

С. В. Шапиро, С. Р. Муфтиев

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Рассматривается вопрос использования метода стабилизации напряжения постоянного тока с использованием звена высокой частоты в тяговых подстанциях городского электрического транспорта, приводится описание и принцип работы стабилизатора напряжения, модель силовой части в системе моделирования Orcad 9.2, передаточная функция исполнительного органа системы стабилизации. *Стабилизации напряжения постоянного тока; тяговая подстанция городского электротранспорта; стабилизатор напряжения*

Согласно ГОСТ 6962-75, питание электрических цепей электрифицированного транспорта осуществляется от воздушной контактной сети постоянного тока напряжением  $550 \pm 150$  В. Номинальное напряжение на выходе тяговой подстанции составляет 600 вольт, максимальное – 700 В.

Проведенные измерения напряжений холостого хода на тяговых подстанциях города Уфы показали, что в реальности оно поднимается до 900 В. Такое повышенное напряжение отрицательно сказывается на дорогостоящем коммутационном и преобразовательном электрооборудовании подвижного состава и часто приводит к выходу его из строя. С другой стороны, понижение напряжения контактной сети приводит к увеличению времени разгона двигателя электротранспортного средства и увеличению длины тормозного пути, а также перегреву силовых контактов и обмоток тягового двигателя. Ясно, что стабилизация напряжения сети питания трамваев и троллейбусов позволяет существенно повысить качество их работы – безопасность, надежность – и снизить расход электроэнергии.

Муниципальное управление электротранспорта городского округа города Уфы совместно с научно-исследовательской лабораторией кафедры физики Уфимской государственной академии экономики и сервиса разрабатывает систему стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта. Структурные схемы тяговых подстанций приведены на рис. 1, 2.

Тяговые подстанции городского электротранспорта относятся к электроприемникам первой категории. Питание подстанций системы централизованного электроснабжения должно осуществляться не менее чем двумя вводами от независимых источников.

От промышленной сети в ячейку ввода тяговой подстанции приходит напряжение 6 или 10 кВ (далее 10 кВ). Через понижающий трансформатор, выпрямительный блок, сборные шины, фидерные автоматы постоянное напряжение подается в контактную сеть электротранспорта.

В статье описывается модуль стабилизации напряжения для тяговых подстанций, основанный на использовании звена высокой частоты, как наиболее экономичный способ [1]. Система стабилизации напряжения состоит из инвертора, который преобразует постоянное напряжение 600 В в переменное с частотой 5 кГц, автотрансформатора, который служит для изменения амплитуды напряжения с частотой 5 кГц [3], выпрямителя на IGBT транзисторах, датчика напряжения и системы управления. Структурная схема системы стабилизации приведена на рис. 3.

### 1. ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Силовая часть системы стабилизации напряжения приведена на рис. 4. В нее входит автономный инвертор, собранный по мостовой схеме на IGBT транзисторах Z1–Z4. Инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное с частотой 5 кГц. Нагрузкой для инвертора является автотрансформатор, вторичная обмотка которого служит для получения различных по уровню напряжений на выходе. Выводы автотрансформатора подключены к выпрямителю, собранному по мостовой схеме на силовых диодах D1 и D2 и IGBT транзисторах Z5, Z6, которые работают в ключевом режиме. Изменяя длительность импульса напряжения затвор-эмиттер  $U_{зэ}$  IGBT транзисторов Z5, Z6 можно управлять напряжением на нагрузке, т. е. контактной сети.

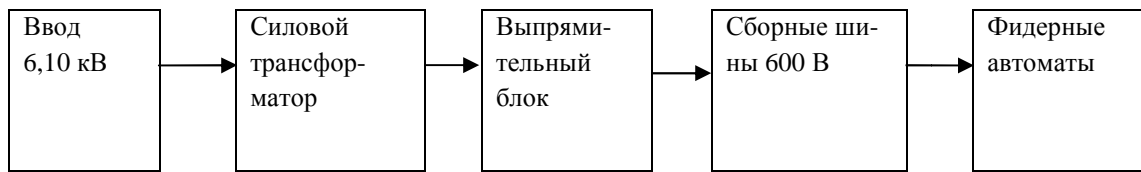


Рис.1. Структурная схема тяговой подстанции

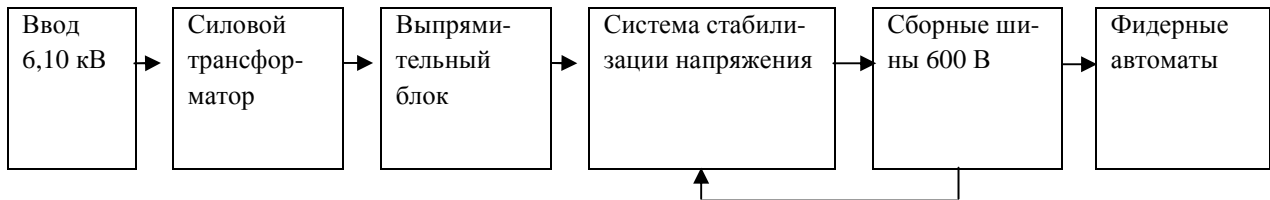


Рис. 2. Структурная схема тяговой подстанции с системой стабилизации напряжения 600 В

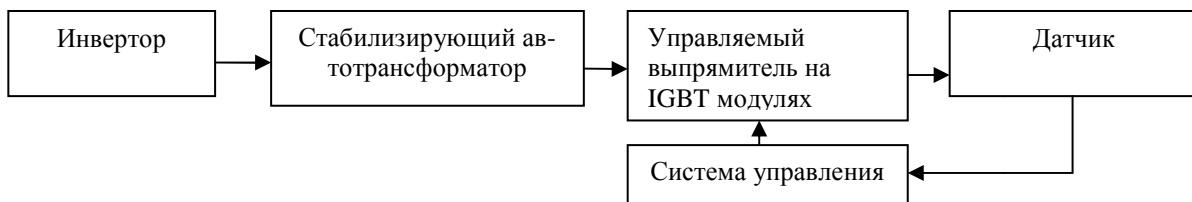


Рис. 3. Структурная схема системы стабилизации напряжения

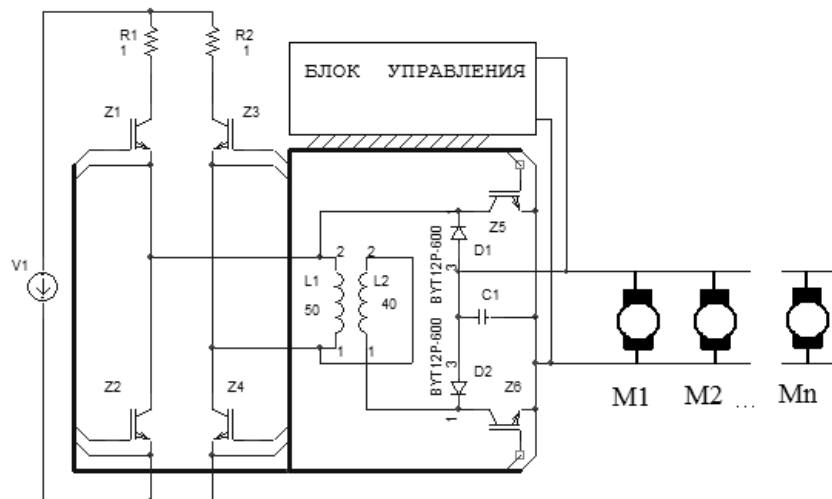
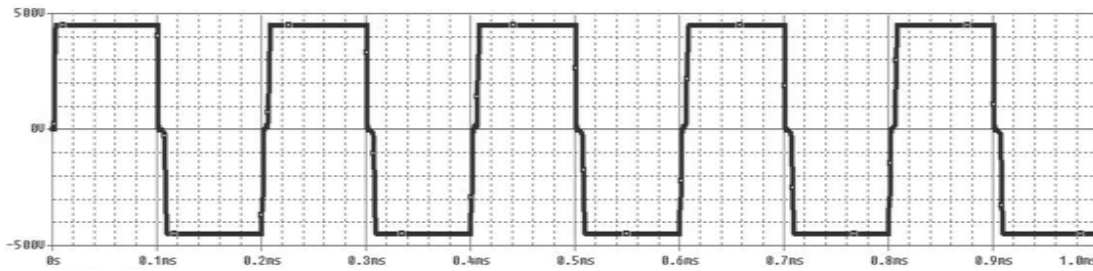


Рис. 4. Силовая часть системы стабилизации

Блок управления выполняет несколько функций: управляет работой транзисторных ключей инвертора, регулирует угол открытия транзисторов выпрямителя, сравнивает напряжение в контактной сети с эталонным значением.  $M1, M2, M_n$  – тяговые двигатели электропоезда на участке контактной сети.

Напряжение на выходе выпрямительного агрегата тяговой подстанции (на схеме обозначено  $V_1$ ) подается на вход автономного инвертора, собранного по мостовой схеме на транзисторах  $Z1-Z4$ . В момент времени от 0 до  $t_1$  сигнал с блока управления открывает транзисторы  $Z1, Z4$  и на первичную обмотку автотрансформатора подается напряжение  $V_1$ .

Рис. 5. Напряжение  $u_1(t)$  инвертора

В момент времени от  $t_1$  до  $t_2$ , напряжение на первичной обмотке автотрансформатора (клеммы 1–4)  $u_1$  меняет свой знак на противоположный, так как открываются транзисторы Z2, Z3, а транзисторы Z1, Z4 закрываются. Таким образом, постоянное напряжение 600 В преобразуется в переменное напряжение с частотой 5 кГц на первичной обмотке автотрансформатора. График зависимости  $u_1(t)$  (рис. 5).

Автотрансформатор состоит из первичной обмотки L1, вторичной обмотки L2, ферритового сердечника. Выводы вторичной обмотки автотрансформатора подключены к однофазному мостовому выпрямителю на диодах D1, D2, IGBT модулях Z5, Z6, который подключается кабелем электропитания к контактной сети. Блок управления осуществляет измерение напряжения на нагрузке, сравнивает с эталоном, и если напряжение в контактной сети выше нормы, то на транзисторы Z5, Z6 подается напряжение  $U_{з3}$  меньше, чем в предыдущий момент времени. И наоборот, если в контактной сети напряжение ниже нормы, тогда блок управления подает большее напряжение  $U_{з3}$  на транзисторы Z5, Z6. Таким образом осуществляется стабилизация напряжения.

## 2. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЯГОВОГО НАПЯЖЕНИЯ

Для вывода передаточной функции системы стабилизации тягового напряжения рассмотрим систему уравнений тягового двигателя.

Основные уравнения тягового двигателя (двигателя с серийным возбуждением):

$$U = e + iR_p + L di/dt, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение тяговой сети,  $i$  – ток якоря,  $R$  – сопротивление якорной цепи, включающее в себя сопротивления:

- 1) обмотки возбуждения  $w_b$ ,
- 2) обмотки якорной цепи,

- 3) щеточных контактов,
- 4) регулировочного реостата  $R_p$  (рис. 6);  
 $e$  – ЭДС обмотки якоря, определяемая по формуле:

$$e = c_e \Phi n. \quad (2)$$

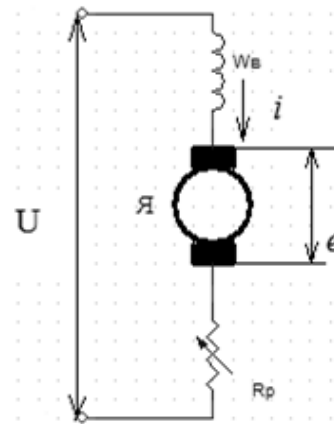


Рис. 6. Схема нагрузки тягового напряжения

В этой формуле  $c_e$  – обмоточный коэффициент,  $\Phi$  – поток, создаваемый обмоткой возбуждения  $w_b$ ,  $n$  – число оборотов якоря [об./мин.].

Обмоточный коэффициент  $c_e$  равен

$$c_e = p N/a, \quad (3)$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя,  $N$  – число проводников обмотки якоря,  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря. Поток возбуждения  $\Phi$  равен

$$\Phi = \tau l_{я} B = l_{я} i w_l \mu_0 \tau / k_{\delta} k_{\mu} \delta = k_{\Phi} i, \quad (4)$$

где  $\tau$  – полюсное деление якоря, равное  $\pi D/2p$  ( $D$  – диаметр якоря),  $l_{я}$  – осевая длина якоря,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [Н/м] – магнитная проницаемость вакуума,  $k_{\delta}$  – зубцовый коэффициент, равный  $(1,3 \div 1,8)$ ,  $k_{\mu}$  – коэффициент насыщения участков магнитопровода – полюса, статора и ротора (якоря) и зубцов, равный  $(2 \div 2,5)$ ,  $\delta$  – длина зазора между якорем и полюсным наконечником;  $k_{\Phi}$  – коэффициент пропорциональности потока

Ф и тока якоря  $i$ , определяемый формулой (4) – связь между числом оборотов  $n$  и вращающим моментом двигателя  $M$  определяется вторым законом Ньютона для вращательного движения:

$$M - M_c = I \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления транспортного средства (трения, уклона пути),  $I$  – момент инерции якоря, равный

$$\omega = 2\pi n/60. \quad (6)$$

Вращающий момент двигателя  $M$  определяется по формуле

$$M = c_M \Phi i, \quad (7)$$

где

$$c_M = \frac{pN}{2\pi a} = c_e/2\pi. \quad (8)$$

Индуктивность  $L$  складывается из индуктивности обмотки возбуждения  $L_b$  и индуктивности реакции якоря  $L_a$ . Обе индуктивности определяются в результате расчета магнитной цепи двигателя [6].

Исключив из уравнений (1)÷(8) промежуточные величины –  $M$ ,  $E$ ,  $n$ , получаем

$$L \frac{di}{dt} + iR + c_M 60 k_\phi i \omega = U, \quad (9)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} - c_M k_\phi i^2 = M_c. \quad (10)$$

Уравнения (9)÷(10) позволяют составить передаточную функцию тягового двигателя. Для этого по общепринятой методике заменим переменные величины  $U$ ,  $i$ ,  $\omega$  на сумму начальных значений  $U_0$ ,  $i_0$ ,  $\omega_0$  и инфинитезимальных приращений  $dU$ ,  $di$ ,  $d\omega$ , обусловленных динамикой в управляемой системе обратной связи:

$$\begin{aligned} U &= U_0 + dU; \\ i &= i_0 + di; \\ \omega &= \omega_0 + d\omega; \end{aligned} \quad (11)$$

и подставим в систему (9)÷(10). Получаем для приращений:

$$L \frac{d\delta i}{dt} + \delta i R + c_M 60 k_\phi i_0 \delta \omega + c_M 60 k_\phi \omega_0 \delta i = \delta U, \quad (12)$$

$$I \frac{d\delta \omega}{dt} - 2c_M k_\phi i_0 \delta i = 0. \quad (13)$$

Для того, чтобы объединить оба уравнения в одно, т. е. исключить  $\delta \omega$ , продифференцируем уравнение (12) по времени и подставим из уравнения (13) производную  $\frac{d\delta \omega}{dt}$ . После несложных преобразований получаем:

$$L \frac{d^2 \delta i}{dt^2} + (R + c_M 60 k_\phi \omega_0) \frac{d\delta i}{dt} + 2\delta i \frac{c_M^2 60 k_\phi^2 i_0^2}{I} = \delta U. \quad (14)$$

Переходя к операторному изображению Лапласа, получаем:

$$[Lp^2 + (R + c_M 60 k_\phi \omega_0)p + 2 \frac{c_M^2 60 k_\phi^2 i_0^2}{I}] \delta i(p) = \delta U, \quad (15)$$

где  $\delta i(p)$  – изображение  $\delta i$ .

Таким образом, передаточная функция тягового двигателя равна

$$W(p) = \frac{\delta U}{\delta i(p)} = \frac{k_y}{T_1 + T_2 p + 1}, \quad (16)$$

где  $k_y$  – коэффициент передачи, равный

$$k_y = \frac{I}{120 c_M^2 60 k_\phi^2 i_0^2}; \quad (17)$$

$T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени, равные

$$T_1 = \frac{\sqrt{LI/120}}{c_M^2 k_\phi^2 i_0^2}, \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{R + c_M 60 k_\phi \omega_0}{c_M^2 60 k_\phi^2 i_0^2}. \quad (19)$$

### 3. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Базовыми элементами при разработке системы были выбраны современные IGBT-транзисторы, или модули, характеристики которых позволяют работать с достаточно большими токами и напряжениями [2].

Сильноточные модули с электрической изоляцией, как правило, содержат ключи, соединенные по полумостовой ключевой схеме или с одноключевой конфигурацией. В этих модулях диапазон номинальных токов колеблется в пределах от 25 до 2500 ампер, а рабочее напряжение доходит до 3500 вольт.

Привлекательными чертами сильноточных модулей являются: наличие электрической изоляции, простота монтажа с охладителем и легкость связи с другими модулями для повышения нагрузки цепи. Они также позволяют избежать использования параллельного соединения ключей для токов, превышающих сотни ампер [5].

Использование приборов со встроенными обратными быстродействующими диодами становится особенно предпочтительным при разработке инверторов. В этом случае требуемое число силовых полупроводниковых компонентов уменьшается на 50% по сравнению с использованием IGBT и диодов в виде отдельных элементов. Перекрываемые области диапазонов токов, где использование дискретных приборов экономически предпочтительнее по сравнению с сильноточными модулями, могут быть расширены за счет параллельного соединения отдельных приборов [4].

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ORCAD 9.2

Для моделирования работы системы стабилизации из программных пакетов выбрана OrCAD 9.2. Среда OrCAD 9.2 является универсальным средством сквозного проектирования электронных систем и обладает широкими возможностями.

На рис. 7 изображена модель системы стабилизации. В качестве ключей выбраны IGBT модули компании Mitsubishi Electric. Зависимость  $U_1(t)$  инвертора (напряжение на выходе) изображена на рис. 5. Генераторами служат модели источников напряжения прямоугольных

импульсов  $V_{pulse}$ , выбранные из стандартных библиотек OrCAD. Модель трансформатора взята из библиотеки Analog, модель сердечника – из библиотеки Magnetic. Модель IGBT модуля CM600HA-12H тоже присутствует в стандартном наборе библиотек OrCAD.

Диаграммы, полученные в результате моделирования в среде OrCAD 9.2 и показывающие работу системы стабилизации показаны на рис. 8. Таким образом, выпрямитель, который работает в режиме широтно-импульсного модулятора, позволяет стабилизировать напряжение в контактной сети городского электротранспорта.

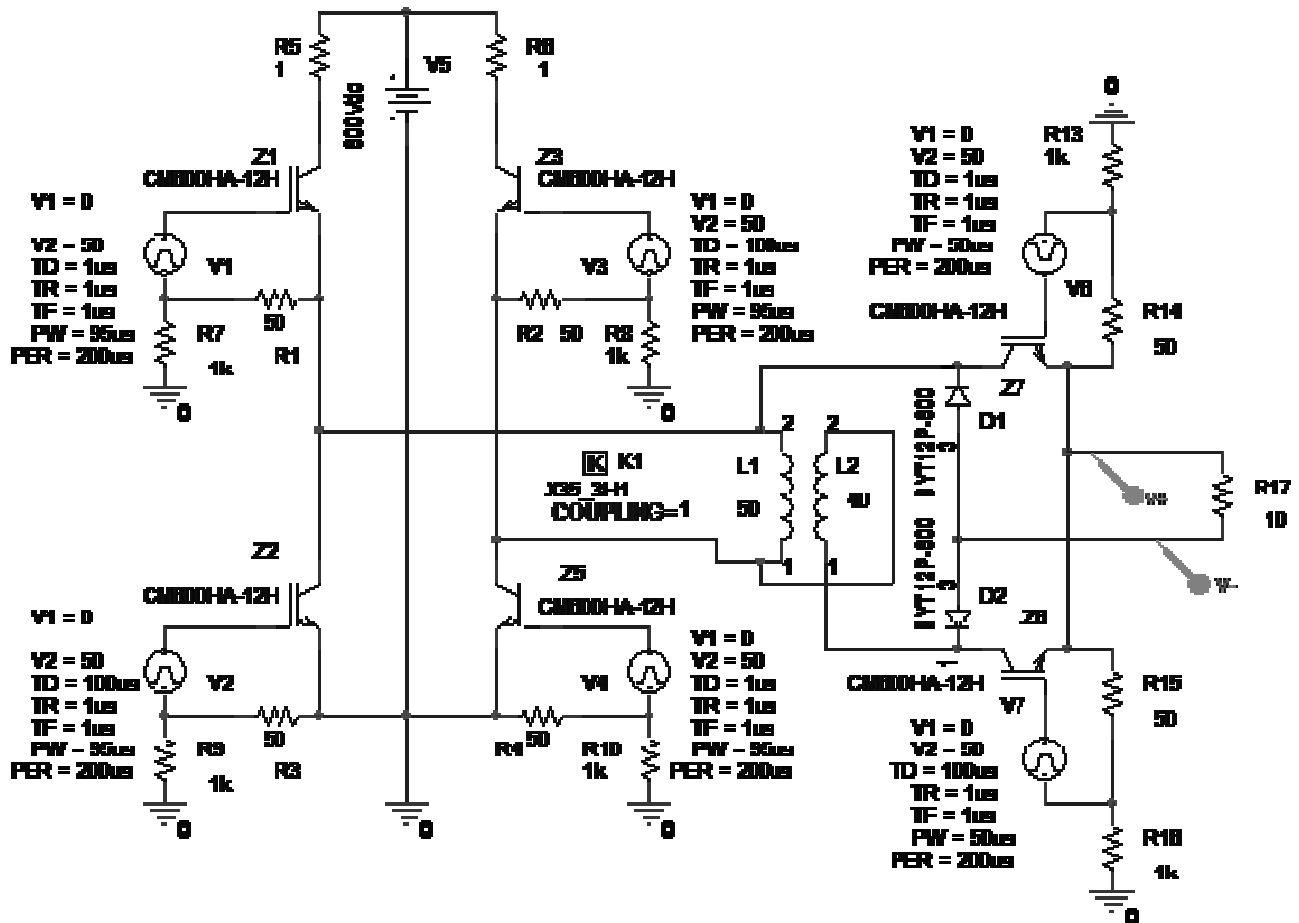
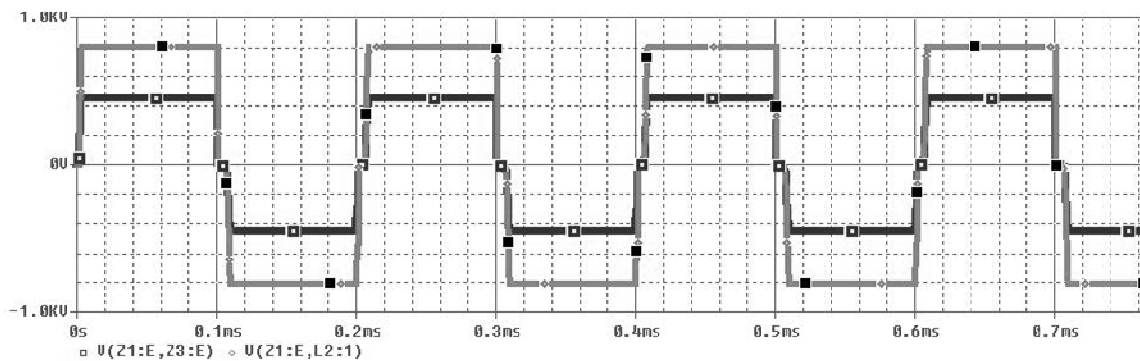
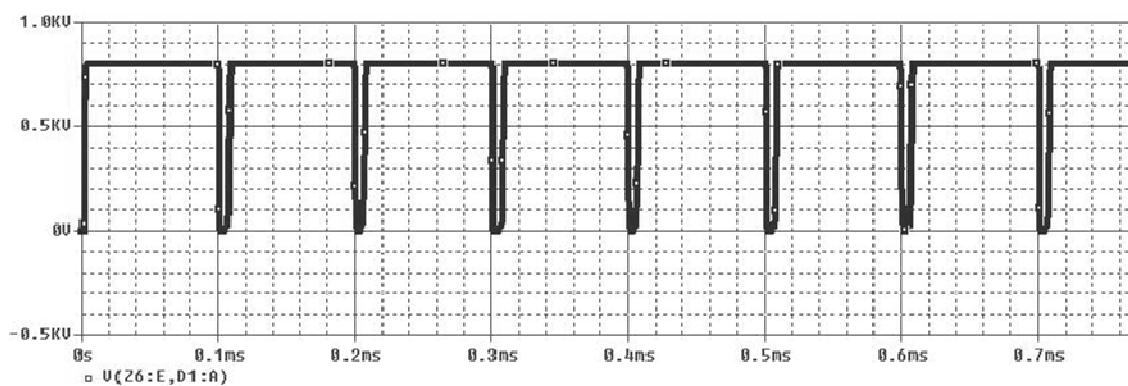


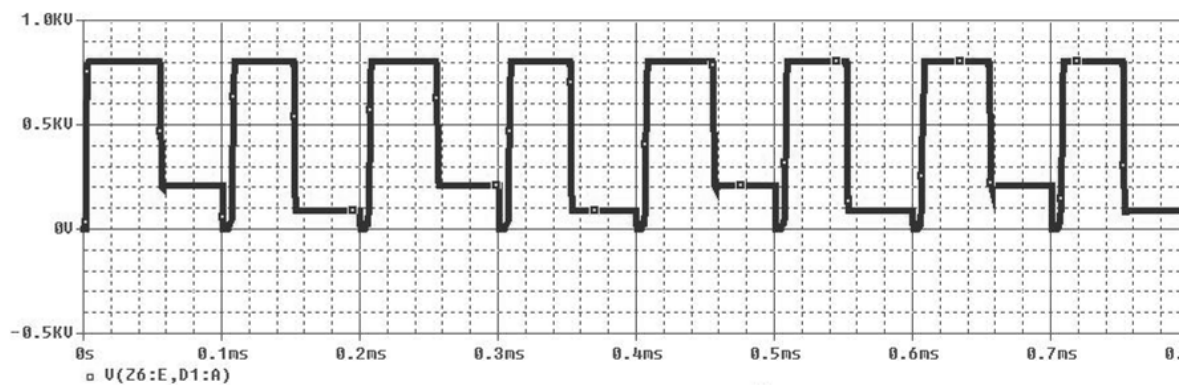
Рис. 7. Модель силовой части системы стабилизации



а



б



в

**Рис. 8.** Диаграммы напряжений при работе системы стабилизации: *а* – форма напряжения на входе и на выходе автотрансформатора; *б* – форма напряжения на выходе выпрямителя при полностью открытых модулях Z5, Z6; *в* – форма напряжения на выходе выпрямителя при открытых на 50% модулях Z5, Z6

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Л. А. Краус [и др.]. М.: Энергия, 1980. 288 с.
2. **Шапиро С. В.** Резольвента Лагранжа и ее применение в электромеханике. Энергоатомиздат, 2008.
3. **Вдовин С. С.** Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. 208 с.
4. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах / В. П. Дьяконов [и др.]. М.: СОЛОН-Р, 2002. 512 с.
5. **Колпаков А.** MELCOSIM? IPOSIM? EMISEL? О выборе и замене модулей IGBT // Силовая электроника. 2005. № 1.
6. **Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И.** OrCAD. Моделирование «Поваренная книга». М.: Солон-пресс, 2005. 200 с.

**ОБ АВТОРАХ**

**Шапиро Семен Валентинович**, зав. каф. общей физики Уфимск. гор. академии экономики и сервиса. Д-р техн. наук, проф.



**Муфтиев Салават Разитович**, вед. инж.-энергетик троллейбусн. депо № 1 МУЭТ г. Уфы. Дипл. инж. по электрон. технике (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. разработки систем стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта.