

Лабораторная работа №3

Исследование однофазных автономных инверторов

1. Теоретическая справка

Автономный инвертор – устройство, преобразующее постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) с неизменной или регулируемой частотой и работающее на автономную (не связанную с сетью) нагрузку. Инверторы широко применяются в регулируемом электроприводе и устройствах бесперебойного питания. В первом случае обычно используются трехфазные инверторы с возможностью регулирования частоты напряжения, во втором – однофазные или трехфазные с частотой выходного напряжения 50 Гц. В электротермических установках при помощи инверторов создается переменный ток высокой частоты. В электроэнергетике на основе инверторов выполняются устройства регулирования мощности.

Основой автономных инверторов являются полностью управляемые полупроводниковые ключи (транзисторы или запираемые тиристоры). Схемы автономных инверторов подразделяют на инверторы напряжения, инверторы тока и резонансные инверторы. Соответственно, первые обладают преимущественно свойствами источника напряжения, вторые – свойствами источника тока. Работа схем третьего типа основана на резонансных явлениях в цепи нагрузки.

Принцип действия однофазных инверторов рассмотрим на примере мостовой схемы инвертора напряжения с активно-индуктивной нагрузкой (рис. 1). В простейшем случае схема работает по следующему алгоритму: транзисторы включаются парами и поочередно проводят ток: сначала VT_2, VT_3 , затем VT_1, VT_4 и т.д. На выходе инвертора формируется напряжение, имеющее форму меандра (прямоугольное). Длительность включенного состояния транзисторов равна половине периода формируемого напряжения. Известно, что при разложении меандра в ряд Фурье присутствуют все нечетные гармонические составляющие. Частота первой (основной) гармоники определяется периодом меандра. В большинстве случаев такое напряжение не удовлетворяет требованиям потребителей. С целью улучшения гармонического состава инвертированного напряжения используются более сложные алгоритмы управления транзисторами, в частности, широтно-импульсное управление.

Широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) называется импульсное управление, при котором ширина импульсов изменяется (модулируется) в пределах периода основной частоты для того, чтобы создать определенную форму выходного напряжения. Частота следования управляющих импульсов при этом остается неизменной. Простейшим вариантом организации ШИМ является однократная модуляция. В этом случае переключение каждой пары транзисторов происходит со смещением по отношению к другой. В результате на выходе инвертора формируется напряжение в виде меандра с нулевыми паузами. Это позволяет регулировать напряжение, изменяя относительную длительность ненулевых интервалов (коэффициент заполнения γ). Амплитуда основной гармоники рассчитывается как

$$U_{ab1m} = \frac{4E}{\pi} \cdot \sin \frac{\gamma \pi}{2}.$$

Наиболее эффективным вариантом ШИМ является изменение ширины импульсов выходного напряжения по синусоидальному закону (синусоидальная ШИМ). Формирование импульсов происходит посредством

сравнения сигнала заданной формы (синусоидальной), называемого опорным или эталонным, с высокочастотным сигналом треугольной формы (несущим). Опорный сигнал является модулирующим и определяет форму выходного напряжения инвертора. Существуют модификации этого метода, в которых модулирующие сигналы представлены специальными функциями, отличными от синусоиды, что помогает подавить некоторые высшие гармоники. Управление на основе ШИМ позволяет формировать основную гармонику напряжения (тока) требуемой частоты с возможностью регулирования её амплитуды и фазы.

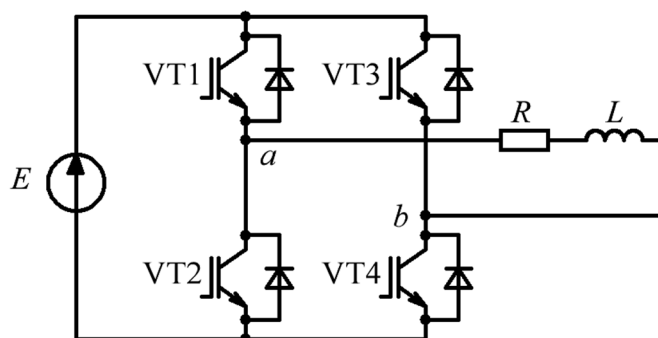


Рис. 1. Однофазный инвертор напряжения с RL -нагрузкой

В мостовой схеме инвертора возможна реализация двух типов ШИМ – двухполярной и однополярной. При двухполярной модуляции поочередно в проводящем состоянии находятся сначала $VT1$ и $VT4$, потом $VT2$ и $VT3$. Условия переключения транзисторов (рис. 2):

$u_m(\vartheta) > u_n(\vartheta)$ – проводят $VT1$ и $VT4$;

$u_m(\vartheta) < u_n(\vartheta)$ – проводят $VT2$ и $VT3$.

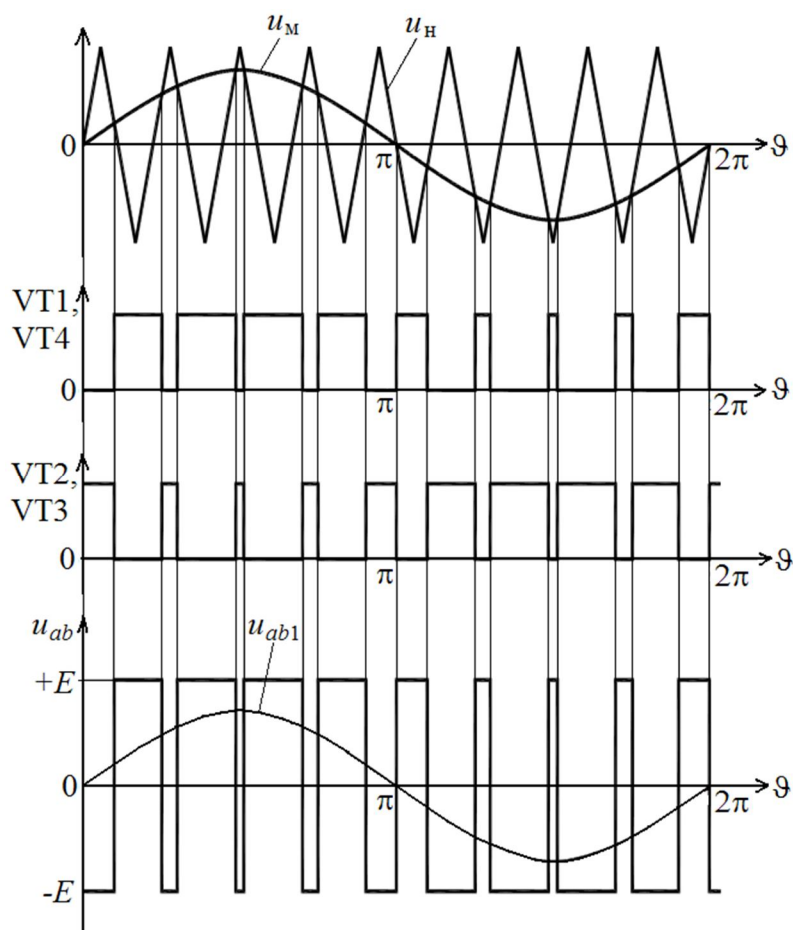


Рис. 2. Принцип формирования управляющих импульсов при двухполярной ШИМ

При однополярной модуляции формируется две последовательности управляющих импульсов – одна для $VT1$ и $VT2$, другая – для $VT3$ и $VT4$, как показано на рис. 3. Для этого используется два модулирующих сигнала, находящиеся в противофазе. Условия переключения:

$$u_M^+(\vartheta) > u_H(\vartheta) - VT1 \text{ включен, } VT2 \text{ выключен;}$$

$$u_M^-(\vartheta) > u_H(\vartheta) - VT3 \text{ включен, } VT4 \text{ выключен.}$$

Таким образом, при однополярной ШИМ возможно четыре комбинации состояний транзисторов, указанные в табл. 1 (проводящему состоянию соответствует 1, выключенному – 0). В результате на нагрузке формируется трехуровневое напряжение.

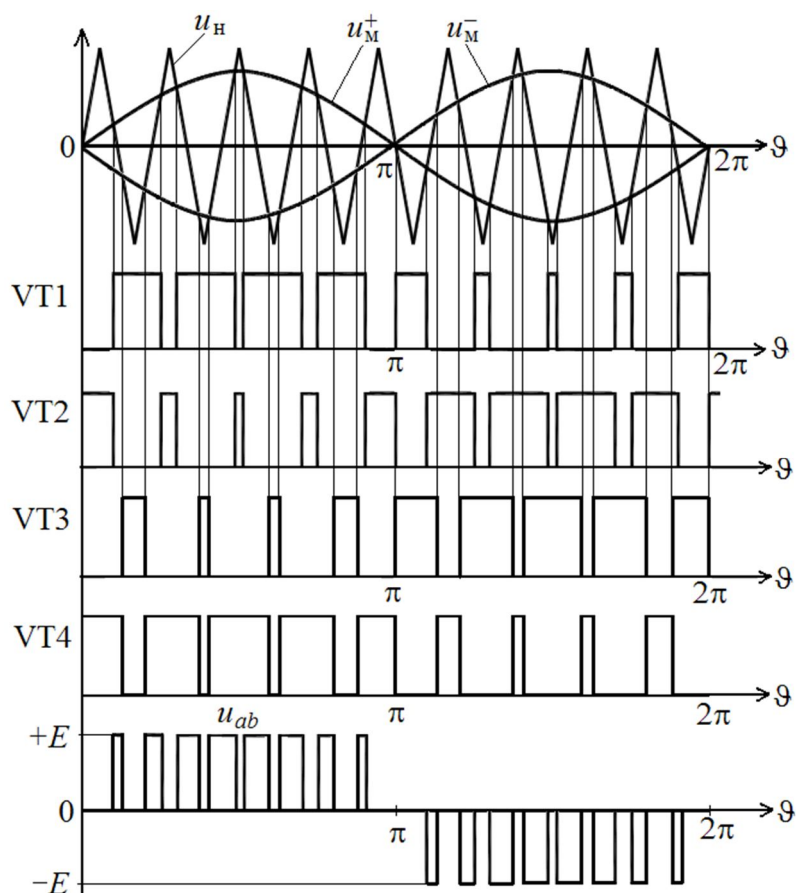


Рис. 3. Принцип формирования управляющих импульсов при однополярной ШИМ

Табл. 1. Комбинации состояний транзисторов при однополярной ШИМ

	VT1	VT2	VT3	VT4	
I	1	0	0	1	$u_{ab} = +E$
II	0	1	1	0	$u_{ab} = -E$
III	1	0	1	0	$u_{ab} = 0$
IV	0	1	0	1	$u_{ab} = 0$

Как при однополярной, так и при двухполярной модуляции амплитуда первой гармоники выходного напряжения инвертора зависит от соотношения амплитуд модулирующего и несущего сигналов (коэффициента модуляции M):

$$U_{ab1m} = M \cdot E.$$

Режим работы, при котором амплитуда модулирующих сигналов больше амплитуды несущего сигнала называется перемодуляцией. При этом амплитуда

первой гармоники выходного напряжения будет превышать напряжение источника. Максимально возможная амплитуда основной гармоники в этом случае:

$$U_{ab1m, \max} = \frac{4E}{\pi}.$$

2. Описание работы

Цель работы

Исследование принципа работы и характеристик однофазного мостового инвертора с управлением различными методами синусоидальной широтно-импульсной модуляции.

Компьютерная модель

Модель однофазного мостового инвертора напряжения в программе *MatLab/Simulink* показана на рис. 4. Транзисторный мост моделируется при помощи блока *Universal Bridge*, окно настроек параметров которого приведено на рис. 5. Задаются значения сопротивления транзисторов ($R_{on} = 0,5 \text{ Ом}$) и падения напряжения на транзисторах и диодах ($V_f = 1,5 \text{ В}$, $V_{fd} = 0,8 \text{ В}$).

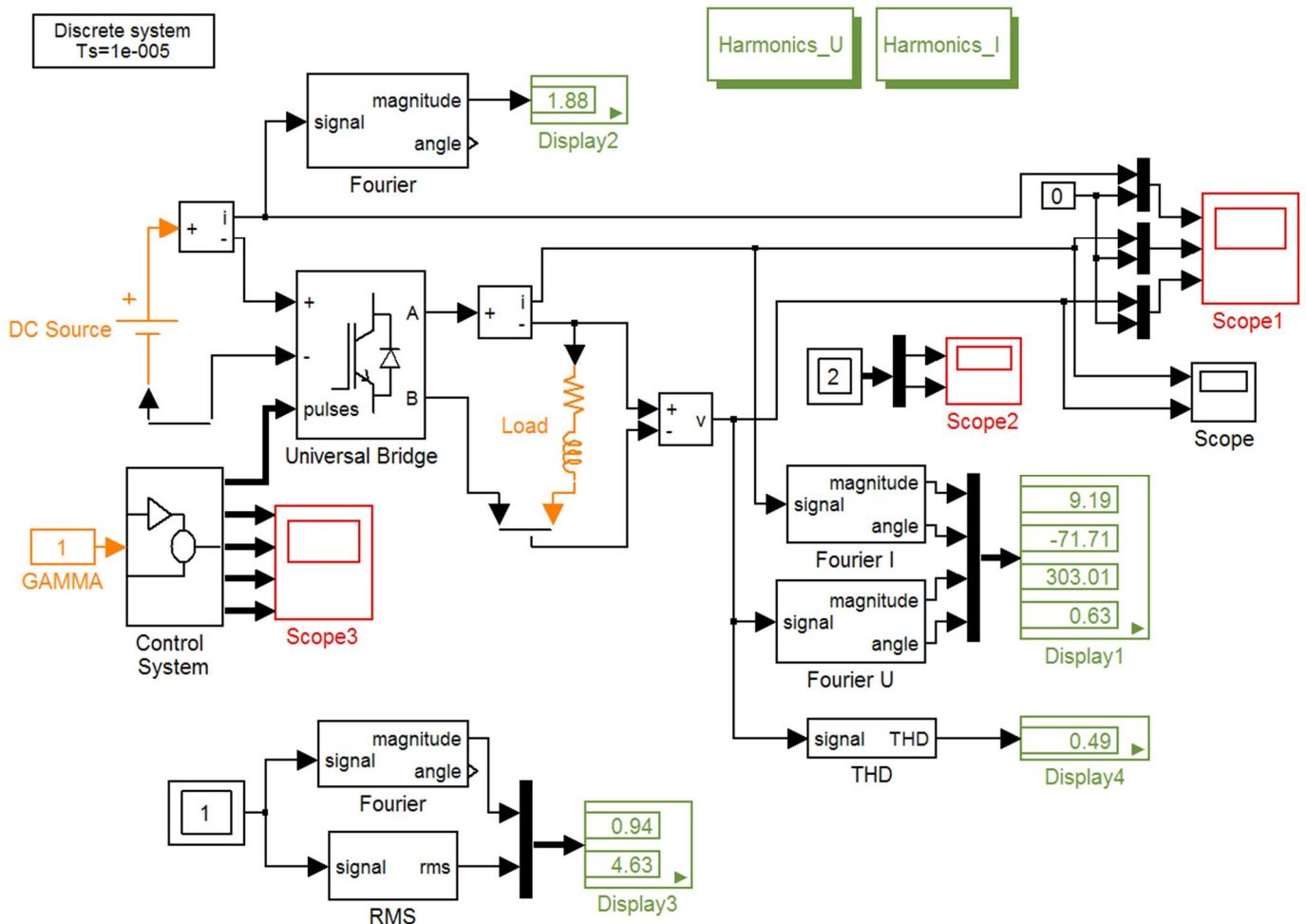


Рис. 4. Модель однофазного мостового инвертора

В состав модели также входят:

- блок управления инвертором (*Control System*);
- источник постоянного напряжения (*DC Source*);
- *RL*-нагрузка (*Load*);
- амперметры и вольтметры;

- блоки вычисления гармонических составляющих измеряемых сигналов (*Fourier*);
- анализаторы гармонического состава измеряемых сигналов (*Harmonics*);
- блоки расчета действующих значений измеряемых сигналов (*RMS*);
- блоки численного отображения величин (*Display*);
- осциллографы (*Scope*).

Рис. 5. Окно настройки параметров блока *Universal Bridge*

Данные для выполнения работы

Исходными данными в работе являются (табл. 2):

- напряжение источника (U_{DC});
- сопротивление нагрузки (R_H);
- индуктивность нагрузки (L_H).



Табл. 2. Исходные данные

№ бриг.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_{DC} , В	250	260	270	280	290	300	310	320	330
R_H , Ом	10	20	30	40	50	60	70	80	90
L_H , Гн	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование принципа действия инвертора

Для проведения исследования необходимо открыть в программе *MatLab6.5* файл «*Lab3_a*» и произвести моделирование при значениях параметров нагрузки R_H и L_H , указанных в табл. 2. Значения R_H и L_H задаются в блоке *Load*, U_{DC} – в блоке *DC Source*. Моделирование проводится при 6 значениях коэффициента заполнения γ (задается в блоке *GAMMA*): 1, 2/3, 1/2, 1/3, 1/4, 1/8.

Запуск модели на расчет осуществляется кнопкой  (*Start simulation*) на панели инструментов в окне модели. Диаграммы тока и напряжения на нагрузке и тока источника снимаются с осциллографа *Scope1*, диаграммы напряжения и токов транзистора и диода – с осциллографа *Scope2*, диаграммы сигналов управления – с осциллографа *Scope3*, гармонический состав тока и напряжения – показания блоков *Harmonics_I* и *Harmonics_U*. Необходимо сохранить диаграммы в виде графических файлов (при помощи команды *PrtScr*), предварительно изменив масштаб отображения кнопкой  (*Autoscale*) на панели инструментов в окне осциллографа. **Диаграммы сохраняются для трех значений γ : 1, 1/2 и 1/4. Для всех значений γ необходимо сохранить только гармонический состав напряжения (блок *Harmonics_U*), записать значение коэффициента гармоник напряжения (показания *Display4*).**

По полученным данным определить значения амплитуд наиболее значимых гармоник U_{nm} и вычислить коэффициенты гармоник напряжения для заданных коэффициентов заполнения (γ):

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{nm}^2} / U_{1m},$$

где U_{1m} – амплитуда 1-ой гармоники, U_{nm} – амплитуда n -ой гармоники.

Определить теоретические значения коэффициента гармоник напряжения для заданных коэффициентов заполнения (γ):

$$K_{\Gamma} = \frac{U_{B\Gamma}}{U_1} = \sqrt{\frac{U^2}{U_1^2} - 1},$$
$$U = E \cdot \sqrt{\gamma}, \quad U_1 = U_{1m} / \sqrt{2},$$

где $U_{B\Gamma}$ – действующее значение высших гармоник (всех, кроме основной), U_1 – действующее значение 1-ой (основной) гармоники напряжения, U – действующее значение напряжения (всех гармоник, включая основную).

По полученным результатам необходимо построить:

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от γ и соответствующую теоретическую характеристику;
- зависимость амплитуд 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник напряжения от γ ;
- зависимости коэффициентов гармоник напряжения от γ (1 – по измеренным значениям, 2 – рассчитанную по гармоникам, 3 – теоретическую).

3.2. Исследование инвертора с двухполярной ШИМ

Для проведения исследования необходимо открыть в программе *MatLab6.5* файл «*Lab3_b*» и выполнить моделирование при указанных в табл. 2 параметрах. Моделирование проводится при 6 значениях коэффициента модуляции M (задается в блоке *MOD*): 0,1; 0,5; 1; 1,5; 3; 5. Для $M = 0,5; 1$ и 1,5 необходимо сохранить диаграммы с осциллографов *Scope1*, *Scope2*, *Scope3* и показания блоков *Harmonics_U* и *Harmonics_I*. Для всех значений M записать значения амплитуды основной гармоники напряжения (верхняя строчка блока *Display1*), коэффициента гармоник напряжения (показания *Display4*) и коэффициента искажения напряжения (показания *Display5*).

По полученным данным для $M = 1$ определить значения амплитуд 4-х наиболее значимых гармоник U_{nm} и вычислить коэффициент гармоник напряжения. Сравнить полученное значение с измеренным.

По результатам необходимо построить:

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от коэффициента модуляции (регулирующую характеристику) и соответствующую теоретическую зависимость;
- зависимость коэффициента гармоник (несинусоидальности) напряжения от M ;
- зависимость коэффициента искажения напряжения от M .

3.3. Исследование инвертора с однополярной ШИМ

Для проведения исследования необходимо открыть в программе *MatLab6.5* файл «*Lab3_c*» и произвести моделирование при указанных в табл. 2 параметрах. Моделирование проводится при 6 значениях коэффициента модуляции M (задается в блоке *MOD*): 0,1; 0,5; 1; 1,5; 3; 5. Для $M = 0,5; 1$ и 1,5 необходимо сохранить диаграммы с осциллографов *Scope1*, *Scope2*, *Scope3* и показания блоков *Harmonics_U* и *Harmonics_I*. Для всех значений M необходимо записать величину амплитуды основной гармоники напряжения (верхняя строчка блока *Display1*), значения коэффициента гармоник напряжения (показания *Display4*) и коэффициента искажения напряжения (показания *Display5*).

По полученным данным для $M = 1$ определить значения амплитуд 4-х наиболее значимых гармоник U_{nm} и вычислить коэффициент гармоник напряжения. Сравнить полученное значение с измеренным и со значениями, полученными в п. 3.2.

По результатам требуется построить (на той же координатной плоскости, что и зависимости п. 3.2):

- зависимость амплитуды основной гармоники напряжения от M ;
- зависимость коэффициента гармоник напряжения от M ;
- зависимость коэффициента искажения напряжения от M .

3.4. Исследование внешних и энергетических характеристик

Исследование проводится для двух случаев:

- 1) инвертор с однополярной ШИМ при $M = 1$ (модель «Lab3_c»);
- 2) инвертор без ШИМ при $\gamma = 1$ (модель «Lab3_a»).

При снятии внешних характеристик изменяются параметры нагрузки R_H , L_H . Необходимо выполнить моделирование для 3-х значений R_H : 10 Ом, 20 Ом, 90 Ом. При этом для каждого R_H рассчитывается величина L_H так, чтобы постоянная времени нагрузки оставалась неизменной и равной $\tau = L_H/R_H = 0,01$ с. Результаты заносятся в табл. 3, диаграммы сохранять не нужно. Амплитуды первых гармоник напряжения и тока нагрузки и их начальные фазы (U_{H1m} , φ_U , I_{H1m} , φ_I) определяются по показаниям блока *Display1*, среднее значение тока источника – по показаниям блока *Display2*. Средние и действующие значения токов транзистора и диода определяются по показаниям *Display3* ($I_{VT\text{ ср}}$, $I_{VT\text{ д}}$, $I_{VD\text{ ср}}$, $I_{VD\text{ д}}$).

Табл. 3. Внешние и энергетические характеристики

Данные		Измерения									Вычисления					
Сопротивление нагрузки	Индуктивность нагрузки	Ср. знач. тока источника	Амплитуда 1-й гарм. напряжения	Амплитуда 1-й гармоники тока	Начальная фаза напряжения	Начальная фаза тока	Ср. знач. тока транзистора	Дейст. знач. тока транзистора	Среднее значение тока диода	Действующее знач. тока диода	Потребляемая мощность	Полная мощность по 1-й гарм.	Активная мощность по 1-й гарм.	Реактивная мощность по 1-й гарм.	Мощность потерь в инверторе	Мощность потерь (теоретическая)
R_H	L_H	$I_{И\text{ ср}}$	U_{H1m}	I_{H1m}	φ_U	φ_I	$I_{VT\text{ ср}}$	$I_{VT\text{ д}}$	$I_{VD\text{ ср}}$	$I_{VD\text{ д}}$	$P_{И}$	S_{H1}	P_{H1}	Q_{H1}	P_{Π}	$P_{\Pi, \tau}$
Ом	Гн	А	В	А	гр	гр	А	А	А	А	Вт	ВА	Вт	вар	Вт	Вт
90	0,9															
20	0,2															
10	0,1															

Сдвиг по фазе между первыми гармониками напряжения и тока нагрузки (угол нагрузки) рассчитывается по формуле:

$$\varphi_H = \varphi_U - \varphi_I.$$

Полная, активная и реактивная мощности нагрузки по 1-ой гармонике определяются по выражениям:

$$S_{H1} = \frac{U_{H1m} \cdot I_{H1m}}{2}, \quad P_{H1} = S_{H1} \cdot \cos \varphi_H, \quad Q_{H1} = S_{H1} \cdot \sin \varphi_H.$$

Мощность, потребляемая инвертором от источника постоянного напряжения:

$$P_{И} = U_{DC} \cdot I_{И\text{ ср}}.$$

Мощность потерь в инверторе по измеренным данным рассчитывается как

$$P_{\Pi} = 4 \left(V_f I_{VT\text{ ср}} + V_{fd} I_{VD\text{ ср}} + (I_{VT\text{ д}}^2 + I_{VD\text{ д}}^2) R_{on} \right).$$

Также для инвертора с ШИМ-управлением необходимо рассчитать мощность потерь по теоретическим формулам:

$$P_{\Pi, \tau} = 4(P_{VT} + P_{VD}),$$

$$P_{VT} = V_f \frac{I_m}{2\pi} \left(1 + \frac{M\pi}{4} \cos \varphi \right) + \frac{I_m^2 R_{on}}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{2M}{3\pi} \cos \varphi \right),$$

$$P_{VD} = V_{fd} \frac{I_m}{2\pi} \left(1 - \frac{M\pi}{4} \cos \varphi \right) + \frac{I_m^2 R_{on}}{2} \left(\frac{1}{4} - \frac{2M}{3\pi} \cos \varphi \right).$$

где I_m – амплитуда 1-ой гармоники тока нагрузки, $\varphi = \arctg(\omega L_H / R_H)$ – угол нагрузки.

Для инвертора без модуляции теоретически мощность потерь определяется следующим образом:

$$P_{\Pi, \tau} = 4(P_{VT} + P_{VD}),$$

$$P_{VT} = V_f \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \varphi) + \frac{I_m^2 R_{on}}{4\pi} \left(\pi - \varphi + \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right),$$

$$P_{VD} = V_{fd} \frac{I_m}{2\pi} (1 - \cos \varphi) + \frac{I_m^2 R_{on}}{4\pi} \left(\varphi - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \right).$$

По данным табл. 3 для двух исследованных случаев необходимо построить:

- внешние (нагрузочные) характеристики инверторов $U_{H1m} = f(I_{H1m})$;
- энергетические характеристики:

$P_{\Pi} = f(P_{H1})$, $S_{H1} = f(P_{H1})$, $Q_{H1} = f(P_{H1})$ – на одном графике (для каждого случая);
 $P_{\Pi} = f(P_{H1})$, $P_{\Pi, \tau} = f(P_{H1})$ – на отдельной координатной плоскости.

3.5. Исследование работы инвертора с LC-фильтром

Для проведения исследования необходимо открыть в программе *MatLab6.5* файл «*Lab3_d*». Моделирование проводится при заданных параметрах Г-образного индуктивно-емкостного фильтра на выходе инвертора: $L_{\Phi} = 20$ мГн, $C_{\Phi} = 200$ мкФ. При этом инвертор работает на активную нагрузку ($R_H = 50$ Ом и $R_H = 10$ Ом). Параметры нагрузки, фильтра и источника задаются в командном окне программы *MATLAB* в виде: $R=[\text{значение}]$, $L=20e-3$, $C=200e-6$, $U=[\text{значение}]$. Исследуется работа для трех алгоритмов управления:

- 1) однократная ШИМ при $\gamma = 1$;
- 2) двухполярная синусоидальная ШИМ при $M = 1$;
- 3) однополярная синусоидальная ШИМ при $M = 1$.

Диаграммы напряжения на входе и на выходе фильтра (на нагрузке), напряжения на дросселе фильтра и тока дросселя снимаются с осциллографов *Scope1*, *Scope2*, *Scope3*. Также необходимо сохранить гармонический состав отфильтрованного напряжения на нагрузке (показания блоков *Harmonics_U*).

По полученным данным необходимо определить значения амплитуд гармонических составляющих напряжения инвертора после фильтрации (на нагрузке) и его коэффициент гармоник.

Определить коэффициент фильтрации по формуле:

$$K_{\Phi n} = \frac{U_{mn, \text{ВЫХ}}}{U_{mn, \text{ВХ}}} = \frac{1}{(\omega_n / \omega_0)^2 - 1} = \frac{1}{\omega_n^2 L_{\Phi} C_{\Phi} - 1},$$

где $U_{m n \text{ вх}}$, $U_{m n, \text{ вых}}$ – амплитуда n -ой гармоники напряжения соответственно на входе и на выходе фильтра, ω_0 – резонансная частота фильтра, ω_n – частота наиболее значимой фильтруемой гармоники.

При заданных параметрах LC -фильтра и нагрузки требуется рассчитать:

- передаточную функцию фильтра: $W(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}(j\omega)}$;
- резонансную частоту фильтра: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\Phi C_\Phi}}$;
- коэффициент затухания: $\xi = \frac{1}{2R_H} \sqrt{\frac{L_\Phi}{C_\Phi}}$;
- амплитудно-частотную характеристику (АЧХ): $A(\omega) = |W(j\omega)|$;
- фазо-частотную характеристику (ФЧХ): $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im} W(j\omega)}{\text{Re} W(j\omega)}$.

Для заданных значений сопротивления нагрузки необходимо построить АЧХ и ФЧХ фильтра в соответствии с полученными выражениями $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, а также асимптотические АЧХ и ФЧХ фильтра в логарифмическом масштабе (ЛАЧХ и ЛФЧХ).

4. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия мостового инвертора.
2. Объясните принцип формирования импульсов управления транзисторами мостового инвертора при управлении методами синусоидальной ШИМ?
3. Сравните работу инвертора при различных методах управления: однократной ШИМ, двухполярной и однополярной синусоидальной ШИМ.
4. Каково назначение выходного фильтра инвертора и каковы его основные характеристики?
5. Проанализируйте нагрузочные, энергетические и регулировочные характеристики инверторов.