Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов»

СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум) для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

В 2 частях

Часть 1

Рекомендовано учебно-методическим объединением в сфере высшего образования Республики Беларусь по образованию в области автоматизации технологических процессов, производств и управления

> Минск БНТУ 2013

УДК 621.314 (076.5) ББК 32.96я7 С36

Составители: *Н. М. Улащик, Д. С. Васильев*

Рецензенты: В. П. Беляев, О. А. Головач

Силовая преобразовательная техника : лабораторные работы С36 (практикум) для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» : в 2 ч. / Н. М. Улащик, Д. С. Васильев. – Минск : БНТУ, 2013– . – Ч. 1. – 56 с.

ISBN 978-985-550-308-9 (Ч. 1).

Представлены методические материалы, необходимые для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Силовая преобразовательная техника», касающиеся изучения однофазных и трехфазных выпрямителей, одноключевых широтно-импульсных преобразователей, тиристорных и транзисторных (импульсных) регуляторов напряжения, автономных инверторов напряжения.

> УДК 621.314 (076.5) ББК 32.96я7

ISBN 978-985-550-308-9 (4. 1) ISBN 978-985-550-325-6 © Белорусский национальный технический университет, 2013

Содержание

Лабораторная работа № 1	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ	
ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО	
ВЫПРЯМИТЕЛЯ	4
Лабораторная работа № 2	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ	
ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	12
Лабораторная работа № 3	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ	
ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ	22
Лабораторная работа № 4	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ	
ИМПУЛЬСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ	
НА ТРАНЗИСТОРАХ	33
Список использованных источников	45

Лабораторная работа № 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы: приобретение навыков работы в системе MATLAB – Simulink на примере моделирования однофазного однополупериодного выпрямителя; исследование электромагнитных свойств указанного выпрямителя.

Введение

Библиотека имитационного моделирования Simulink в системе MATLAB позволяет смоделировать процессы, происходящие в различных электротехнических устройствах и полупроводниковых преобразователях электрической энергии (ППЭЭ).

На основании принципиальных схем различных ППЭЭ с использованием блоков библиотеки Simulink, и в частности ее модуля SimPowerSystem, можно составить имитационные модели необходимых преобразователей и исследовать их электромагнитные свойства.

Угол открывания полупроводниковых вентилей типа тиристоров задаётся в модели с помощью блока Pulse Generator (из библиотеки Simulink→Sources). В поле «Period» окна этого блока указывается период следования импульсов в секундах, который определяется частотой питающего напряжения (0,02 с для 50 Гц). В поле «Pulse Width» задается длительность открывающего импульса в процентах от периода (10–20 %). Угол открывания указывается в поле «Phase Delay» в виде задержки времени следования импульсов и может быть задан, например, в виде выражения

$$t_{\Pi} = \frac{\alpha}{180^{\circ}} \cdot \frac{T_{\Pi}}{2},$$

4

где *а* – угол открывания;

*T*_П – период следования импульсов.

Например, для $\alpha = 40^{\circ}$ и $T_{\Pi} = 0,02$ с в поле записывают: 40/180*0.02/2.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Составить полные принципиальные электрические схемы однофазного однополупериодного неуправляемого и управляемого выпрямителей, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки, при питании от однофазной сети переменного тока.

2. На основании принципиальных схем с использованием блоков библиотеки Simulink, в частности модуля SimPower-System, составить имитационные модели исследуемых выпрямителей. Для этого:

2.1) ввести параметры напряжения источника питания, параметры диода, сопротивления R и индуктивности L нагрузки (задаются преподавателем), параметры защитной R-C цепи; в модели управляемого выпрямителя ввести параметры управляющих импульсов ГИ (угол открывания α задается преподавателем);

2.2) выбрать метод численного решения дифференциальных уравнений, шаг и время расчета; осуществить расчет.

3. В результате расчета получить кривые тока $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, кривые напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжения на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ при активной и активно-индуктивной нагрузках.

4. По результатам расчетов:

4.1) сделать вывод о влиянии индуктивности L на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$;

4.2) аналитически рассчитать максимальное, действующее и среднее значение тока при активной нагрузке, среднее значение – при активно-индуктивной нагрузке, сравнить данные значения со значениями, полученными в результате моделирования;

4.3) проанализировать форму напряжения на диоде, указав значения напряжения на нем в открытом и закрытом состояниях.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Полные принципиальные электрические схемы однофазного однополупериодного неуправляемого и управляемого выпрямителей, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки, при питании от однофазной сети переменного тока.

3. Имитационные модели однофазного однополупериодного выпрямителя с указанием введенных параметров напряжения источника питания, диода, *R* и *L* нагрузки, параметров защитной *R*-*C* цепи и параметров управляющих импульсов ГИ.

4. Графики напряжения сети $u_1 = f(t)$, тока $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, тока $i_{\rm VD} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm VD} = f(t)$ диода при активной и активно-индуктивной нагрузках.

5. Вывод о влиянии индуктивности *L* на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$.

Исходные данные для моделирования: ~ U_1 = 220 B; $R_{\text{нагр}}$ = 44 Ом.



Рисунок 1.1 – Имитационная модель однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя

Block Pa	rameters: AC Voltage Source
AC Voltag	e Source (mask) (link)
Ideal sinu	soidal AC Voltage source.
Paramete	rs
Peak amp	olitude (V):
311	
Phase (d	eg):
0	
Frequenc	γ (Hz):
50	
Sample t	ime:
0	
Measurer	nents Voltage 🔹
	OK Cancel Help Apply

Рисунок 1.2 – Параметры настройки блока AC Voltage Source

Block Parameters: Diode
Diode (mask) (link)
Implements a diode in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the Diode model has an internal resistance (Ron) and inductance (Lon).
For most applications the internal inductance should be set to zero. The Diode impedance is infinite in off-state mode.
Parameters
Resistance Ron (Ohms) :
0.001
Inductance Lon (H) :
0
Forward voltage Vf (V) :
0.8
Initial current Ic (A) :
0
Snubber resistance Rs (Ohms) :
10000
Snubber capacitance Cs (F) :
1e-9
Show measurement port
OK Cancel Help Apply

Рисунок 1.3 – Параметры настройки блока Diode



Рисунок 1.4 – Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 1.5 – Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного неуправляемого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку



Рисунок 1.6 – Имитационная модель однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

Puise Gener	rator	
Output puls	es:	
if (t >= Pha	aseDelay) && Pulse is on	
Y(t) = Am	nplitude	
else		
Y(t)=0		
end		
Pulse type o	determines the computational technique used.	
Time-based Sample-bas a discrete p	d is recommended for use with a variable step solver, whil sed is recommended for use with a fixed step solver or wi ortion of a model using a variable step solver.	e thir
Parameters	5	
Dulco hunou	Time based	+
ruise type.	Time bused	-
Time (t):	Use simulation time	•
Time (t): [Amplitude:	Use simulation time	•
Time (t): [I Amplitude: 1	Use simulation time	•
Time (t): [I Amplitude: 1 Period (sec	Use simulation time	•
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02	S):	•
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02 Pulse Width	s):	•
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02 Pulse Width 10	s): (% of period):	•
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02 Pulse Width 10 Phase delay	s): (% of period): y (secs):	•
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02 Pulse Width 10 Phase delay (60*0.02)/	s): (% of period): y (secs): (360	*
Time (t): Amplitude: 1 Period (sec 0.02 Pulse Width 10 Phase delay (60*0.02)/ Interpre	In the object Use simulation time (% of period): (% (secs): (%) (%) (%) (%) (%) (%) (%) (%) (%) (%)	•

Рисунок 1.7 – Параметры настройки блока Pulse Generator (пример для $\alpha = 60^{\circ}$)

Block Parameters: Thyristor	×
Thyristor (mask) (link)	
Thyristor in parallel with a series RC snubber of In on-state the Thyristor model has an internal inductance (Lon). For most applications the internal inductance s In off-state the Thyristor as an infinite impedan	circuit. I resistance (Ron) and should be set to zero. nce.
Parameters	
Resistance Ron (Ohms) :	
0.001	
Inductance Lon (H) :	
0	
Forward voltage Vf (V) :	
0.8	
Initial current Ic (A) :	
0	
Snubber resistance Rs (Ohms) :	
10000	
Snubber capacitance Cs (F) :	
1e-9	
Show measurement port	
OK Cancel	Help Apply

Рисунок 1.8 – Параметры настройки блока Thyristor

Параметры настройки блока AC Voltage Source аналогичны параметрам на рис. 1.2.



Рисунок 1.9 – Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 1.10 – Временные диаграммы работы однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: приобретение навыков работы в системе MATLAB – Simulink на примере моделирования однофазных выпрямителей (однофазного мостового симметрично управляемого, несимметрично управляемого и с симистором на стороне переменного тока); исследование электромагнитных свойств указанных выпрямителей.

Введение

Библиотека имитационного моделирования Simulink позволяет в системе MATLAB смоделировать процессы, происходящие в различных схемах ППЭЭ.

На основании принципиальных электрических схем с использованием блоков библиотеки Simulink, и в частности ее модуля SimPowerSystem, можно составить имитационные модели указанных преобразователей, выполнить необходимые расчеты и исследовать их электромагнитные свойства.

Угол открывания полупроводниковых вентилей задается с помощью блока Pulse Generator (библиотека Simulink—Sources). В поле «Period» указывается период следования импульсов в секундах, который определяется частотой питающего напряжения (0,02 с для 50 Гц). В поле «Pulse Width» задается длительность открывающего импульса в процентах от периода (10–20 %). Угол открывания указывается в поле «Phase Delay» в виде задержки времени следования импульсов и может быть задан, например, в виде выражения

$$t_{\Pi} = \frac{\alpha}{180^{\circ}} \cdot \frac{T_{\Pi}}{2},$$

14

где *а* – угол открывания;

*T*_П – период следования импульсов.

Например, для $\alpha = 40^{\circ}$ и $T_{\Pi} = 0,02$ с в поле записывают: 40/180*0.02/2.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Составить полные принципиальные электрические схемы выпрямителей: однофазного мостового симметрично управляемого, несимметрично управляемого и мостового выпрямителя с симистором на стороне переменного тока при питании от однофазной сети переменного тока, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки (схемы должны содержать датчик тока нагрузки и датчики напряжения: сети, на нагрузке, на диоде и на тиристоре (в схеме с управляемыми ключами)).

2. На основании принципиальных схем составить имитационные модели выпрямителей с использованием блоков библиотеки Simulink, в частности ее модуля SimPowerSystem:

2.1) ввести параметры напряжения источника питания, параметры силовых полупроводниковых приборов, сопротивления R и индуктивности L нагрузки (задаются преподавателем), параметры защитной R-C цепи; при составлении имитационной модели управляемого выпрямителя ввести параметры управляющих импульсов ГИ (угол открывания α задается преподавателем);

2.2) выбрать метод численного решения дифференциальных уравнений, шаг и время расчета;

2.3) осуществить расчет.

3. В результате расчета получить графики зависимости тока $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, графики зависимости напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжения на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ (при управляемой схеме на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ и на тиристоре $u_{\rm VS} = f(t)$) при активной и активно-индуктивной нагрузках.

4. По результатам расчетов:

4.1) сделать вывод о влиянии индуктивности *L* и угла открывания α на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$;

4.2) аналитически рассчитать максимальное, действующее и среднее значение тока при активной нагрузке, среднее значение – при активно-индуктивной нагрузке, сравнить данные значения со значениями, полученными в результате моделирования;

4.3) проанализировать форму напряжения на диоде, указав значения напряжения на нем в открытом и закрытом состояниях.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Привести полные принципиальные электрические схемы выпрямителей при питании от однофазной сети переменного тока, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки.

3. Имитационные модели выпрямителей с указанием введенных параметров напряжения источника питания, диода, *R* и *L* нагрузки, параметров защитной *R*-*C* цепи и параметров управляющих импульсов ГИ.

4. Графики зависимости тока $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, графики зависимости напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжения на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ (при управляемой схеме на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ и на тиристоре $u_{\rm VS} = f(t)$) при активной и активноиндуктивной нагрузках.

5. Вывод о влиянии индуктивности L и угла α на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$.

Исходные данные для моделирования: $\sim U_1 = 220$ B, $R_{\text{Harp}} = 44$ Ом.





Block Parameters: VS1	🗙 Block Parameters: Diode
Thyristor in parallel with a series RC snubber circuit. In on-state the Thyristor model has an internal resistance (Ron) and inductance (Lon). For most applications the internal inductance should be set to zero. In off-state the Thyristor as an infinite impedance. Parameters	Diode (mask) (link) Implements a diode in parallel with a series RC snubber circuit. In or state the Diode model has an internel resistance (Ron) and inductance (Lon). For most applications the internal inductance should be set to zero. The Diode impedance is infinite in off-state mode. Parameters Resistance Ron (Ohms) :
Resistance Ron (Ohms) :	0.001
0.001	Inductance Lon (H) :
Inductance Lon (H) :	0
0	Forward voltage Vf (V) :
Forward voltage Vf (V) :	0.8
0.8	Initial current Ic (A) :
	0
Initial current Ic (A) :	Snubber resistance Rs (Ohms) :
0	10000
Snubber resistance Rs (Ohms) :	Snubber capacitance Cs (F) :
500	1e-9
Snubber capacitance Cs (F) : 250e-9	Show measurement port
Show measurement port OK Cancel Help Apph	Cancel Help Apply

Рисунок 2.2 – Параметры настройки блоков тиристора VS1 и диода VD1

Source Block Parameters: Pulse Generator	×	Source Block Parameters: Pulse Generator1	
Pulse Generator		Pulse Generator	
Output pulses:		Output pulses:	
if (t >= PhaseDelay) 8.8. Pulse is on $Y(t) = Amplitude \\ else \\ Y(t) = 0 \\ end$		if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on $\gamma(t) = \mbox{Amplitude}$ else $\gamma(t) = 0$ end	
Pulse type determines the computational technique used.		Pulse type determines the computational technique use	d.
Time-based is recommended for use with a variable step Sample-based is recommended for use with a fixed step a discrete portion of a model using a variable step solver Parameters	p solver, while solver or within r.	Time-based is recommended for use with a variable st Sample-based is recommended for use with a fixed st a discrete portion of a model using a variable step solv Parameters	ep solver, while p solver or within er.
Pulse type: Time based	-	Pulse type: Time based	•
Time (t): Use simulation time		Time (t): Use simulation time	*
Amplitude:		Amplitude:	
1		1	
Period (secs):		Period (secs):	
0.02		0.02	
Pulse Width (% of period):		Pulse Width (% of period):	
10		20	
Phase delay (secs):		Phase delay (secs):	
		(60*0.02)/360+0.01	
(60*0.02)/360		ALL TRANSFER THE	

Рисунок 2.3 – Параметры настройки блоков Pulse Generator и Pulse Generator1 (пример для $\alpha = 60^{\circ}$)



Рисунок 2.4 – Временные диаграммы работы однофазного мостового симметрично управляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 2.5 – Временные диаграммы работы однофазного мостового симметрично управляемого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку



Рисунок 2.6 – Имитационная модель однофазного мостового несимметрично управляемого выпрямителя



Рисунок 2.7 – Имитационная модель однофазного мостового выпрямителя с регулированием напряжения на стороне переменного тока

Параметры настройки блоков Diode1...Diode4 и тиристоров VS1, VS2 аналогичны приведенным на рис. 2.2. Параметры настройки блоков Pulse Generator и Pulse Generator 1 также аналогичны показанным на рис. 2.3 (для $\alpha = 60^{\circ}$).



Рисунок 2.8 – Временные диаграммы работы однофазного мостового несимметрично управляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 2.9 – Временные диаграммы работы однофазного мостового несимметрично управляемого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку



Рисунок 2.10 – Временные диаграммы работы однофазного мостового выпрямителя с регулированием напряжения на стороне переменного тока при работе на *R* нагрузку



Рисунок 2.11 – Временные диаграммы работы однофазного мостового выпрямителя с регулированием напряжения на стороне переменного тока при работе на *R-L* нагрузку

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: приобретение навыков работы в системе MATLAB – Simulink на примере моделирования трехфазных выпрямителей: трехфазного мостового симметрично управляемого, несимметрично управляемого и трехфазного нулевого; исследование электромагнитных свойств указанных выпрямителей.

Введение

На основании принципиальных схем различных ППЭЭ с использованием блоков библиотеки Simulink, и в частности ее модуля SimPowerSystem, можно составить имитационные модели необходимых преобразователей и исследовать их электромагнитные свойства.

Угол открывания полупроводниковых вентилей задается с помощью блока Pulse Generator (библиотека Simulink—Sources). В поле «Period» указывается период следования импульсов в секундах, который определяется частотой питающего напряжения (0,02 с для 50 Гц). В поле «Pulse Width» задается длительность открывающего импульса в процентах от периода (10–20 %). Угол открывания указывается в поле «Phase Delay» в виде задержки времени следования импульсов и может быть задан, например, в виде выражения

$$t_{\Pi} = \frac{\alpha}{180^{\circ}} \cdot \frac{T_{\Pi}}{2},$$

где *а* – угол открывания;

 T_{Π} – период следования импульсов.

Например, для $\alpha = 40^{\circ}$ и $T_{\Pi} = 0,02$ с в поле записывают: 40/180*0.02/2.

Порядок выполнения работы

1. Составить полные принципиальные электрические схемы трехфазных выпрямителей при питании от трехфазной сети переменного тока, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки (схемы должны содержать датчик тока нагрузки и датчики напряжения сети на одном из диодов и на нагрузке). На основании принципиальных схем с использованием блоков библиотеки Simulink составить имитационные модели выпрямителей.

2. На основании принципиальных схем с использованием блоков библиотеки Simulink, в частности модуля SimPower-System, составить имитационные модели выпрямителей:

2.1) ввести параметры напряжения источника питания, параметры силовых полупроводниковых приборов, сопротивления R и индуктивности L нагрузки (задаются преподавателем), параметры защитной R-C цепи; при составлении имитационной модели управляемого выпрямителя ввести ещё и параметры управляющих импульсов ГИ (угол открывания α задается преподавателем);

2.2) выбрать метод численного решения дифференциальных уравнений, шаг и время расчета;

2.3) осуществить расчет.

3. В результате расчета получить графики зависимости тока $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжения $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, графики зависимости напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжения на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ и на тиристоре $u_{\rm VS} = f(t)$ при активной и активно-индуктивной нагрузках.

4. По результатам расчетов:

4.1) сделать вывод о влиянии индуктивности L на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$;

4.2) аналитически рассчитать максимальное, действующее и среднее значение тока при активной нагрузке, среднее значение – при активно-индуктивной нагрузке, сравнить данные значения со значениями, полученными в результате моделирования;

4.3) выполнить анализ формы напряжения на диоде, указав значения напряжения на нем в открытом и закрытом состояниях.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Привести полные принципиальные электрические схемы трехфазного мостового симметрично управляемого, несимметрично управляемого и трехфазного нулевого при питании от трехфазной цепи переменного тока, работающих на активную и активно-индуктивную нагрузки.

3. Имитационные модели выпрямителя с указанием введенных параметров диода, *R* и *L* нагрузки.

4. Графики зависимости токов $i_{\rm H} = f(t)$ и напряжений $u_{\rm H} = f(t)$ нагрузки, графики зависимости напряжения сети $u_1 = f(t)$, напряжений на диоде $u_{\rm VD} = f(t)$ и на тиристоре $u_{\rm VS} = f(t)$ при активной и активно-индуктивной нагрузках, графики зависимости тока тиристора $i_{\rm VS} = f(t)$.

5. Вывод о влиянии индуктивности *L* и угла α на форму кривой тока нагрузки $i_{\rm H} = f(t)$.



Рисунок 3.1 – Имитационная модель трехфазного мостового симметрично управляемого выпрямителя

Исходные данные для моделирования: $U_{\phi} = 220$ B; $U_{\pi} = 380$ B; $R_{\text{harp}} = 90$ Ом.



Рисунок 3.2 – Имитационная модель трехфазного мостового несимметрично управляемого выпрямителя

Block Parameters: Three-Phase Source
Three-Phase Source (mask) (link)
Three-phase voltage source in series with RL branch.
Parameters
Phase-to-phase rms voltage (V):
380
Phase angle of phase A (degrees):
0
Frequency (Hz):
50
Internal connection: Yn 🔹
Specify impedance using short-circuit level
Source resistance (Ohms):
0.8
Source inductance (H):
0
OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.3 – Параметры настройки блока Three-Phase Source

Pulse Generator		Source Block Parameters: Pulse Generator3	×
		Pulse Generator	
Output pulses:		Output pulses:	
if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on	n	files - the employee many takes to be	
Y(t) = Amplitude else		Y(t) = Amplitude	
Y(t) = 0		else $y(t) = 0$	
end		end	
Pulse type determines the computat	tional technique used.	Pulse type determines the computational techniqu	e used.
Time-based is recommended for us Sample-based is recommended for	we with a variable step solver, while use with a fixed step solver or within	Time-based is recommended for use with a varial Sample-based is recommended for use with a fixe	ole step solver, while
a discrete portion of a model using a	a variable step solver.	a discrete portion of a model using a variable step	solver.
Parameters		Parameters	
Pulse type: Time based	•]	Pulse type: Time based	
Time (t): Use simulation time	•	Time (1): Use simulation time	
Amplitude:		Amplitude:	
1		1	
Period (secs):		Period (secs):	
0.02		0.02	
Pulse Width (% of period):		Dules Width /O' of second's	
70		ruise width (56 or period): 70	
Phase delay (secs):		Change distant (decast).	
0.01/6		Phase delay (secs):	
7 Interpret vector parameters as 1	1.0	(0:01/0)-2	
	Source Block Parameters: Pulse Gener	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses:	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on		Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0	stor5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatit	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatit Time-based is recommended for us Sample-based is recommended for us a discrete portion of a model using a	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatin Time-based is recommended for us Sample-based is recommended i	atorS Example 1 and a second s	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatin Time-based is recommended for us Sample-based is recommended for us	atorS Example a set of the set of	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatin Time-based is recommended for us Sample-based is r	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computatin Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on v(t) = Amplitude else v(t) = 0 end Pulse type determines the computati Time-based is recommended for us Sample-based is recommended for us discrete portion of a model using a Parameters Pulse type: Time based Time (t): Use simulation time Amplitude: 1	ator5	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computation Time-based is recommended for us Sample-based is recommended for us a discrete portion of a model using a Parameters Pulse type: Time based Time (t): Use simulation time Amplitude: 1 Period (secs): •	ator3	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computation Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Pulse type: Time based Time (1): Use simulation time Amplitude: I Period (secs): 0.02	ator3	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: If (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else. Y(t) = 0 end Pulse type determines the computation Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Time based. Pulse type: Time based Time (): Use simulation time Amplitude: 1 Period (secs): 0.02 Pulse Width (% of name(*)): Use heartor(*):	ator3	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computativ Time-based is recommended for us Sample-based is r	atorS	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Gener Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on Y(t) = Amplitude else Y(t) = 0 end Pulse type determines the computativ Time-based is recommended for us Sample-based is recommended is recomm	ator3	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on v(t) = Amplitude else v(t) = Amplitude else v(t) = a end Pulse type determines the computati Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Sample-based is recommended for use Pulse type: Time-based Pulse type: Time based Time (t): Use simulation time Amplitude: 1 Period (secs): 0.02 Pulse Width (% of period): 70 Phase delay (secs):	atorS	Cancel Help
	Source Block Parameters: Pulse Generator Pulse Generator Output pulses: if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on 'Y(t) = - amplitude else end Pulse type determines the computativ Time-based is recommended for use Sample-based is recommended for use a discrete portion of a model using a Parameters Pulse type: Time (t): Use simulation time Amplitude: 1 Period (secs): 0.02 Pulse Width (% of period): 70 Phase delay (secs): (0.01/6)*9	ator3	Cancel Help

ок Салсе нер Рисунок 3.4 – Параметры настройки блоков Pulse Generator 1, 3 и 5

Block Parameters: e1	Block Parameters: e2
AC Voltage Source (mask) (link)	AC Voltage Source (mask) (link)
Ideal sinusoidal AC Voltage source.	Ideal sinusoidal AC Voltage source.
Parameters	Parameters
Peak amplitude (V):	Peak amplitude (V):
311	311
Phase (deg):	Phase (deg):
0	120
Frequency (Hz):	Frequency (Hz):
50	50
Sample time:	Sample time:
0	0
Measurements None 👻	Measurements None 👻
OK Cancel Help Apply	OK Cancel Help Apply

Block Paramete	ers: e3			×
AC Voltage Sou	rce (mask) (link)		
Ideal sinusoidal	AC Voltage	source,		
Parameters				
Peak amplitude	(V):			
311				
Phase (deg):				
240				
Frequency (Hz)	:			
50				
Sample time:				
0				
Measurements	None			•
	ОК	Cancel	Help	Apply

Рисунок 3.5 – Параметры настройки блоков ЭДС источников е1, е2 и е3



Рисунок 3.6 – Временные диаграммы работы трехфазного мостового симметрично управляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 3.7 – Временные диаграммы работы трёхфазного мостового симметрично управляемого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку



Рисунок 3.8 – Временные диаграммы работы трехфазного мостового несимметрично управляемого выпрямителя при работе на *R* нагрузку









Исходные данные для моделирования: $U_{\phi} = 220$ B; $U_{\pi} = 380$ B; $R_{\text{harp}} = 108$ Ом.

Source Block Parameters: Pulse Generator1		The second se	
Pulse Generator		Source Block Parameters: Pulse Gen	erator3
Output pulses:		Pulse Generator	
if (t >= PhaseDelay) && Pulse is on		Output puises:	
Y(t) = Amplitude		if (t >= PhaseDelay) && Pulse is a	n
else v(t) = 0		else	
end		Y(t) = 0	
Pulse type determines the computational tech	nnique used.	enu	
and the action of the temperature to	and a resolution	Pulse type determines the computa-	tional technique used.
Time-based is recommended for use with a Sample-based is recommended for use with	a fixed step solver, while	Time-based is recommended for us	se with a variable step solver, while
a discrete portion of a model using a variable	step solver.	Sample-based is recommended for a discrete portion of a model using	use with a fixed step solver or with a variable step solver
Parameters		a close cite portion of a model coming	a formore step softer.
Pulse type: Time based		Parameters	
Time (f): I lice simulation time		Pulse type: Time based	
Amplitude:		Time (t): Use simulation time	
Authingues		Amplitude:	
		1	
Period (secs):		Period (secs):	
0.02		0.02	
Pulse Width (% of period):		Pulse Width (% of period):	
70		70	
Phase delay (seco):			
riose delay (secs).		Phase delay (secs):	
0.01/6		Phase delay (secs): (0.01/6)"5	
0.01/6		Phase delay (secs): (0.01/6)=5	1-0
O.01/6 Interpret vector parameters as 1-0 OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 (V) Interpret vector parameters as	1-0
0.01/6 Interpret vector parameters as 1-0 OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.0./6)*5 (2) Interpret vector parameters as	0K Cancel Help
0.01/6 V Interpret vector parameters as 1-D OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.0./6)*5 (2) Interpret vector parameters as	I-D OK Cancol Help
(v) Interpret vector parameters as 1-0	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as	OK Cancel Help
o.01/6 (⊘) Interpret vector parameters as 1-D OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.01/6)*5 Interpret vector parameters as	I-D OK Cancol Help
0.01/6 (2) Interpret vector parameters as 1-D OK OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 (2) Interpret vector parameters as	I-D OK Cancel Help
nose oren (cecs). 0.01/6 ② Interpret vector parameters as 1-0 OK →Pu Out	Cancol Help ource Bock Parameters: Pulse Gener so: Generator tput pulses:	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 (2) Interpret vector parameters as	I-D OK Concel Help
O.01/6 0.01/6 Interpret vector parameters as 1-D OK OK	Cancol Help ource Block Parameters: Pulse Gener See Generator Iput pulses: (1 = Phisopology) 8,85 Pulse is on (1) = Anoibude	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 (2) Interpret vector parameters as	I-D OK Cancel Help
o.01/6 (⊘) Interpret vector parameters as 1-0 (0K) OK 0K	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Gener so Generator tput pulses: (1 >= PhaseDelay) && Pulse is on (1) = ~ Nightude se	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as atoris	I-D OK Cancel Help
O.01/6 (v) Interpret vector parameters as 1-D OK OK V V V V V V V V V V V V	Cancel Help Cancel Help aurce Block Parameters: Pulse Gener tes Generator put pulses: (1) = PhaseDelay) && Pulse es on (5) = Anplitude se	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as	I-D OK Concol Help
O.01/6 (vi) (interpret vector parameters as i-D (ok (vi) (v	Cancil Help Cancil Help ba Generator put publics: (1 >= PhaseDelay) && Pulse is on (2) = Anplitude (3) (4) (5) = 0 d a ba ba determines the conversion	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator's	I-D OK Cancol Help
0.01/6 (v) Interpret vector parameters as i-D OK V v en Pul Pul	Cancel Help Cancel Help Cancel Block Parameters: Pulse Gener tos Generator typu pulses: (1) = PhaseDelay) && Pulse is on (2) = Anplitude (3) (4) = 0 d se type determines the computation	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator's	I-D OK Cancel Help
нове окау (243). 0.01/6 (?) Interpret vector parameters as 1-0 ОК ОК ОК ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС ОС	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Generator top Centerator top Applicate (t) = PhaseDelay) && Pulse is on (t) = PhaseDelay) && Pulse is on (t) = 0 d se type determines the computation ne-based is recommended for use mple-based is recommended for use	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ators	OK Cancel Help
Interpret vector parameters as 1-0 (i) Interpret vector parameters as 1-0 OK OK OK IIII OK IIIII OK IIIIII OK IIIIII OK IIIIII OK IIIIIIIIII	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Generator top Centerator tput pulses: (1) = Phasebelay) && Pulse is on (2) = Phasebelay) && Pulse is on (3) = A pulpitude as be type determines the computation ne-based is recommended for use mple-based is recommended for use randers	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator5	DK Concel Help
Interpret vector parameters as 1-0 (i) Interpret vector parameters as 1-0 (ok 0k 0k 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Cancel Help Cancel Help Cancel Help Cancel Reserver to Concrator tput pulses: (1 >= PhaseDelay) && Pulse or on (2) = Amplitude cancel and the second second (2) = 0 d d d e type determines the computation ne-based is recommended for use mple-based is recommended for userver iscrete particular of a model using a rameters lare type: Time based	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator5	I-D OK Concel Help
Interpret vector parameters as 1-D OK V V OK V V V V V V V V V V V V V	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Generator put pulses: (t >= Phasobelay) & & Pulse or on (t) == Phasobelay) & & Pulse or on (t) = O (t) = O (t) = Phasobelay & & Pulse or on (t) = O (t) = Phasobelay & & Pulse or on (t) = Phasobelay & & Pulse or (t) = Phasobelay & & Pulse or	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ators	OK Cancel Help
Index only (ceta). 0.01/6 (i) Interpret vector parameters as 1-0 OK V V ele V	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Generator put pulses: (t>= Phasebelay) && Pulse is on (t) = Phasebelay) && Pulse is on (t) = 0 d expedetermines the computation n=based is recommended for us iscrete portion of a model using a ramaters' ise type: Time based (t): Us simulation time piltude:	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator5	OK Cancel Help
Index only (ceta). 0.01/6 (i) Interpret vector parameters as 1-0 OK V V elit V elit Pul Sau a d Pal Ful Tir An 1 1	Cancel Help ource Block Parameters: Pulse Generator typu pulses: (t) = PhaseDelay) && Pulse es on (t) = Anplitude se (t) = based is recommended for use her based is recommended for use iscrete portion of a model using a rameters lise type: Time based in: (t): Use simulation time pitude:	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ator's with a variable step solver, while with a variable step solver, while with a variable step solver, or within variable step solver.	I-D OK Concol Help
Index (pec): 0.01/6 Interpret vector parameters as 1-D OK	Cancel Help	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Therpret vector parameters as ator's ator's with a variable step solver, while exit a variable step solver, while exit a variable step solver, or within variable step solver.	OK Cancel Help
Index only (ceta). Othe (?) Interpret vector parameters as 1-0 OK OK OK OK OK The Sam Pul OK The Sam Pul The Sam Pul The Sam Pul The Sam Pul OK OK OK OK OK OK OK OK OK OK	Cancel Help cource Block Parameters: Pulse Generator bput pulses: (t) = PhaseDelay) && Pulse is on (t) = PhaseDelay) && Pulse is on (t) = Applitude se type determines the computation ne-based is recommended for user mile based is recommended for user model using a rameters status me (t): Use simulation time mplitude: mid (secs): 02	Phase delay (secs): (0.01/6)"5 Interpret vector parameters as ators with a variable step solver, while se with a variable step solver or within variable step solver or within • • • •	OK Cancel Help

70 Phase delay (secs): (0.01/6)*9

Therpret vector parameters as 1-D

Cancel Help

OK Рисунок 3.11 – Параметры настройки блоков Pulse Generator 1, 2 и 3



Рисунок 3.12 – Временные диаграммы работы трехфазного нулевого выпрямителя при работе на *R* нагрузку



Рисунок 3.13 – Временные диаграммы работы трехфазного нулевого выпрямителя при работе на *R-L* нагрузку

Лабораторная работа № 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: изучить принцип работы импульсных регуляторов напряжения (ИРН) на примере однофазного ИРН; на основе принципиальной электрической схемы и принципа работы однофазного ИРН составить его имитационную модель в среде MatLab (с помощью блоков из библиотек разделов Simulink и SimPowerSystems); провести анализ графиков работы однофазного ИРН при изменении параметров *R-L* нагрузки, скважности γ (напряжения управления U_y) и частоты коммутации f_{κ} .

Введение

С целью устранения основных недостатков тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением (наличие дополнительного угла сдвига первой гармоники тока по отношению к напряжению сети, зависящего от угла открытия тиристоров α ; искажение синусоидальной формы кривой питающего напряжения и, как следствие, появление высших гармоник, а также уменьшение коэффициента мощности входной цепи устройства) можно использовать ИРН на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, например IGBT-транзисторах, где регулирование величины неизменного по частоте питающего АД напряжения осуществляется изменением ширины управляющих импульсов по определенному закону при некоторой заданной частоте коммутации $f_{\rm k}$ ключей силовой схемы такого устройства плавного пуска.

Важно отметить следующую особенность работы ИРН на двигательную нагрузку. В регуляторах переменного напряже-

ния на базе силовых транзисторных ключей с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией на интервалах переключения на его силовых элементах и нагрузке возможно возникновение значительных перенапряжений, если не принимать специальные меры по замыканию реактивного тока нагрузки. Поэтому при работе ИРН на двигательную или *R-L* нагрузку нужно шунтировать фазы во время отключения основных силовых ключей специальными шунтирующими устройствами (ключами, конденсаторами, диодными мостами и т. д.). Именно для этой цели в схеме однофазного ИРН на рис. 4.1, *а* используется ключ S_2 . Там же приведены кривые выходного напряжения и тока такого регулятора, а также алгоритм работы транзисторов его силовой схемы.



Рисунок 4.1 – Схема однофазного ИРН и кривые выходного напряжения и тока фазы А при активно-индуктивной нагрузке (*a*), алгоритм работы транзисторов силовых ключей однофазного ИРН (б)

Согласно схеме (рис. 4.1, *a*) транзисторы VT1 и VT2 ключа S_1 , работая с определенной частотой коммутации f_{κ} , являются основными, т. е. они участвуют в формировании соответственно положительной и отрицательной полуволны выходного напряжения ИРН из импульсов напряжения, количество которых зависит от величины f_{κ} , а транзисторы VT3 и VT4 ключа S_2 – шунтирующими нагрузку соответственно при выключенных транзисторах VT2 и VT1 основного ключа S_1 , т. е. на интервалах пауз в работе этих транзисторов (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Состояние транзисторов основного S₁ (*a*) и шунтирующего S₂ (*б*) ключа однофазного ИРН, выполненного по схеме рис. 4.1, *a*

Как видно из рис. 4.2, транзисторы такого ИРН на каждом интервале Т_i работают в паре (один основной и один шунтирующий транзистор). Последовательность работы пар транзисторов силовой схемы этого ИРН показана на рис. 4.1, б и, как следует из этого рисунка, зависит от знака входного напряжения и тока нагрузки. Согласно рис. 4.1, б, когда полуволна входного переменного напряжения положительная, а полуволна тока нагрузки отрицательная, работает транзистор VT2 основного ключа S₁. При этом шунтирующий транзистор VT3 ключа S_2 работает на интервалах пауз (в противофазе) в работе VT2 (см. рис. 4.1, б) и осуществляет закорачивание (шунтирование) нагрузки, а транзисторы VT1 и VT4 все время находятся в выключенном состоянии. Когда входное напряжение и ток нагрузки положительные, включается транзистор VT1 ключа S₁, а в моменты пауз в его работе – транзистор VT4 ключа S₂ для шунтирования нагрузки, при этом транзисторы VT2 и VT3 все время выключены. После изменения знака входного напряжения с положительного на отрицательный снова работает транзистор VT1 ключа S_1 , а на интервалах его пауз для закорачивания нагрузки используется транзистор VT4 ключа S_2 . При этом транзисторы VT2 и VT3 все время выключены. И наконец, когда входное напряжение и ток нагрузки имеют одинаковый знак, отрицательный, включается транзистор VT2 ключа S_1 , при этом транзисторы VT1 и VT4 все время выключены, а транзистор VT3 ключа S_2 шунтирует нагрузку на интервалах пауз в работе VT2. Благодаря такому алгоритму работы транзисторов основного и шунтирующего ключа обеспечивается непрерывное протекание тока по силовой цепи ИРН и отсутствуют перенапряжения на его силовых элементах и в нагрузке.

Порядок выполнения работы

1. Составить полную принципиальную электрическую схему однофазного ИРН, работающего на *R-L* нагрузку.

2. На основании принципиальной электрической схемы составить имитационную модель однофазного ИРН с использованием блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems.

3. Ввести параметры напряжения источника питания, силовых ключей, *R-L* нагрузки (задаются преподавателем), параметры защитных *R-C* цепочек и управляющих импульсов (скважность управляющих импульсов γ , которая задается в модели напряжением управления U_y , и частота коммутации f_{κ}).

4. В настройках моделирования Simulation→Configuration Parameters выбрать метод численного решения дифференциальных уравнений, шаг и время расчета.

5. В результате расчета получить: временные диаграммы напряжения источника питания $u_c = f(t)$, тока и напряжения на нагрузке $i_{\rm H} = f(t)$ и $u_{\rm H} = f(t)$, тока и напряжения пары основного и шунтирующего транзисторов $i_{\rm VT} = f(t)$ и $u_{\rm VT} = f(t)$, например, VT1 и VT4 или VT2 и VT3, а также временные диаграммы управляющих импульсов всех транзисторов схемы. 6. По результатам расчетов:

6.1) исследовать влияние индуктивности *L* на форму кривой тока и напряжения нагрузки. Несколько разных значений *L* задаются дополнительно преподавателем;

6.2) исследовать влияние скважности управляющих импульсов γ (напряжения управления U_y) и частоты коммутации f_k на форму кривой тока нагрузки и напряжения. Несколько разных значений U_y и f_k задаются преподавателем.

Параметры настройки основных блоков имитационной модели однофазного ИРН приведены ниже в виде отдельных рисунков либо указаны над самими блоками в виде числовых значений.

Значение напряжения управления U_y (0...10 В) задается обратно пропорционально скважности γ управляющего импульса с помощью блока Constant1, представленного на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3). Так, например, скважности $\gamma = 0,1$ соответствует напряжение управления $U_y \approx 9$ В, а $\gamma = 0,9$ – напряжение управления $U_y \approx 1$ В.



Рисунок 4.3 – Общий вид имитационной модели однофазного ИРН

Значение частоты коммутации f_{κ} задается в подсистеме «Pulse generator» (рис. 4.4) в блоках Signal Generator 1 и 2. Так,

чтобы обеспечить $f_{\kappa} = 1$ кЦ, в обоих блоках Signal Generator параметр Frequency нужно задать равным 500. Параметр Magnitude при этом следует оставить равным 10. Для задания $f_{\kappa} = 500$ Гц параметр Frequency в обоих блоках Signal Generator соответственно должен быть равен 250.



Рисунок 4.4 – Общий вид подсистемы «Pulse formation subsystem» для формирования импульсов управления транзисторами силовой схемы ИРН

Содержание отчета

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Полная принципиальная электрическая схема однофазного ИРН и алгоритм его работы.

4. Общий вид имитационной модели однофазного ИРН, составленной из блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems с раскрытием ее подсистем в виде отдельных рисунков, с указанием введенных параметров напряжения источника питания, R и L нагрузки, параметров защитных R-C цепочек и управляющих импульсов. 5. Временные диаграммы напряжения источника питания $u_c = f(t)$, тока и напряжения на нагрузке $i_{\rm H} = f(t)$ и $u_{\rm H} = f(t)$, тока и напряжения выбранной пары (VT1, VT4 или VT2, VT3) основного и шунтирующего транзисторов $i_{\rm VT} = f(t)$ и $u_{\rm VT} = f(t)$, временные диаграммы управляющих импульсов для транзисторов VT1...VT4.

6. Выводы по работе.



Рисунок 4.5 – Подсистема «Pulse generator», представленная в виде единого блока на рис. 4.4



Рисунок 4.6 – Подсистема «VT1 pulse formation», представленная в виде единого блока на рис. 4.4, для формирования управляющих импульсов на основной транзистор VT1 в соответствии с алгоритмом на рис. 4.1



Рисунок 4.7 – Подсистема «VT2 pulse formation», представленная в виде единого блока на рис. 4.4, для формирования управляющих импульсов на основной транзистор VT2 в соответствии с алгоритмом на рис. 4.1



Рисунок 4.8 – Подсистема «VT3 pulse formation», представленная в виде единого блока на рис. 4.4, для формирования управляющих импульсов на основной транзистор VT3 в соответствии с алгоритмом на рис. 4.1



Рисунок 4.9 – Подсистема «VT4 pulse formation», представленная в виде единого блока на рис. 4.4, для формирования управляющих импульсов на основной транзистор VT4 в соответствии с алгоритмом на рис. 4.1

Block Parameters: AC Voltage Source	
AC Voltage Source (mask) (link)	
Ideal sinusoidal AC Voltage source.	
Parameters	
Peak amplitude (V):	
311	
Phase (deg):	
0	
Frequency (Hz):	
50	
Sample time:	
0	
Measurements None	~
OK Cancel Help A	.pply

Рисунок 4.10 – Параметры настройки блока AC Voltage Source, представленного на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3)

Block Parameters: IGBT/Diode_1	X
_ IGBT/Diode (mask) (link)	
Implements an ideal IGBT, Gto, or Mosfet and antiparallel diode.	
Parameters	
Internal resistance Ron (Ohms) :	
1e-3	
Snubber resistance Rs (Ohms) :	
10000	
Snubber capacitance Cs (F) :	
1e-9	
Show measurement port	
OK Cancel Help Appl	/

Рисунок 4.11 – Параметры настройки блока IGBT/Diode_1, представленного на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3)

Блоки IGBT/Diode_2, IGBT/Diode_3 и IGBT/Diode_4, представленные на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3), имеют аналогичные рис. 4.11 параметры настройки.

Block Parameters: R-L load
- Series RLC Branch (mask) (link)
Implements a series branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.
Parameters
Branch type: RL
Resistance (Ohms):
2
Inductance (H):
0.006
Set the initial inductor current
Measurements None
OK Cancel Help Apply

Рисунок 4.12 – Параметры настройки блока *R-L* нагрузки (R-L load), представленного на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3)

To Workspace	-
Write input to specified array or structure in a workspace, based simulation, data is written in the MATLAB base work is not available until the simulation is stoppind or passed. Fi command line simulation using sim command, the workspace specified using DetWorkspace field in the option structure.	For menu space. Data or ace is
Parameters	
Variable name:	
n ⁻ uað.	
Limit data points to last:	
inf	
Decimation:	
1	
Sample time (-1 for inherited):	
-1	
Save format: Array	4
🗌 Log flued-point data as an fliobject	
OK Cancel Help	Apply

Рисунок 4.13 – Параметры настройки блока То Workspace3 (рис. 4.3) для вывода значений напряжения на нагрузке *u_nagr* в рабочую область

Все остальные блоки типа То Workspace, представленные на общем виде имитационной модели ИРН (рис. 4.3), имеют аналогичные настройки, за исключением имени переменной Variable Name.

Select:	Simulation time					
Select: 	Simulation time Start time: 0 Solver options Type: Variable-step Max step size: auto Initial step size: auto Solver reast method: Fest Number of consecutive min steps: Solver locolian method:			Stop time: 0.04 Solver: ode23tb (stiff/TR-NDF2) Reliable tolerance: auto Shape preservation: [bladdle all 1 auto		
	Tasking mode for peri Automatically have P Higher priority valu Zero-crossing options Zero-crossing control: Time tolerance: Number of consecutive	vdic semple times: fle rate transition for data transfer e indicates higher task priority use local settings 100°128°eps zero crossings:		Auto Algorithm: Signal threshold:	Adaptive auto 1e8	

Рисунок 4.14 – Параметры настройки моделирования «Simulation—Configuration Parameters»

В качестве примера ниже приведены результаты моделирования работы однофазного ИРН при $f_{\rm K} = 1$ кЦ и $U_{\rm y} \approx 4$ В ($\gamma = 0,6$) и параметрах *R-L* нагрузки R = 2 Ом, L = 0,006 Гн.



Рисунок 4.15 – Временная диаграмма питающего напряжения сети



Рисунок 4.16 – Временная диаграмма напряжения на нагрузке

52



Рисунок 4.18 – Временная диаграмма напряжения на основном транзисторно-диодном ключе VT1



Рисунок 4.20 – Временная диаграмма напряжения на шунтирующем транзисторно-диодном ключе VT4

54



Рисунок 4.21 – Временная диаграмма тока шунтирующего транзисторно-диодного ключа VT4



Рисунок 4.22 – Временные диаграммы управляющих импульсов для транзисторов VT1...VT4 силовой схемы однофазного ИРН

Список использованных источников

1. Розанов, Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю. К. Розанов. – М. : Энергия, 1979. – 392 с.

2. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – М. : Транспорт, 1999. – 435 с.

3. Розанов, Ю. К. Основы силовой электроники / Ю. К. Розанов. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 295 с.

4. Засорин, С. Н. Электронная и преобразовательная техника / С. Н. Засорин, В. А. Мицкевич, К. Г. Кучма. – М. : Транспорт, 1981. – 319 с.

5. Гультяев, А. Визуальное моделирование в среде Matlab : учебный курс / А. Гультяев. – СПб. : Питер, 2000. – 432 с.

6. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

7. http://exponenta.ru

Учебное издание

СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум) для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

В 2 частях

Часть 1

Составители : УЛАЩИК Николай Михайлович ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Сергеевич

Редактор Л. Н. Шалаева Компьютерная верстка Н. А. Школьниковой

Подписано в печать 17.10.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 3,31. Уч.-изд. л. 2,59. Тираж 100. Заказ 816.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.