

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

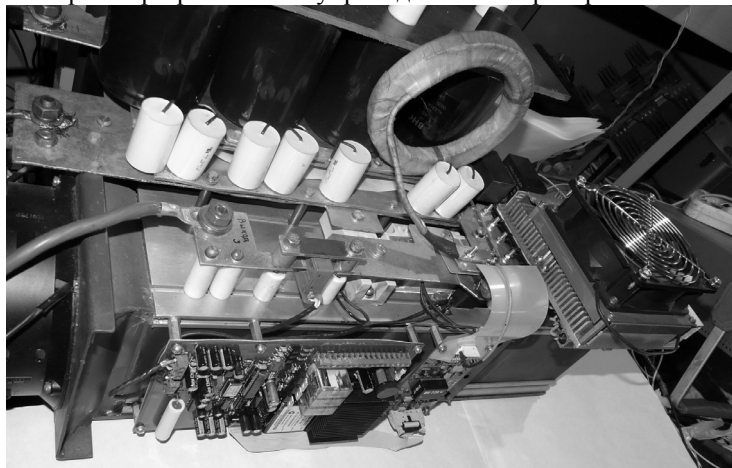


Рис. 1. Внешний вид ШИП без кожуха.

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.

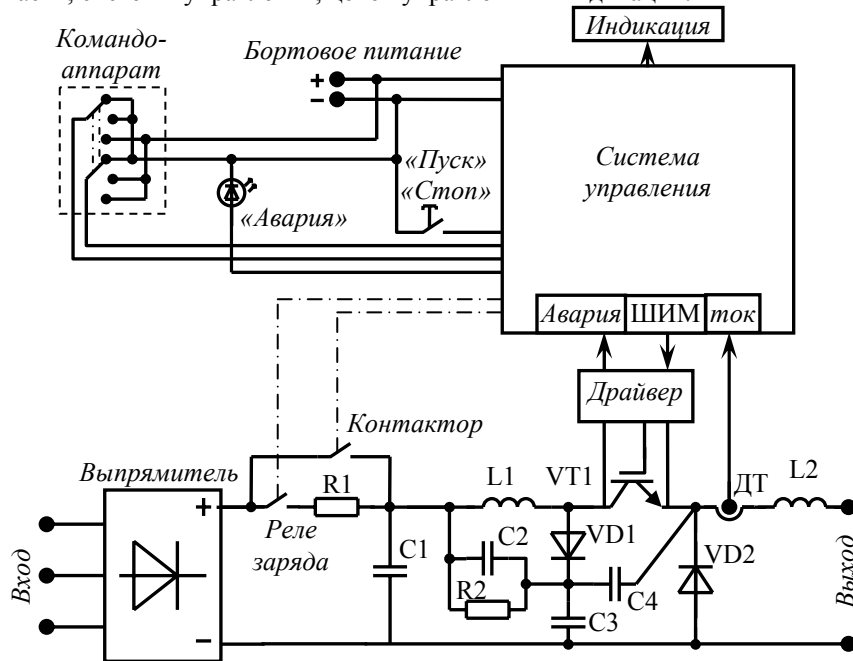


Рис. 2 Структурная схема ШИП.

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. 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.

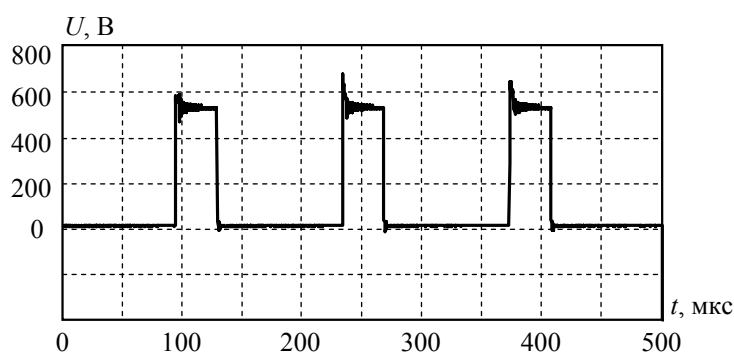


Рис. 3 Осциллограмма напряжения на силовом ключе

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.

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.



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/останова преобразователя, индикации состояния, защиты от превышения тока, от перегрева и от понижения напряжения собственных нужд.

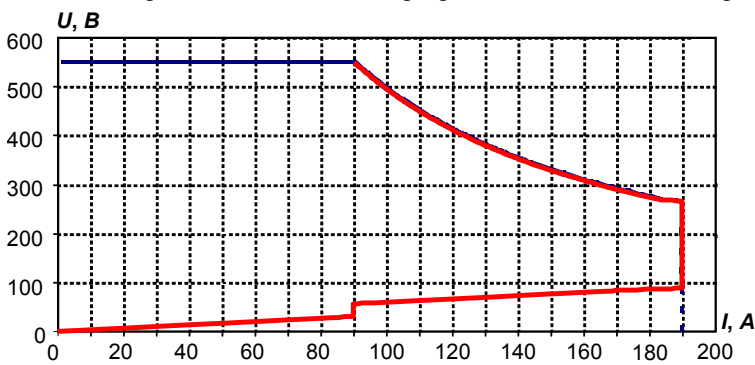


Рис. 5 Характеристика задания напряжения.

Расчетные данные для моделирования динамических процессов электропривода [2]:

1. Номинальная частота вращения электродвигателя в рад/с:

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

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 SKH10/12 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;

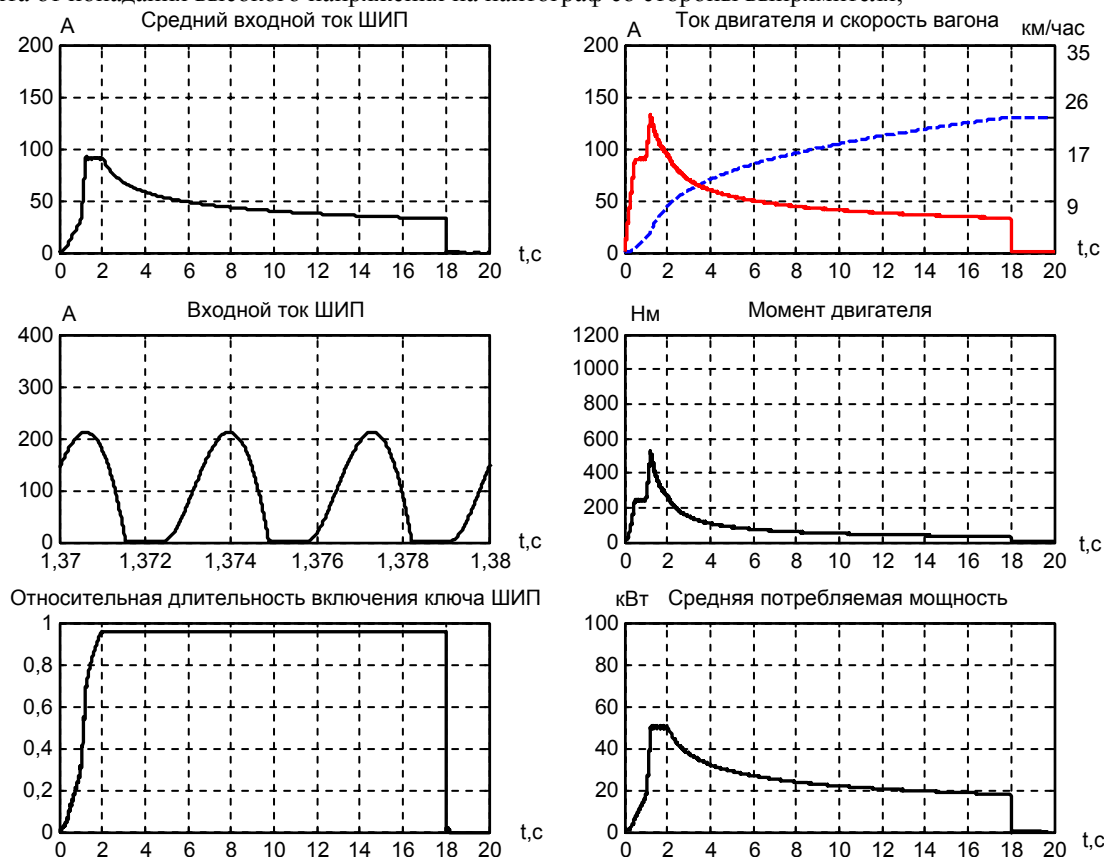


Рис. 6 Переходные процессы во время разгона вагона на прямолинейном участке без уклона и подъема при действии алгоритма ограничения.

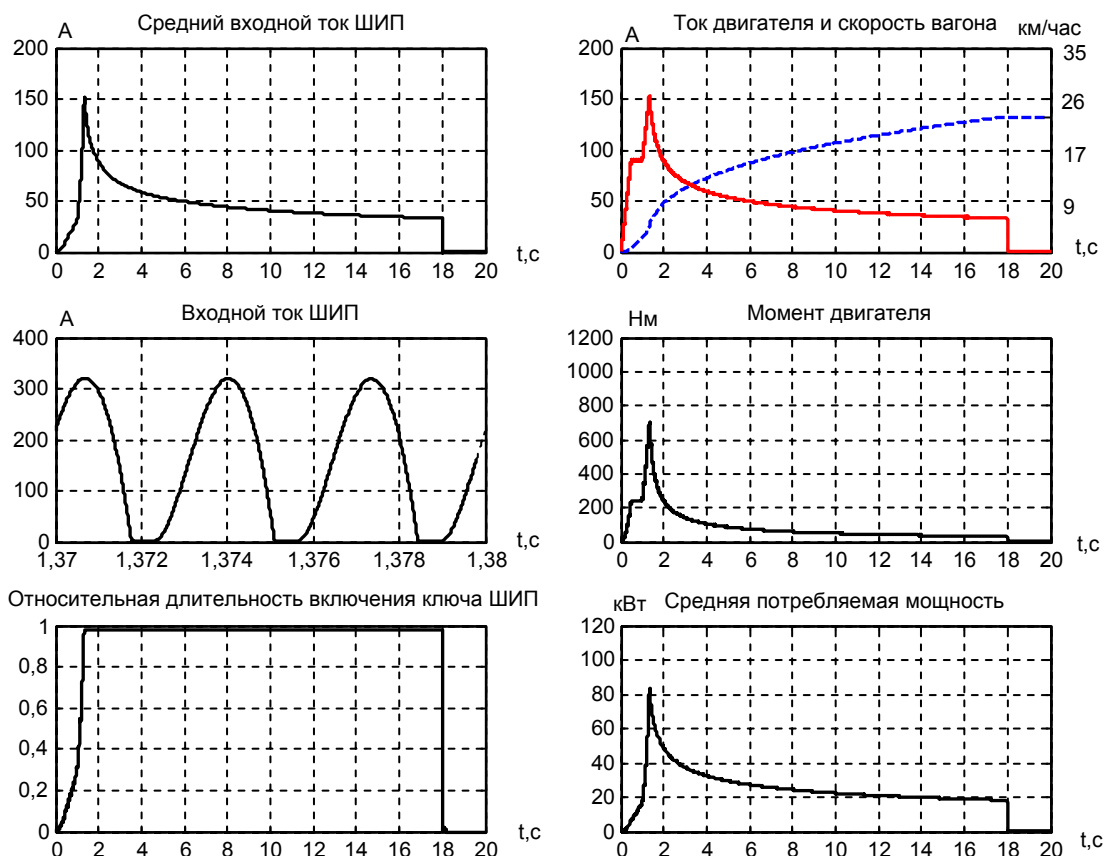


Рис. 7 Переходные процессы во время разгона вагона на прямолинейном участке без уклона и подъема без алгоритма ограничения.

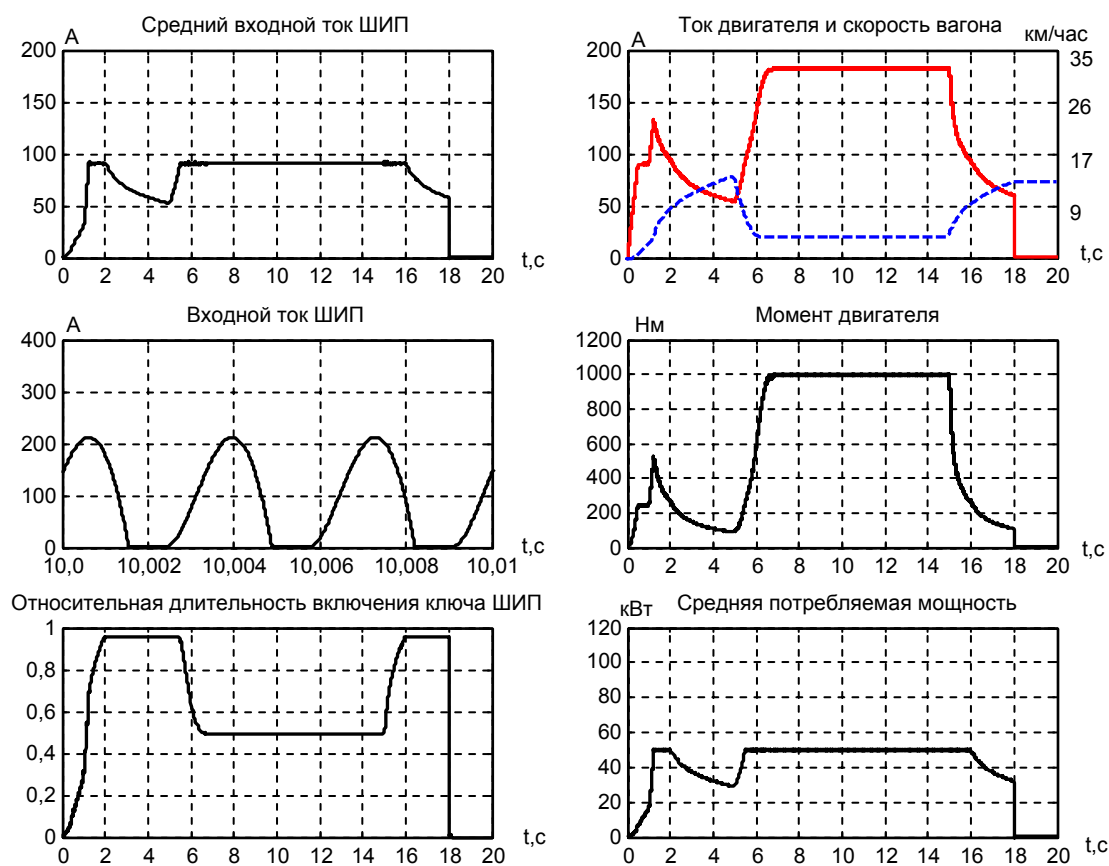


Рис. 8 Переходные процессы во время разгона вагона на подъем с уклоном 45% при действии алгоритма ограничения.

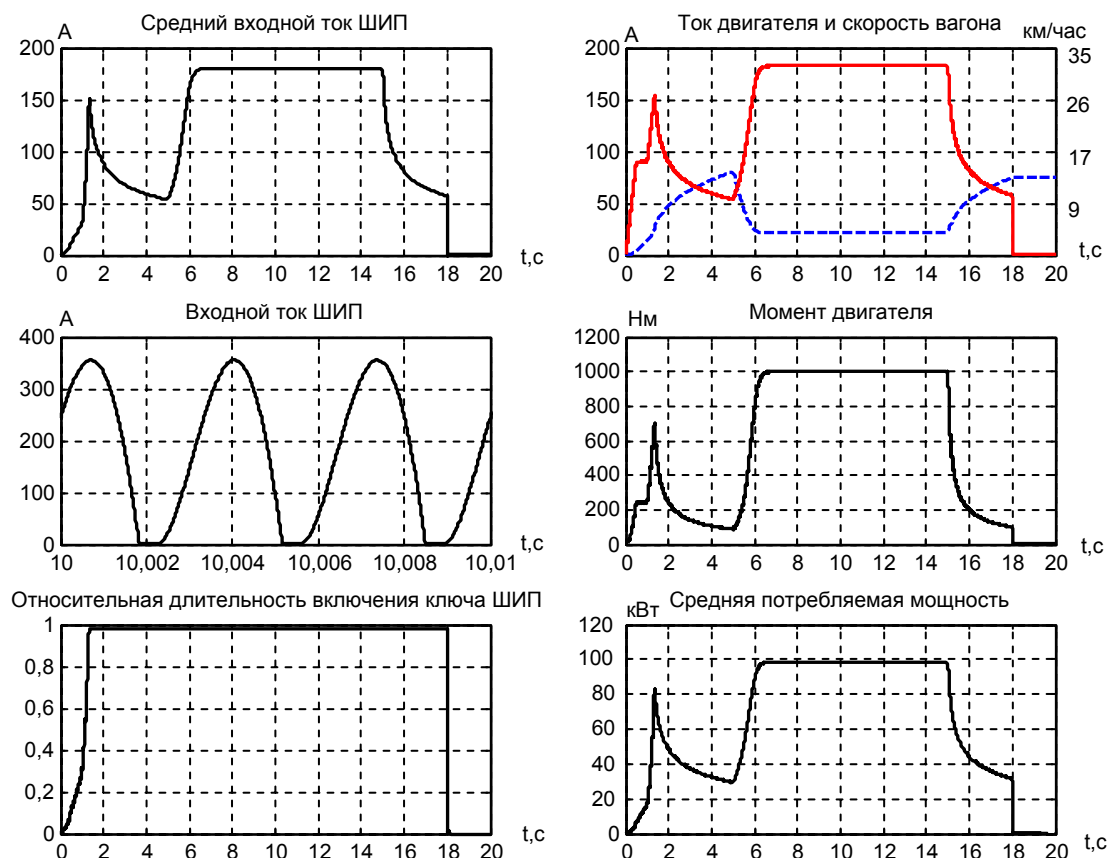


Рис. 9 Переходные процессы во время разгона вагона на подъем с уклоном 45% без алгоритма ограничения.

- 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 серийным 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.