

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАМВАЯ С ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

**Введение.** На трамвайных линиях, где проложены открытые пути и отсутствует возможность заезда автомобиля (например: скоростной трамвай на Борщаговке, лесная трасса между площадью Шевченко и Пущей-Водицей в г. Киеве) для выполнения ремонтных работ на контактной сети под напряжением КП «Киевпастранс» имеет в распоряжении специальный трамвайный вагон КСВ-2. Он оборудован подъемно-поворотным устройством с площадкой и прекрасно приспособлен к ремонтно-монтажным работам, однако имеет существенный недостаток: невозможность эксплуатации на новом строительстве и аварийно-восстановительных, ремонтных работах, связанных с отключением контактной сети. Для выполнения таких работ вагон-вышку КСВ-2 необходимо было оборудовать автономным источником энергии, который позволил бы осуществлять движение вагона и выполнение им своих функций.

Техническое задание на проектирование и монтаж системы автономного питания вагона КСВ-2 состоит в следующем:

- в автономном режиме вагон должен выполнять те же функции, что и при питании от контактной сети;
- скорость движения вагона в таком режиме должна составлять не менее 5 км/ч, при этом учесть, что на участках трамвайных линий, где его использование необходимо, максимальная величина подъемов/уклонов составляет 45%;

- не допустить изменения в собственной конструкции, пневматической и электрической схемах трамвайного вагона КСВ-2, которые могли бы привести к нарушению Правил технической эксплуатации трамвая.

Эти требования обусловили проектирование системы управления автономным питанием на базе электрогенерирующего агрегата дизель-синхронный генератор. В системе использован агрегат ДГМА48М-2 номинальной мощностью 50 кВт. Генератор вырабатывает трехфазное переменное напряжение 400 В с частотой 50 Гц. Оба значения стабилизируются автоматически.

Электроэнергия, вырабатываемая генератором, поступает к потребителям трехфазного переменного напряжения 380/220В, 50Гц (электроприводы вышки, питание системы управления автономным питанием, сторонние потребители) и выпрямляется трехфазным мостовым выпрямителем. На выходе выпрямителя имеется постоянное напряжение величиной 550В. Его нагрузкой являются силовые и вспомогательные цепи вагона. Команда на запуск или отключение тяговых двигателей подается водителем при помощи командоаппарата с пульта управления автономным питанием. Направление движения меняется переключением вала реверсора контроллера непосредственного управления, как это и предусмотрено силовой электрической схемой вагона КСВ-2. Служебная система торможения - пневматическая (мотор-компрессор получает напряжение питания 550В в составе вспомогательных электрических цепей вагона); аварийная - электродинамическая (приводится в действие контроллером непосредственного управления, в соответствии с силовой электрической схемой вагона КСВ-2).

**Широтно-импульсный преобразователь.** Совместно со службой энергетического обеспечения КП «Киевпастранс» разработан полупроводниковый преобразователь постоянного тока на основе широтно-импульсной

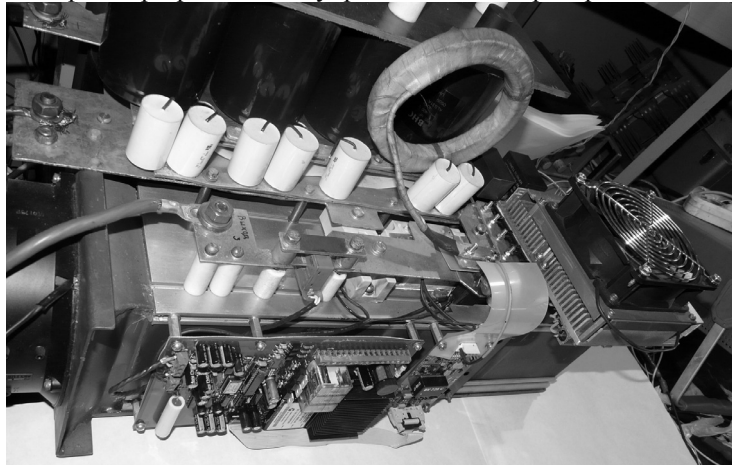


Рис. 1. Внешний вид ШИП без кожуха.

модуляции (ШИМ), который является составной частью тягового электропривода трамвая КСВ-2 и предназначен для преобразования выпрямленного напряжения, поступающего с дизель-генератора, в постоянное напряжение с ограничением выходного тока 190А и ограничением среднего значения входного тока на уровне 90А. Таким образом, преобразователь ограничивает потребление мощности на уровне 50 кВт. Нагрузкой широтно-импульсного преобразователя (ШИП) является 4 последовательно соединенных тяговых двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением ДК-255. На рис. 1 показан внешний вид ШИП без кожуха.

ШИП имеет защиты от:

- перегрузки по току (работа ШИП блокируется при превышении уровня тока 210А и выдается сигнал аварии);
- перегрева радиатора (защита отключает ШИП при превышении уровня температуры радиатора 85°C, температурный датчик установлен непосредственно возле силового ключа и обратного диода, работа ШИП блокируется, выдается сигнал аварии);
- нестабильности или исчезновения напряжения источника питания +5В (работа ШИП блокируется и выдается сигнал аварии);
- некорректное включение (если при включении системы управления переключатель командоаппарата установлен не в нулевое положение, работа ШИП блокируется и выдается сигнал аварии).

**Принцип работы ШИП.** На рис. 2 представлена структурная схема ШИП [1,5]. ШИП состоит из силовой части, системы управления, цепей управления и индикации.

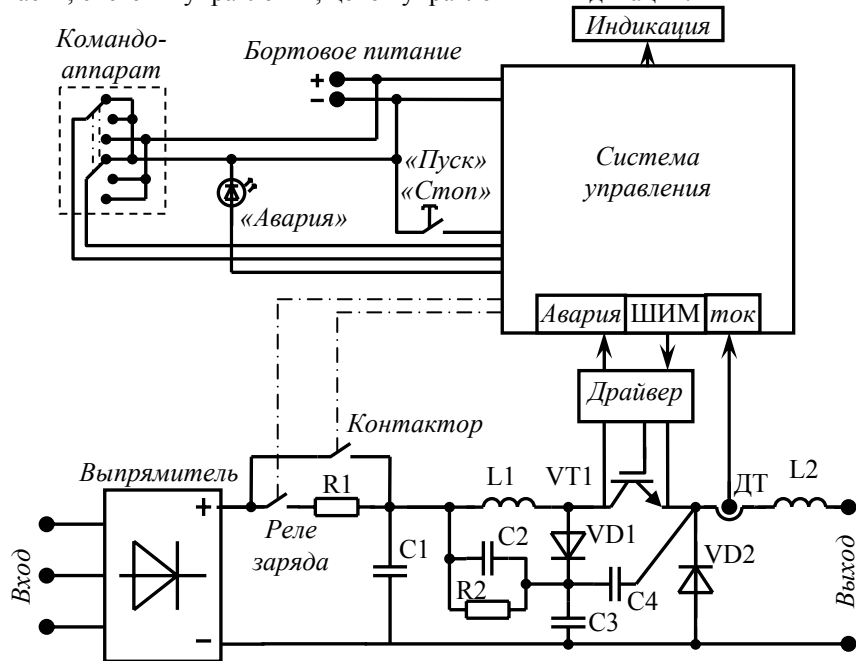


Рис. 2 Структурная схема ШИП.

кателем входной цепи. Зарядная цепь служит для плавного заряда входной емкости ШИП (13200 мкФ). Входная емкость является звеном накопления энергии для импульсного потребителя (ШИП) и сглаживающим фильтром выпрямленного напряжения [4, 6].

Элементы схемы L1, VD1, C2, R2, C3, C4 предназначены для формирования траектории переключения транзистора VT1. Формирователь траектории работает следующим образом: при включении транзистора происходит задержка фронта нарастания тока транзистора относительно фронта спада напряжения на транзисторе.

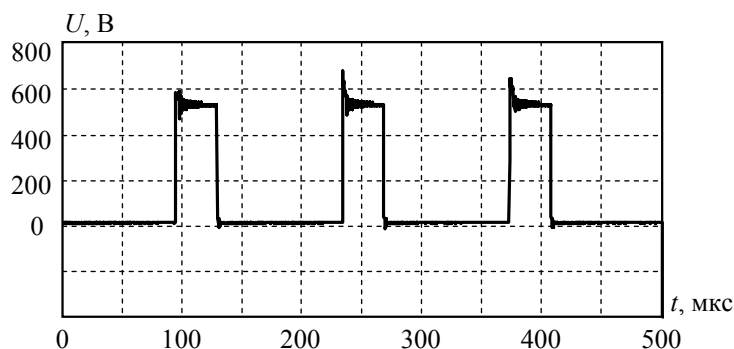


Рис. 3 Осциллограмма напряжения на силовом ключе

На рис. 3 приведена осциллограмма напряжения на силовом ключе.

**Описание работы системы управления.** Разработанная система управления ШИП тягового электропривода трамвая, реализована с помощью микроконтроллера PIC16F73 (компании Microchip). Данный микроконтроллер имеет в своем составе все необходимые средства для реализации поставленной задачи такие как: 22 порта ввода/вывода, 3 таймера, 5 каналов 8-битного АЦП, 2 ШИМ модуля, модуль сравнения.

Силовая часть ШИП построена с использованием полупроводниковых приборов SEMIKRON:

- силовой IGBT транзистор VT1 на основе модуля SKM400GA124D;
- быстрый диод сбросовой цепи VD1 – SKR48F;
- обратный диод цепи нагрузки VD2 - SKKE301F12;
- драйвер управления силовым транзистором SKNH10/12.

Силовая часть содержит входные клеммы для подключения к выпрямителю трехфазного напряжения. Выпрямленное напряжение через ограничивающий резистор подается на конденсаторы входного фильтра с помощью реле заряда. После заряда конденсаторов включается силовой контактор, закорачивающий контакты реле заряда и ограничивающий резистор. Силовой контактор служит размы-

кателем входной цепи. В результате уменьшаются динамические потери в транзисторе. Кроме того токозадерживающая цепь предотвращает протекание тока восстановления через обратный диод в момент включения транзистора. При выключении транзистора ток в индуктивности L1 замыкается по цепи VD1 - C2, энергия, запасенная в дросселе, рассеивается резистором R2. В этой схеме R2, C3, C4, VD1 служат RCD цепью для уменьшения коротких выбросов напряжения на транзисторе при его выключении. В момент выключения транзистора конденсаторы C3, C4 на протяжении некоторого времени замыкают через себя выходной ток.



Рис. 4 Внешний вид платы системы управления.

формация с датчика тока двигателя. Текущее значение тока двигателя сравнивается с заданным током. Сигнал рассогласования поступает на вход ПИ-регулятора тока. Каждому значению тока двигателя соответствует максимальное значение ширины импульса, пропорциональное величине выходного напряжения ШИП (рис. 5).

Данное соотношение реализовано в табличном виде. Регулятор тока формирует сигнал управления ШИМ на IGBT ключ. Частота ШИМ установлена 7 кГц.

На микроконтроллер также возложены функции: пуска/останов преобразователя, индикации состояния, защиты от превышения тока, от перегрева и от понижения напряжения собственных нужд.

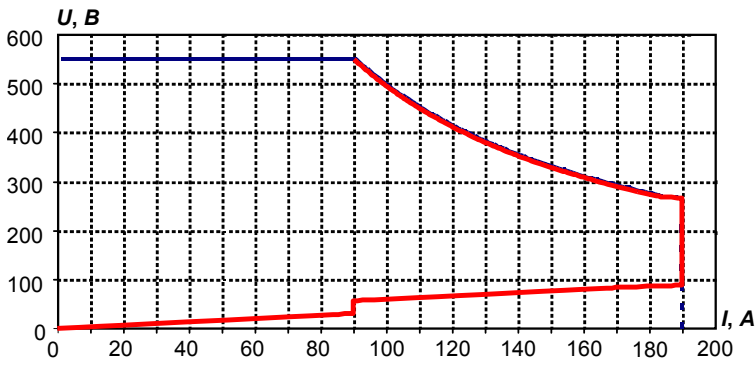


Рис. 5 Характеристика задания напряжения.

Расчетные данные для моделирования динамических процессов электропривода [2]:

1. Номинальная частота вращения электродвигателя в рад/с:

$$\omega_N = 2\pi n_N = 165,5 \text{ 1/c} . \quad (1)$$

2. Номинальный коэффициент ЭДС электродвигателя:

$$k\Phi_N = \frac{(U_N - I_N R_{\Sigma})}{\omega_N} = \frac{(600 - 190 \cdot 0,0836)}{165,5} = 1,72 \text{ В} \cdot \text{с} . \quad (2)$$

3. Номинальный момент двигателя:

$$M_N = k\Phi_N \cdot I_N = 326,8 \text{ Нм} . \quad (3)$$

4. Скорость трамвая при номинальной частоте вращения двигателя 1580 об/мин:

$$V_N = \frac{n_N}{K_p} \cdot \Pi = \frac{26,33}{8,11} \cdot 2,45 = 7,95 \text{ м/с} = 28,6 \text{ км/час} , \quad (4)$$

где  $K_p = 8,11$  – коэффициент передачи редуктора;  $\Pi = \pi D = \pi \cdot 0,78 = 2,45 \text{ м}$  – периметр колеса вагона,  $D$  – диаметр колеса вагона.

5. Приведенное значение момента инерции вагона:

$$J_{\Pi} = m \frac{V_N^2}{\omega_N^2} = 20500 \left( \frac{7,95}{165,5} \right)^2 = 47,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 , \quad (5)$$

где  $m = 20500 \text{ кг}$  – масса вагона.

С учетом момента инерции самого двигателя, приведенное значение момента инерции вагона на каждый двигатель составит:  $J'_{\Pi} \approx 12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

6. Момент сопротивления двигателя при движении вагона на подъеме с уклоном 45%:

На рис. 4 представлен внешний вид платы системы управления и драйвер SKHI10/12 для управления транзистором. Система управления обеспечивает широтно-импульсное регулирование напряжения на якоре ДПТ при ограничении входной мощности на уровне 50 кВт. С помощью командоаппарата, имеющего три положения (0, 1 и 2), подаются команды по следующему алгоритму: 0→1 – поддержание тока якоря на уровне 90 А; 1→2 – разгон с ограничением тока якоря на уровне 190А; 2→1 – удержание тока якоря на достигнутом значении; 0 – все отключено. В системе имеется датчик тока якоря.

На один из входов АЦП поступает информация с датчика тока двигателя. Текущее значение тока двигателя сравнивается с заданным током. Сигнал рассогласования поступает на вход ПИ-регулятора тока. Каждому значению тока двигателя соответствует максимальное значение ширины импульса, пропорциональное величине выходного напряжения ШИП (рис. 5).

**Моделирование динамических процессов электропривода.** Для выполнения расчетов переходных процессов во время разгона трамвайного вагона разработана математическая модель электропривода в среде Matlab/Simulink [3].

Номинальные параметры электродвигателя с последовательным возбуждением ДК-255: мощность  $P_N = 50 \text{ кВт}$ , напряжение  $U_N = 300 \text{ В}$ , ток  $I_N = 190 \text{ А}$ , скорость  $n_N = 1580 \text{ об/мин} = 26,33 \text{ об/с}$ , суммарные сопротивление и индуктивность обмоток  $R_{\Sigma} = 0,0836 \text{ Ом}$  и  $L_{\Sigma} = 0,00426 \text{ Гн}$  соответственно.

$$M_c = F_c \frac{D}{2 \cdot 4 \cdot K_p} = 90497 \frac{0,78}{2 \cdot 4 \cdot 8,11} = 1087 \text{ Нм}, \quad (6)$$

где  $F_c$  – сила сопротивления,  $F_c = m \cdot 0,09 = 20500 \cdot 0,09 = 9225 \text{ кг} = 90497 \text{ Н}$ .

#### Переходные процессы во время разгона вагона на прямолинейном участке без уклона и подъема.

На рис. 6 представлена осциллограмма режима набора скорости вагона при действии алгоритма ограничения потребляемой мощности. Сначала командоаппарат устанавливается в положение 1 и ток двигателей устанавливается на уровне 90А. В момент времени  $t = 1\text{с}$  командоаппарат переводится в положение 2. Средний входной ток ШИП ограничивается на уровне 90А, а средняя потребляемая мощность – на уровне 50 кВт. При этом обеспечивается плавное нарастание скорости вагона (пунктирная линия) и к моменту времени  $t = 18\text{с}$  скорость достигает 23 км/час. При переводе командоаппарата в положение 0 ( $t = 18\text{с}$ ) ток снижается до нуля.

На рис. 7 представлена осциллограмма режима набора скорости вагона без алгоритма ограничения с той же последовательностью включений командоаппарата. Максимальное значение среднего входного тока достигает 150 А, а максимальная средняя потребляемая мощность – 83 кВт.

#### Переходные процессы во время разгона вагона на подъем с уклоном 45%.

На рис. 8 представлена осциллограмма набора скорости вагона при движении на подъем с уклоном 45% при действии алгоритма ограничения потребляемой мощности с той же последовательностью включений командоаппарата и наброса/сброса момента сопротивления, что и на рис. 9. Во время действия момента сопротивления (с момента времени  $t = 5\text{с}$  до  $t = 15\text{с}$ ) скорость вагона составляет 5 км/час. При этой скорости средний входной ток ШИП ограничивается на уровне 90А, а средняя потребляемая мощность – на уровне 50 кВт.

На рис. 9 представлена осциллограмма режима набора скорости вагона без алгоритма ограничения с той же последовательностью включений командоаппарата и наброса/сброса момента сопротивления. Во время действия момента сопротивления значение среднего входного тока составляет 190 А, а средняя потребляемая мощность – 100 кВт.

**Выводы.** Разработанная система управления автономным питанием обеспечивает перевод схем силовой и вспомогательных цепей 600В вагона из режима питания от контактной сети в режим автономного питания или, наоборот, по команде, поданной вручную. В режиме автономного питания обеспечивается:

- автоматический пуск тяговых двигателей;
- защита от короткого замыкания в цепи тяговых двигателей и вспомогательных цепях 600В;
- защита от попадания высокого напряжения на пантограф со стороны выпрямителя;

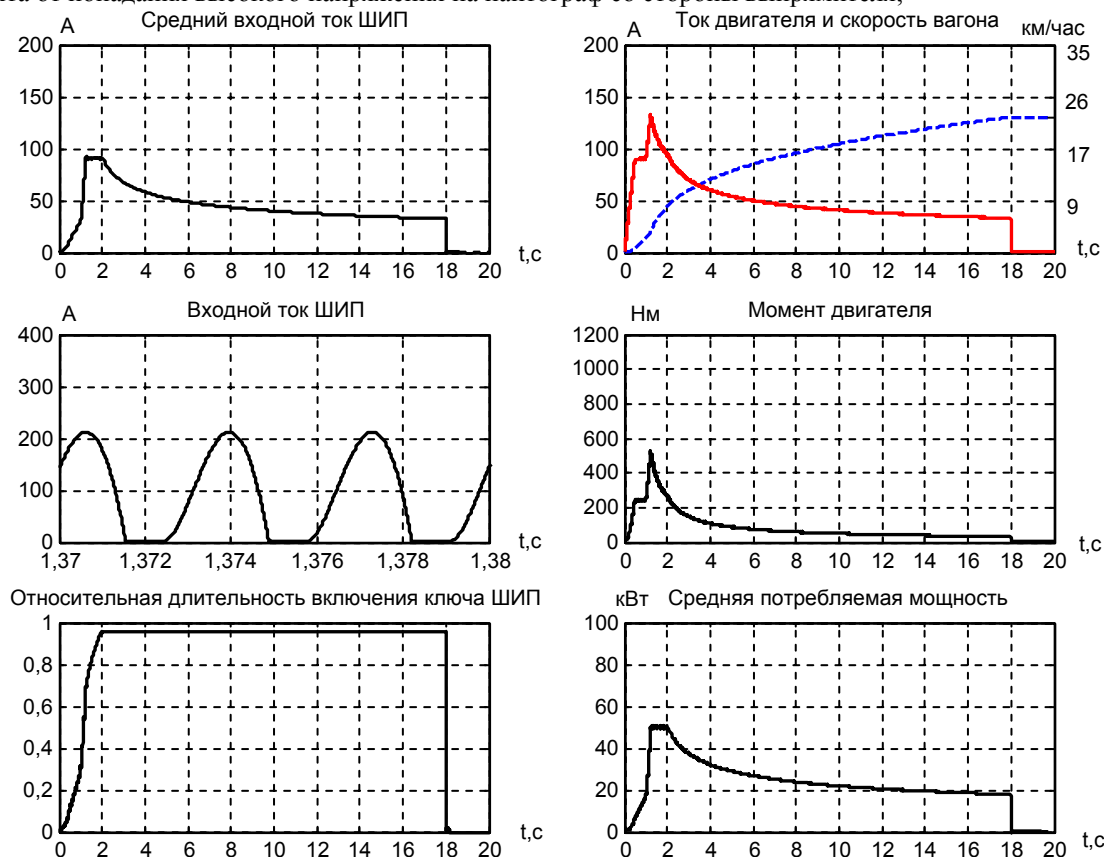


Рис. 6 Переходные процессы во время разгона вагона на прямолинейном участке без уклона и подъема при действии алгоритма ограничения.

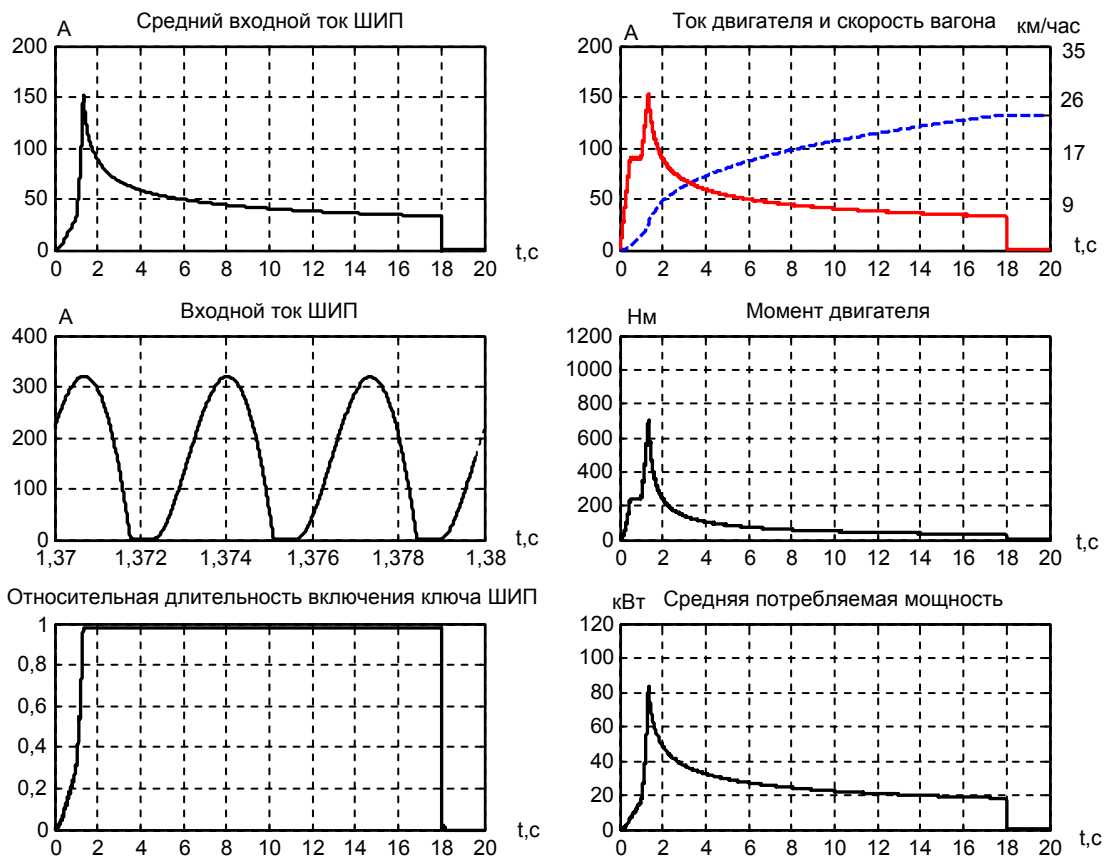


Рис. 7 Переходные процессы во время разгона вагона на прямолинейном участке без уклона и подъема без алгоритма ограничения.

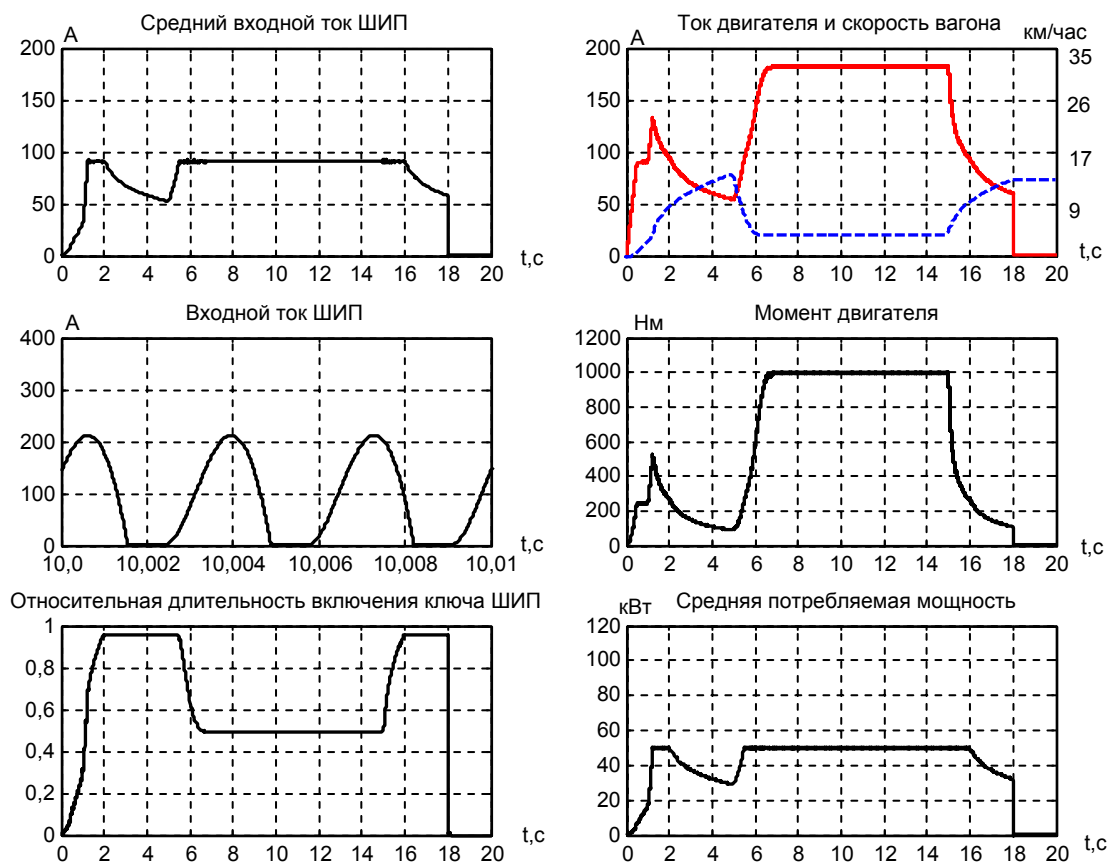


Рис. 8 Переходные процессы во время разгона вагона на подъем с уклоном 45% при действии алгоритма ограничения.

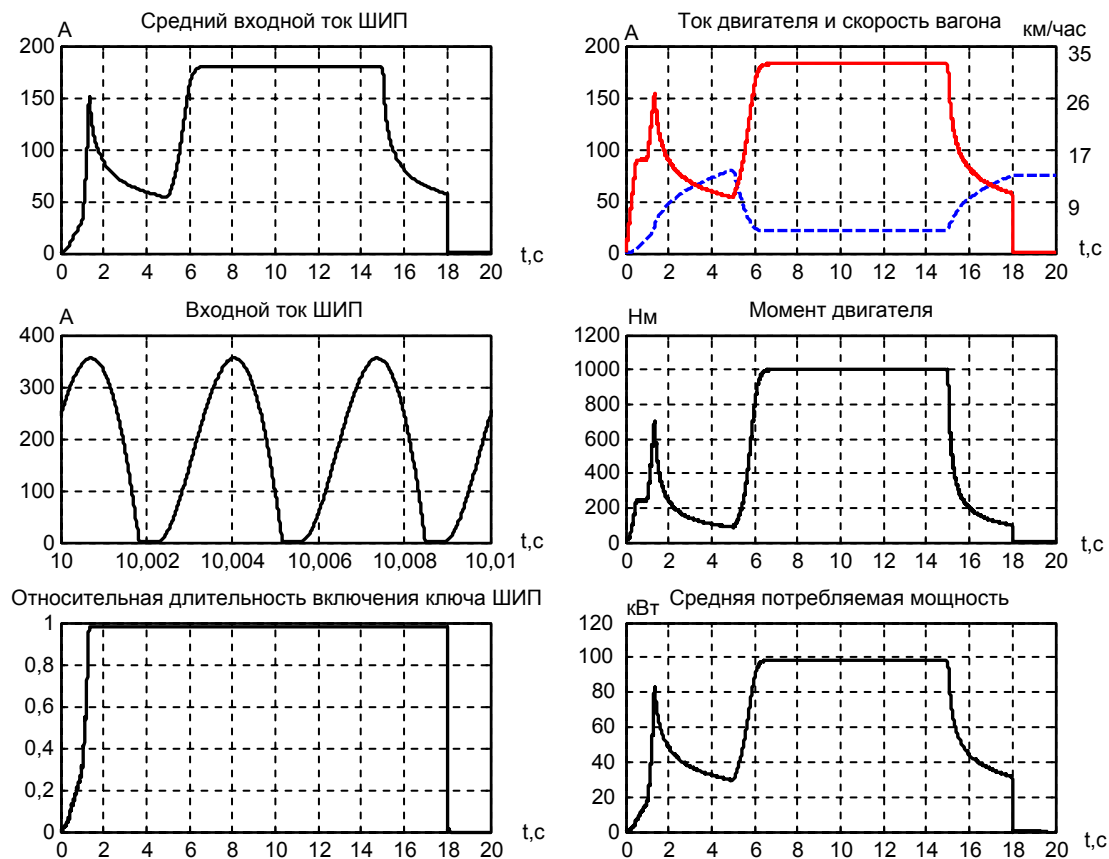


Рис. 9 Переходные процессы во время разгона вагона на подъем с уклоном 45% без алгоритма ограничения.

- автоматическое переключение из режима автономного питания в режим питания от контактной сети (с отключением возбуждения генератора) автоматическое переключение при включении автоматического выключателя силовой цепи в схеме питания от контактной сети или при появлении напряжения на пантографе со стороны контактной сети;

- сигнализация режимов и состояния дизель-генераторного агрегата на пультах автономного питания постов управления вагоном.

- защита от короткого замыкания и перекаса фазных напряжений генератора с действием на отключение возбуждения.

Ходовые испытания трамвайного вагона в г. Киеве показали, что условия, заданные техническим заданием, выполняются. Таким образом, вагон КСВ-2 в режиме автономного питания может использоваться для выполнения работ при отключенной контактной сети. Во всем диапазоне скорости система управления поддерживает заданную величину входной мощности 50кВт. При движении вверх на участке пути с уклоном и на кривых ток якоря ограничивается на уровне 190 А, обеспечивая при этом максимальный тяговый момент. При разгоне по ровному и прямому участку пути достигается максимум скорости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта. М.: Высшая школа, 1976.
- [2] Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат. 2001. - 704с.
- [3] Ларин А.П., Полковников В А. Применение программного пакета Matlab-Simulink для исследования динамики рулевого электропривода с сериесным электродвигателем // X Конференция по Вычислительной Механике и Программным Системам, Математическое моделирование. – т. 12. – №8. – 2000. – С. 21-29.
- [4] Павлов В.Б., Юрченко О.Н., Павленко В.Е. Полупроводниковые преобразователи электротранспортных средств различного функционального назначения // Технічна електродинаміка. - №2(11). – Ч.2. – 2005. – С.59-62.
- [5] Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Под ред. Ю.М. Инькова. М.: Транспорт, 1982.
- [6] Резников С., Коняхин С., Соколов А. Спаренные однотактные импульсные преобразователи напряжения и их применение в силовых электроприводах постоянного и переменного тока // Силовая электроника. - №2. – 2007. – С.40-43.