

Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.И. Ковальчук, Д.С. Крылов

## ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "МЕТОДЫ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ"

*У даній статті описаний віртуальний лабораторний стенд для дослідження автономного паралельного інвертора струму, виконаний з використанням пакету програм Matlab/Simulink/Power System BlockSet.*

*В настоящей статье описан виртуальный лабораторный стенд для исследования автономного параллельного инвертора тока, выполненный с использованием пакета программ Matlab/Simulink/Power System BlockSet.*

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы выработки у студентов практических навыков работы с устройствами силовой электроники предполагают создание лабораторных стендов на основе маломощных промышленных образцов или физических моделей устройств, стоимость разработки, изготовления и эксплуатации которых в современных условиях оказывается значительно выше финансовых возможностей украинских вузов. Несмотря на высокую стоимость "физические" лабораторные стенды имеют существенный недостаток, заключающийся в ограниченных возможностях изменения параметров и режимов работы исследуемого устройства, а также в ограничениях по установочной мощности установки. Вследствие этого электромагнитные процессы и рабочие характеристики, исследуемые на лабораторном стенде, значительно отличаются от электромагнитных процессов и характеристик прототипов, имеющих установленную мощность на несколько порядков большую, чем лабораторный стенд.

С другой стороны компьютерное моделирование электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях энергии является эффективным инструментом ускорения разработок и исследования характеристик преобразователей и систем электропитания на их основе. Широкое распространение при моделировании получил язык программирования *MatLab* и пакеты его расширения *Simulink* и *Control system Toolbox* [1-3]. *MatLab*-модели преобразователей различных типов, как правило, могут быть выполнены с высоким уровнем детализации силовых схем и систем управления, они позволяют исследовать переходные и установившиеся процессы с приемлемыми затратами времени на моделирование. Поэтому использование персональных компьютеров (PC) и современных программ моделирования позволяет создавать виртуальные лабораторные стенды [4], [5] качественно отличающиеся от традиционных возможностью точного учёта всех параметров и особенностей электромагнитных процессов в исследуемом устройстве, а также возможностью изменять в широких пределах любые параметры и режимы работы схемы. Студент имеет возможность самостоятельно осуществить расчет, моделирование и исследование любого типа устройства силовой электроники. Если персональный компьютер, лицензионные пакеты операционной системы *Windows* и какой-либо программы моделирования, например, *Matlab/Simulink* приобретены заранее, то стоимость разработки виртуального лабораторного стенда и методических указаний по его использованию оказывается относительно невысокой.

В настоящей статье описан виртуальный лабораторный стенд для исследования автономного параллельного инвертора тока, выполненный с использованием пакета программ *Matlab/Simulink/Power System BlockSet*.

### СИЛОВАЯ СХЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ИНВЕРТОРА ТОКА

Целью работы, выполняемой на виртуальном лабораторном стенде, является закрепление теоретических знаний студентов, путем детального изучения электромагнитных процессов в параллельном автономном инверторе тока (ПИТ) в установившемся и переходных режимах, а также получение навыков моделирования в среде *MatLab*.

Виртуальный лабораторный стенд позволяет изменять в широких пределах параметры схемы и режимы ее работы.

Силовая схема однофазного параллельного инвертора тока представлена на рис. 1.

Инвертор питается от источника постоянного напряжения  $U_d$  через сглаживающий реактор  $L_d$ . Вентильная часть инвертора выполнена на однооперационных тиристорах  $V1-V4$ , работающих попарно: в течение половины периода повторяемости кривой тока на выходе инвертора,  $i_2$ , включены и проводят ток тиристоры  $V1, V2$ , а в течение другой половины периода повторяемости включены и проводят ток тиристоры  $V3, V4$ . Нагрузка инвертора активно-индуктивная (рис.1), параллельно нагрузке включен конденсатор  $C$ . Под действием напряжения на конденсаторе,  $u_2$ , происходит коммутация тока в тиристорах.

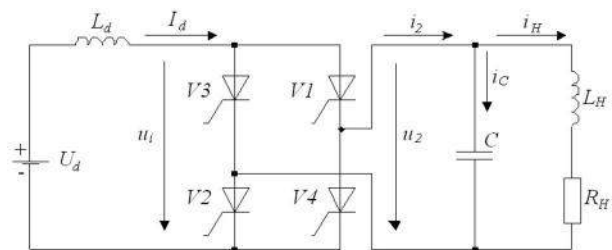


Рис. 1. Силовая схема однофазного параллельного инвертора тока

Соотношение между емкостью конденсатора  $C$  и индуктивностью нагрузки  $L$  должно быть таким, чтобы основная гармоника тока на выходе инвертора  $i_2$ , показанная на рис. 2 пунктиром, опережала по фазе напряжение  $u_2$ .

Это условие, – опережающий ток, – является условием успешной коммутации тиристоров. Угол сдвига между основной гармоникой тока и напряжением на выходе инвертора обозначен на рис. 2 через  $\beta$ . Положительное значение угла  $\beta$  имеет место, если

частота на выходе инвертора,  $f_2$ , больше частоты резонансного контура, образуемого конденсатором  $C$  и реактором  $L_H$ : то есть, если основная гармоника тока  $i_{21}$  опережает напряжение  $u_2$ .

$$f_2 > \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_H C}}. \quad (1)$$

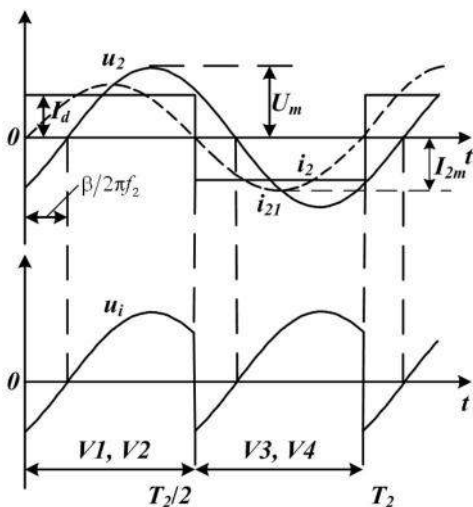


Рис. 2. Кривые тока и напряжения параллельного инвертора тока

Мгновенное напряжение на входе тиристорных мостов обозначены на рис. 1  $u_i$ , а соответствующие средние значения напряжений определяются из соотношения

$$U_i = \frac{1}{T_2} \int_t^{t+T_2} u_i dt = K_U U_m \cos \beta, \quad (2)$$

где

$$K_U = \begin{cases} \frac{2}{\pi} & \text{— для однофазной схемы,} \\ \frac{3\sqrt{3}}{\pi} & \text{— для трехфазной схемы,} \end{cases} \quad (3)$$

$U_m$  – амплитуда фазного синусоидального напряжения на выходе инвертора.

В установившемся режиме работы при пренебрежении падением напряжения на активном сопротивлении реактора  $L_d$  справедливо равенство:

$$U_i = U_d. \quad (4)$$

Допущение синусоидальности напряжения на нагрузке обуславливает соотношение:

$$U_m = z_H I_m, \quad (5)$$

где

$$I_m = K_I I_d, \quad (6)$$

- амплитуда основной гармоники тока нагрузки,

$$K_I = \begin{cases} \frac{4}{\pi} & \text{— для однофазной схемы,} \\ \frac{2\sqrt{3}}{\pi} & \text{— для трехфазной схемы,} \end{cases} \quad (7)$$

$z_H$  – модуль фазного сопротивления нагрузки.

Из (2), (3), (5) и (6) получаем:

$$U_i = K_U K_I z_H I_d \cos \beta. \quad (8)$$

Обозначив

$$K_U K_I z_H \cos \beta = R_E, \quad (9)$$

из (8), (9) получим:

$$U_i = R_E I_d. \quad (10)$$

В установившемся режиме работы инвертора угол  $\beta$  (рис. 2) не зависит от величины тока  $I_d$ . Если ток  $I_d$  изменяется медленно по сравнению с изменением амплитуды напряжения на нагрузке, то переходный процесс в звене постоянного тока инвертора описывается дифференциальным уравнением

$$U_d - U_i = L_d \frac{dI_d}{dt}. \quad (11)$$

Отметим, что в переходном режиме величины  $U_d$  и  $U_i$  являются медленно изменяющимися функциями времени и равенство (4) не соблюдается.

Из (9) и (11):

$$L_d \frac{dI_d}{dt} + R_E I_d = U_d, \quad (12)$$

где

$$R_E = \begin{cases} \frac{8}{\pi^2} z_H \cos \beta, \\ \frac{18}{\pi^2} z_H \cos \beta. \end{cases} \quad (13)$$

Решение дифференциального уравнения (12) при  $U_d = \text{const}$ :

$$I_d = \frac{U_d}{R_E} \left( 1 - e^{-\frac{t}{L_d/R_E}} \right) + I_{d0} e^{-\frac{t}{L_d/R_E}}, \quad (14)$$

где  $I_{d0}$  – начальное значение тока,

$$L_d/R_E = \tau_d, \quad (15)$$

- постоянная времени звена постоянного тока.

Уравнение (14) позволяет исследовать различные переходные процессы в схеме инвертора.

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ИНВЕРТОРА ТОКА

Структурная схема системы управления однофазного параллельного инвертора тока представлена на рис. 3.

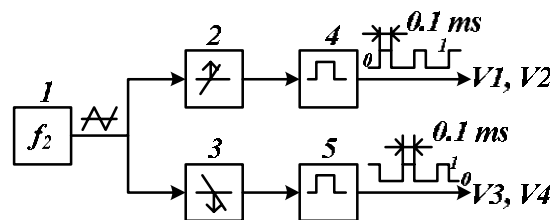


Рис. 3. Структурная схема системы управления параллельного инвертора тока

В блоке 1 системы управления формируется пилообразное напряжение с частотой, равной частоте напряжения на нагрузке  $f_2$ . В блоках 2, 3 формируются короткие импульсы в моменты прохождения пилообразного напряжения через нуль. В блоках 4, 5 формируются две пары управляющих импульсов, подаваемых на входы пар тиристоров  $V1, V2$  и  $V3, V4$ . Начальный запуск схемы инвертора осуществляется за счет начального напряжения на конденсаторе  $C$  отрицательной полярности при первом включении пары тиристоров  $V1, V2$ . В реальном инверторе для пуска необходима специальная система управления, контролирующая угол  $\beta$ .

## СИНТЕЗ МАТЛАВ-МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ИНВЕРТОРА ТОКА

С использованием библиотеки пакета программ *MatLab/Simulink/SimPowerSystems* студентам предлагается синтезировать *MatLab*-модель, соответствующую силовой схеме по рис. 1, системе управления по рис. 3 и заданному варианту исходных данных. Приведено два типа исходных данных, которым соответствуют две отличные друг от друга методики расчета параметров схемы параллельного инвертора тока.

Первая методика расчета  $R_H$ ,  $L_H$ ,  $C$ ,  $z_H$ ,  $L_d$  предназначена для случая, когда угол  $\beta = \pi/6$ , а коэффициент сдвига  $\cos\varphi = \sqrt{3}/2$  ( $\varphi = \pi/6$ ). Для указанных выше значений углов  $\beta$  и  $\varphi$  справедлива векторная диаграмма, представленная на рис. 4.

В соответствии с рис. 4:

$$I_{2m} = I_{nm} = I_{cm} = I_m = I_d \frac{4}{\pi}, \quad (16)$$

где  $I_{2m}$  – амплитуда основной гармоники тока на выходе инвертора;  $I_{nm}$  – амплитуда основной гармоники тока нагрузки;  $I_{cm}$  – амплитуда основной гармоники тока через конденсатор  $C$ .

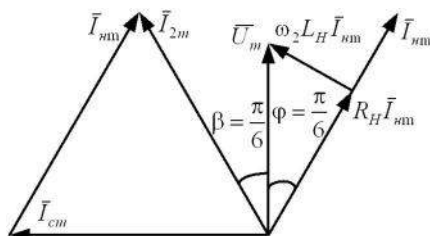


Рис. 4. Векторная диаграмма токов и напряжений параллельного инвертора тока при  $\beta = \pi/6$  и  $\varphi = \pi/6$

Напряжение  $U_m$  на векторной диаграмме – это амплитуда основной гармоники напряжения на выходе инвертора.

Отметим, что равенство (16) имеет место при принятых на рис. 4 углах  $\beta$  и  $\varphi$ , при других значениях углов равенство нарушается.

Амплитуда тока на выходе инвертора может быть определена через сопротивление нагрузки с параллельно включенным конденсатором  $z_H$ . В соответствии с рис. 4:

$$R_H I_m = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m, \quad (17)$$

$$\omega_2 L_H I_m = \frac{1}{2} U_m, \quad (18)$$

$$\frac{I_m}{\omega_2 C} = U_m, \quad (19)$$

где

$$\omega_2 = 2\pi f_2, \quad (20)$$

- угловая частота напряжения на выходе инвертора.

Из (17) – (19) получаем:

$$\omega_2 L_H = \frac{1}{\sqrt{3}} R_H, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\omega_2 C} = \frac{2}{\sqrt{3}} R_H. \quad (22)$$

Комплексное сопротивление нагрузки с параллельно включенным конденсатором определим, учитывая соотношения (21), (22):

$$\dot{Z} = \frac{-j \frac{2}{\sqrt{3}} R_H \left( R_H + j \frac{1}{\sqrt{3}} R_H \right)}{-j \frac{2}{\sqrt{3}} R_H + R_H + j \frac{1}{\sqrt{3}} R_H}. \quad (23)$$

После несложных преобразований (23) получим:

$$\dot{Z} = j \frac{2}{\sqrt{3}} R_H, \quad (24)$$

откуда

$$z = \frac{2}{\sqrt{3}} R_H. \quad (25)$$

Вторая методика расчета характерна, если угол опережения основной гармоники тока нагрузки относительно основной гармоники напряжения на нагрузке  $\beta = \pi/12$ , а коэффициент сдвига  $R$ - $L$  нагрузки  $\cos\varphi = 1/2$ . Для указанных выше значений углов  $\beta$  и  $\varphi$  справедлива векторная диаграмма, представленная на рис. 5.

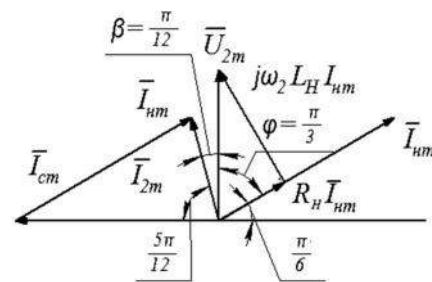


Рис. 5. Векторная диаграмма токов и напряжений параллельного инвертора тока при  $\beta = \pi/12$  и  $\varphi = \pi/3$

В соответствии с рис. 5:

$$U_{2m} = U_m, \quad (26)$$

$$I_m = I_{nm} = I_{cm} = 1.932 I_{2m} = 1.932 I_d \frac{4}{\pi}, \quad (27)$$

$$I_{2m} = \frac{U_m}{z} = 0.518 I_m, \quad (28)$$

$$U_{Rm} = R_H I_m = \frac{1}{2} U_m, \quad (29)$$

$$U_{Lm} = 2\pi f_2 L_H I_m = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{2m}, \quad (30)$$

$$\frac{I_m}{2\pi f_2 C} = U_m. \quad (31)$$

Из условия равенства активных мощностей на входе и выходе ПИТ

$$U_d I_d = R_H \frac{I_m^2}{2}. \quad (32)$$

Из (27) и (32) получаем:

$$R_H = \frac{2U_d I_d}{I_m^2}. \quad (33)$$

Из (29) и (33):

$$U_m = 2R_H I_m. \quad (34)$$

Из (27), (30) и (34):

$$L_H = \frac{\sqrt{3} U_{2m}}{4\pi f_2 I_m}. \quad (35)$$

Из (27), (31) и (34):

$$C = \frac{I_m}{2\pi f_2 U_m}. \quad (36)$$

В соответствии с рис. 5:

$$R_H I_m = \frac{1}{2} U_m, \quad (37)$$

$$2\pi f_2 L_H I_m = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m, \quad (38)$$

$$\frac{I_m}{2\pi f_2 C} = U_m, \quad (39)$$

$$U_m = 0,518zI_m. \quad (40)$$

Из (37) – (40):

$$\omega_2 L_H = \sqrt{3} R_H, \quad (41)$$

$$\frac{1}{\omega_2 C} = 2R_H, \quad (42)$$

$$\dot{Z} = \frac{-j2R_H(R_H + j\sqrt{3}R_H)}{-j2R_H + R_H + j\sqrt{3}R_H} = 4R_H \frac{1-2j+\sqrt{3}j}{1+(2-\sqrt{3})^2}, \quad (43)$$

Откуда модуль  $z$  равен:

$$z = 4R_H \frac{\sqrt{1^2 + (2-\sqrt{3})^2}}{1+(2-\sqrt{3})^2}. \quad (44)$$

В результате выполнения работы студенты предоставляют рабочую *MatLab*-модель параллельного инвертора тока, приведенную на рис. 6.

На рис. 7 приведена система управления параллельным инвертором тока, реализованная согласно алгоритму представленному на рис. 3.

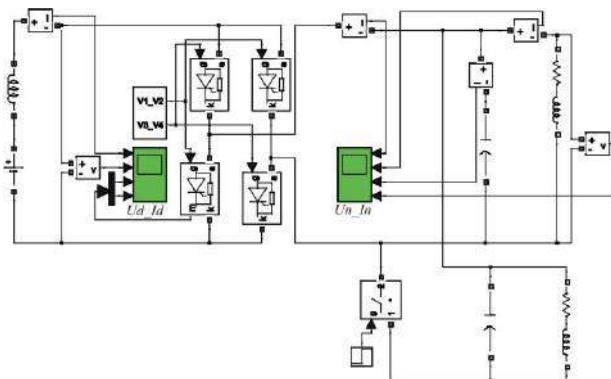


Рис. 6. *MatLab*-модель параллельного инвертора тока

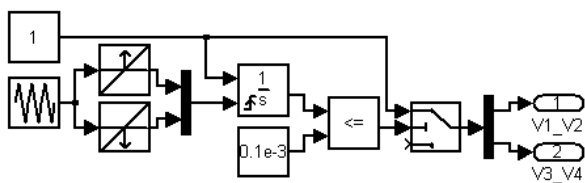


Рис. 7. *MatLab*-модель системы управления параллельным инвертором тока

После синтеза модели студент запускает ее, проверяет соответствие токов и напряжений в работающей модели заданию и предъявляет ее преподавателю. Преподаватель принимает модель и выдает задание на исследование модели из следующего списка:

- оценить влияние на работу схемы изменения индуктивности  $L_d$  в пределах  $\pm 50\%$  от расчетного значения;
- оценить влияние на работу инвертора изменения величины емкости  $C$  в пределах  $\pm 30\%$  от расчетного значения;

- исследовать переходной процесс при включении инвертора;
  - исследовать переходной процесс при наброске нагрузки при неизменных значениях углов  $\beta$  и  $\varphi$ ;
  - исследовать переходной процесс при сбросе нагрузки при неизменных значениях углов  $\beta$  и  $\varphi$ ;
  - исследовать переходной процесс при скачкообразном изменении угла  $\beta$  в пределах  $\pm 5^\circ - 10^\circ$  от расчетного значения;
  - оценить влияние параметров модели на форму напряжения на выходе инвертора.
- На рис. 8-10 приведены осциллограммы токов и напряжений параллельного инвертора тока при следующих параметрах схемы:
- входное напряжение  $U_d = 100$  В;
  - входной ток  $I_d = 10$  А;
  - мощность инвертора  $P_d = 1$  кВт;
  - индуктивность сглаживающего реактора  $L_d = 1$  Н;
  - тиристоры – идеальные;
  - омическое сопротивление нагрузки  $R_H = 12,34$  Ом;
  - индуктивность нагрузки  $L_H = 0,023$  Н;
  - емкость конденсатора  $C_f = 223 \cdot 10^{-6}$ ;
  - угол опережения  $\beta = \pi/6$ ;
  - коэффициент сдвига нагрузки  $\cos\varphi = \sqrt{3}/2$ ;
  - частота на выходе инвертора  $f_2 = 50$  Гц.

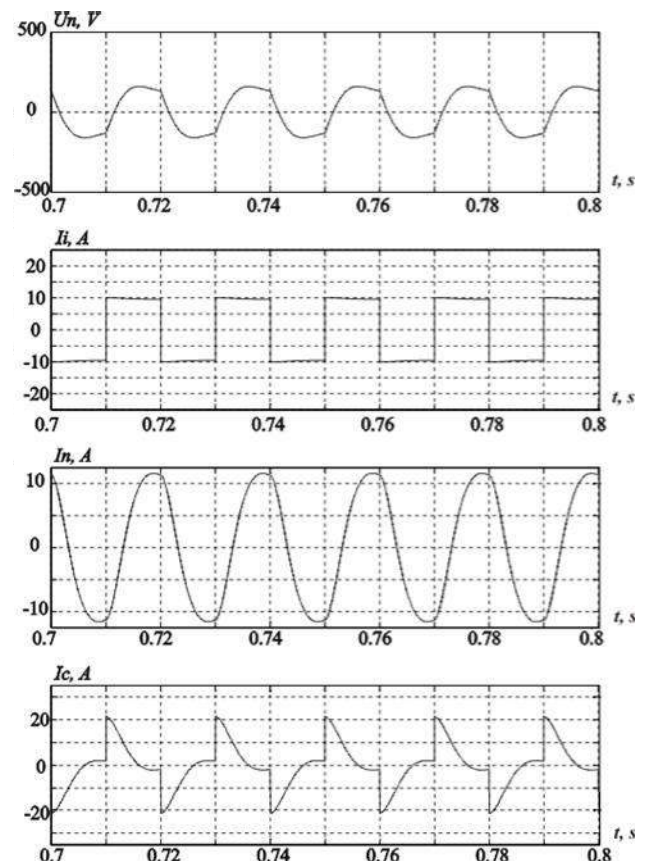


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения на нагрузке, тока конденсатора и на выходе параллельного инвертора тока

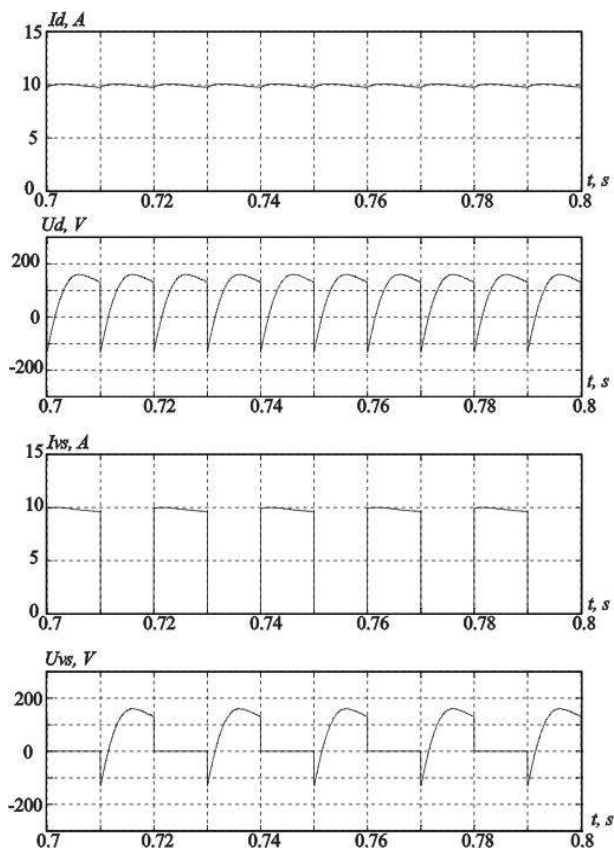


Рис. 9. Осциллограммы тока и напряжения на входе и в тиристоре параллельного инвертора тока

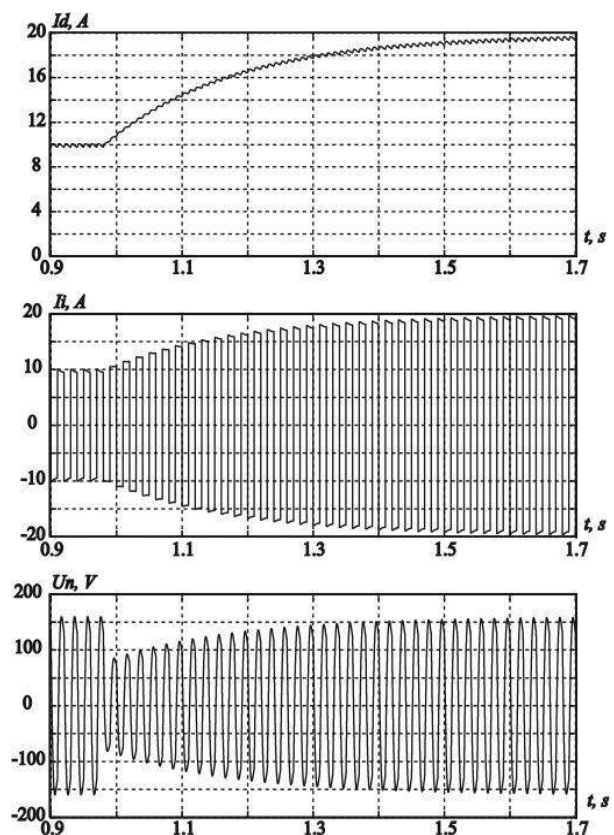


Рис. 10. Осциллограммы переходного процесса во входном и выходном токах параллельного инвертора тока и напряжение на нагрузке при набросе нагрузки

## ВЫВОДЫ

1. С использованием персональных компьютеров и пакета программ *Matlab/Simulink/Power System BlockSet* создан виртуальный лабораторный стенд для исследования электромагнитных процессов в автономных параллельных инверторах тока средней и большой мощности, который может быть использован при проведении лабораторных работ.

2. Виртуальный лабораторный стенд с высокой точностью отражает электромагнитные процессы реального образца управляемого выпрямителя, а работа на нём создаёт у студентов ощущения, близкие к таковым при работе на физической модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потемкин В.С. Система *MatLab*. Справочное пособие. М.: МИФИ, 1988.
2. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения *MatLab*. Специальный справочник.: С.-Пб., 2001.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink*. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
4. Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов. Виртуальный лабораторный стенд для обучения по дисциплине "Силовая электроника". *Технічна електродинаміка*. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 6. – 2002. – С. 71-74.
5. Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов. Виртуальный лабораторный стенд двенадцатипульсного последовательного УВ. *Технічна електродинаміка*. Тем. вип. Силова електроніка та енергоєфективність. Ч. 2. – 2005. – С. 86-89.
6. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы тока. М. Энергия, 1978. – 208 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Potemkin V.S. *Sistema MatLab*. *Spravochnoe posobie*. M.: MIFI, 1988. 2. D'yakonov V., Kruglov V. *Matematicheskie pakety rasshireniya MatLab*. *Special'nyj spravochnik*.: S.-Pb., 2001. 3. Chernyh I.V. *Modelirovanie `elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink*. - M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. - 288 s. 4. G.G. Zhemerov, D.S. Krylov. *Virtual'nyj laboratornyj stend dlya obucheniya po discipline "Silovaya `elektronika"*. *Tehnichna elektrodinamika*. Tem. vip. *Problemi suchasnoi elektrotehniki*. Ch. 6. - 2002. - S. 71-74. 5. G.G. Zhemerov, D.S. Krylov. *Virtual'nyj laboratornyj stend dvenadcatipul'nogo posledovatel'nogo UV*. *Tehnichna elektrodinamika*. Tem. vip. *Silova elektronika ta energoefektivnist'*. Ch. 2. - 2005. - S. 86-89. 6. Tolstov Yu.G. *Avtonomnye inventory toka*. M. `Energiya, 1978. - 208 s.

Поступила 05.09.2011

Жемеров Георгий Георгиевич, д.т.н., проф.,  
Ильина Наталья Александровна, д.т.н., проф.,  
Ковальчук Ольга Игоревна,  
Крылов Денис Сергеевич, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21  
тел./факс: (057) 7076312  
e-mail: zhemerov@online.kharkiv.net, Olha.kov@mail.ru

Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Kovalchuk O.I., Krylov D.S.

### A virtual laboratory bench to training in discipline "Methods of converter calculation and simulation".

A virtual laboratory bench based on PC and *Matlab/Simulink/Power System BlockSet* programs is described. The bench is intended for research on an autonomous parallel current inverter.

**Key words** – autonomous parallel current inverter, modeling, *Matlab/Simulink*, *MatLab-model*.