз снят, машина стоит перед светофором на уклоне 5 ‰. Моментный ток и ток намагничивания формируют скольжение и силу, компенсирующую силу скатывания. Стабилизируется нулевая скорость ротора, механический тормоз в случае нажатия на педаль тормоза не нагружается. При нажатии на педаль хода в момент времени 3 троллейбус набирает скорость.

Педаля до коррекции и минимальное задание показаны расчётно.

4. ПРОЕЗД ОБЕСТОЧЕННОГО УЧАСТКА И СТРЕЛОК

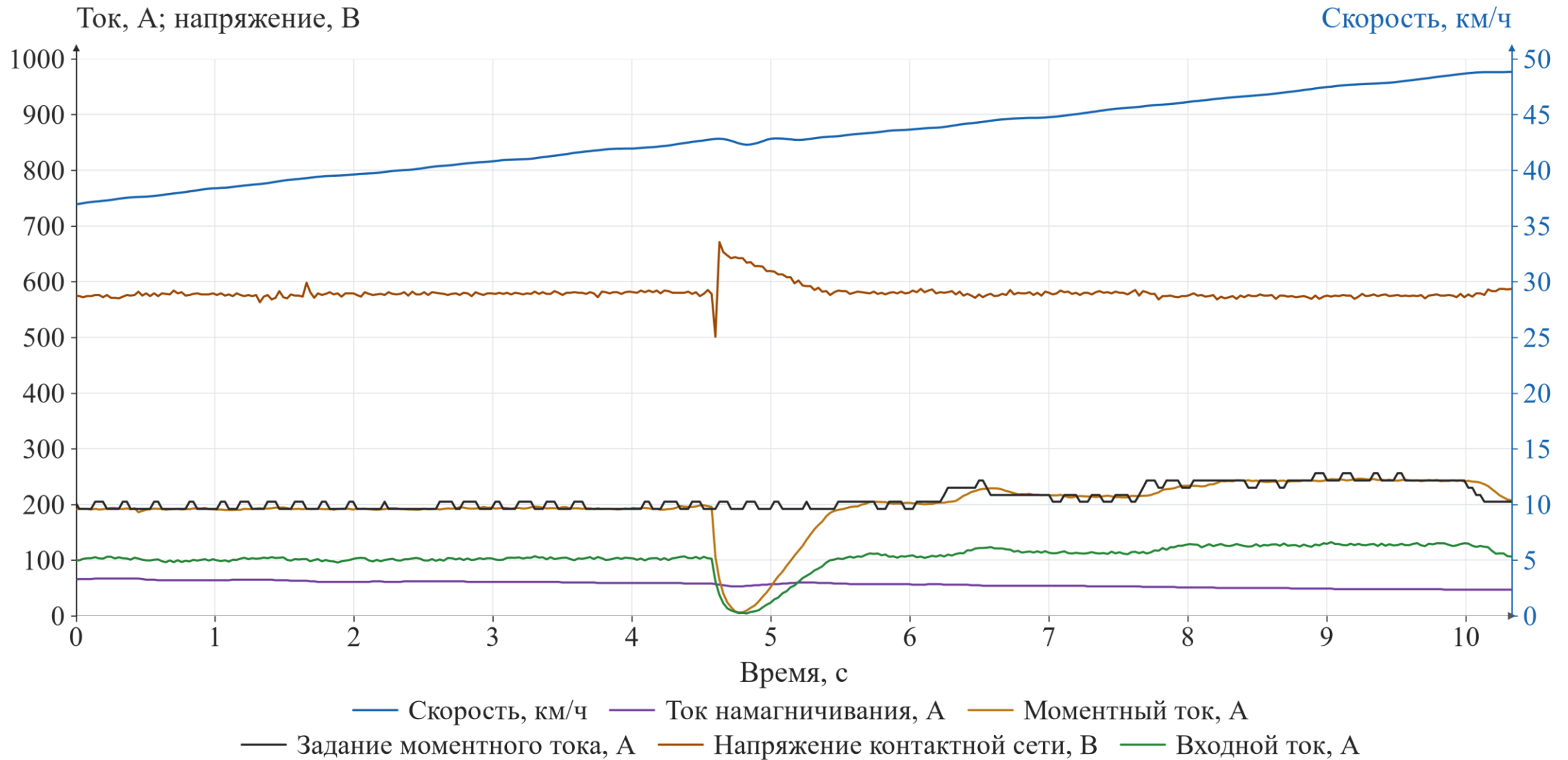
Рис. 11. Осциллограмма проезда в выбеге обесточенного участка



Проезд обесточенного участка в режиме тяги влечет значительный разряд фильтровой емкости инвертора и срабатывание главного автомата при въезде под напряжение, поэтому этот участок водители проезжают в выбеге (рис. 11).

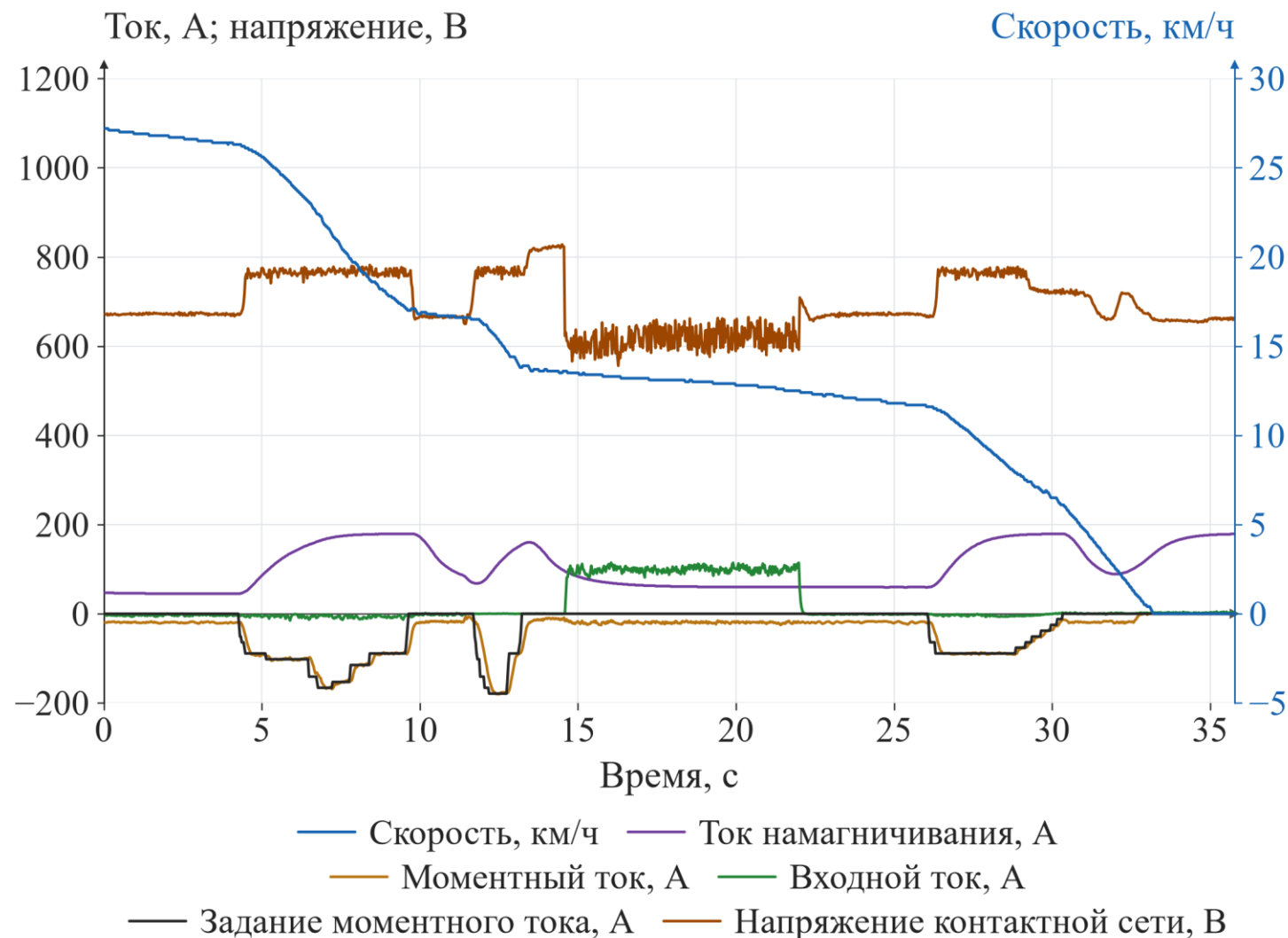
Ниже на рис. 12 приведены осциллограммы проезда обесточенного участка в режиме тяги с автоматическим сбросом моментного тока и тока намагничивания независимо от состояния ходовой педали. Напряжение на фильтровой емкости резко уменьшается до рабочего уровня 500 В за счет потребления энергии устройствами собственных нужд и с выбросом (670 В) восстанавливается при въезде машины под напряжение. На обесточенном участке на короткое время троллейбус переходит в выбег, что отражено на осциллограмме скорости.

Рис 12. Проезд обесточенного участка в режиме тяги.



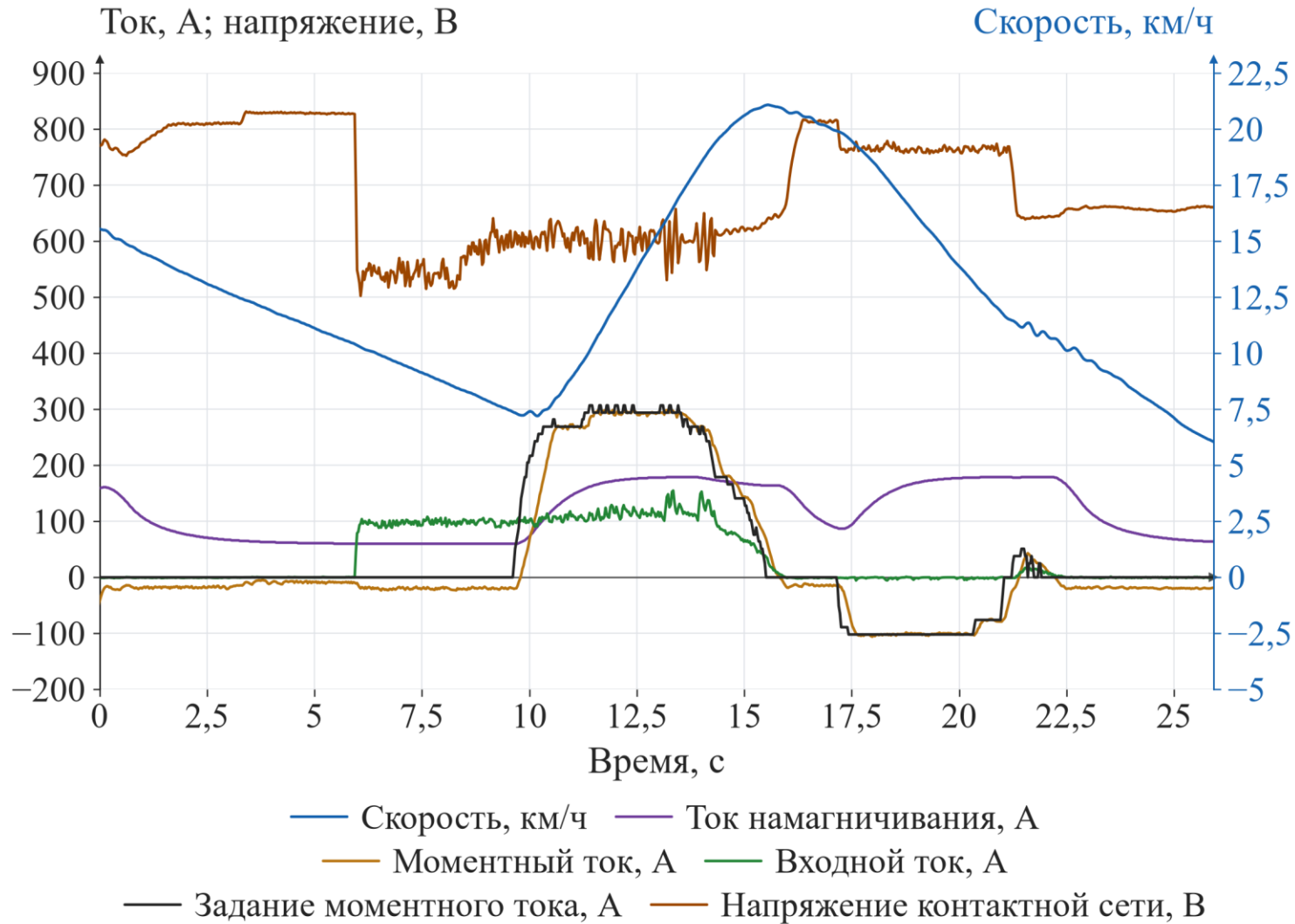
Далее приведем осциллограммы движения с переводом стрелок (рис 13).

Рис 13 Проезд в выбеге и перевод стрелки влево током из КС 90 А.



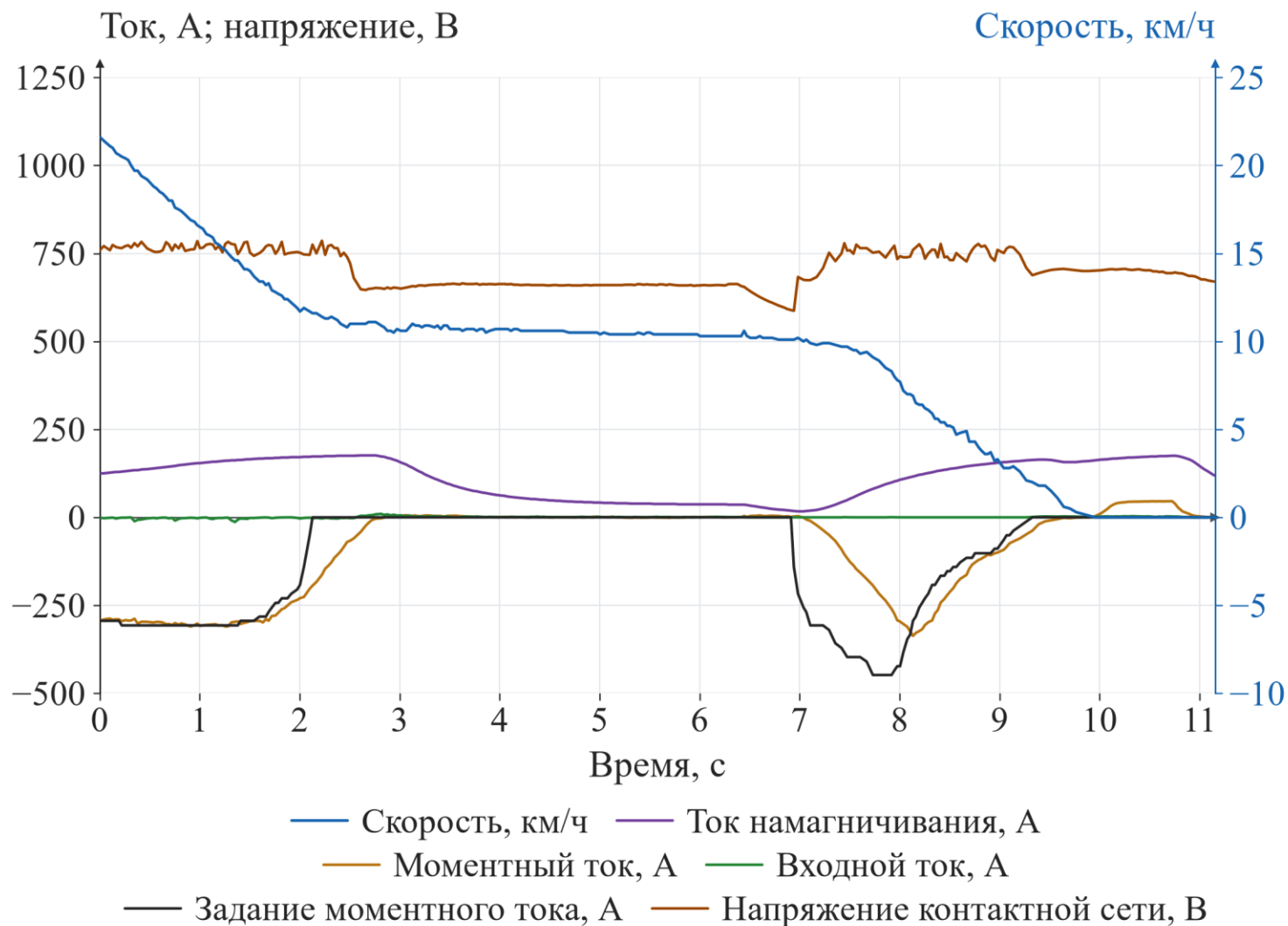
Троллейбус движется в выбеге со скоростью 15 км/час и в цепи тормозного резистора стабилизируется ток 90 А, стрелка контактной сети переводится влево.

Рис 14. Проезд стрелки влево в режиме тяги.



На рис. 14 приведена осциллограмма проезда троллейбуса в разгоне при переводе стрелки влево. Амплитудное значение моментного тока стабилизируется на уровне 300 А, задаваемого педалью хода. В цепи тормозного резистора развивается ток около 100 А (зеленая линия).

Рис. 15 Перевод стрелки вправо без потребления тока из КС.



Перед проездом стрелки вправо водитель тормозит, скорость снижается до 10 км/час, машина переходит в выбег во время проезда стрелки, после стрелки торможение продолжается, вырабатываемая энергия гасится на тормозных резисторах.

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДЧВ И БЕЗ ДЧВ

№ п п	Наименование показателя	с ДЧВ	без ДЧВ
1	Надежность	—	+
2	Уменьшение себестоимости двигателя. Исключается датчик, зубчатое колесо.	—	+
3	Исчезает необходимость монтажа кабеля от датчика к инвертору.	—	+
4	Уменьшение эксплуатационных затрат.	—	+
5	Уменьшение пульсаций тока и потерь энергии.	—	+
6	Уменьшение времени расчета частоты вращения.	—	+
7	Эффективное предотвращение юза и буксования.	—	+
8	Пуск машины на уклоне без отката	—	+