МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ПРОГРАММЕ SPEEDFIT 2.0 DESIGN SIMULATOR

Встатье приведена краткая информация о программе моделирования силовых имульсных преобразователей, построенных а основе SiC-транзисторов. Приведены результаты моделирования понижающего DCDCпреобразователя при различных частотах коммутации ключей и различных топологиях схемы преобразователя. Результаты моделирования позволяют осуществлять обоснованный выбор конфигурации преобразователей за очень короткое время.

В. Макаренко

Компания Cree, ведущий мировой поставщик изделий из карбида кремния (SiC), в том числе лучших в своем классе SiC MOSFET, диодов Шоттки и модулей, представила бесплатный онлайн-инструмент для моделирования схем, который позволяет инженерам-разработчикам силовой электроники моделировать и оценивать эффективность силовых устройств на основе SiC, а также помогает выбрать наиболее эффективное устройств SiC для каждого приложения [1,2].

Разработанная с использованием веб-платформы моделирования PLECS от Plexim, новая программа моделирования SpeedFit 2.0 Design Simulator имеет простой, интуитивно понятный интерфейс, который могут использовать инженеры-конструкторы силовой электроники. Программа может быть использована для моделирования работы силовых преобразователей DC/DC, AC/DC или DC/AC на основе SiC. Программа SpeedFit 2.0 Design Simulator позволяет контролировать формы сигналов напряжения и тока, время переключения силовых ключей, потери в элементах схемы и максимальную температуру перехода силовых ключей и диодов.

Пользователи могут выбрать топологию, указать устройство SiC или выбрать его из библиотеки, определить параметры термоинтерфейса и метод охлаждения, и быстро получить результаты моделирования. Инструмент моделирования SpeedFit 2.0 Design Simulator также позволяет пользователям определять значения пассивных компонентов схемы и сформировать отчет по результатам моделирования. В результате моделирования пользователь получает не принципиальную схему всего

MODELING SWITCHING POWER SUPPLIES IN THE SPEEDFIT 2.0 DESIGN SIMULATOR PROGRAM

Abstract - The article provides a summary of the simulation program of force-in-law converters, built and based SiC transistors. The results of simulation of a lowering DCDC converter at different frequencies of key switching and various topologies of the converter scheme are given. The simulation results allow you to make a reasonable choice of converter configuration in a very short time.

V. Makarenko

ЭКиС

устройства, а функциональную с рассчитанными параметрами силовой части.

Для упрощения освоения приемов работы с помощью SpeedFit 2.0 Design Simulator можно воспользоваться библиотекой готовых примеров силовых устройств [3], спроектированных с помощью программы, и руководством пользователя [4]. Краткое описание возможностей программы можно найти в [5,6].

Основные возможности программы [4]:

• типы преобразователей DC/DC, AC/DC, DC/AC

 DC/DC-преобразователи: повышающий, понижающий, повышающе-понижающий, 3-х уровневый повышающий

♦ диапазон входных напряжений DC/DC-преобразователей 10...1700 В

♦ диапазон выходных напряжений DC/DC-преобразователей 10...1700 В

 ♦ диапазон выходной мощности DC/DC-преобразователей от 100 Вт до 300 кВт

 частота коммутации силовых ключей от 1 до 500 кГц

 DC/DC-преобразователи: двунаправленный CLLC, полный мост с фазовым сдвигом, LLC резонансный конвертер

 ◆ диапазон входных напряжений для LLC/CLLC от 100 до 1700 В, для моста с фазовым сдвигом от 250 до 850 В

◆ диапазон выходных напряжений для LLC/CLLC от 100 до 1700 В, для моста с фазовым сдвигом от 250 до 750 В

♦ выходная мощность для LLC/CLLC от 100 Вт до 300 кВт, для моста с фазовым сдвигом от 2 до 100 кВт

ЭКиС

◆ частота коммутации ключей для LLC/CLLC от 10 до 100 кГц, для моста с фазовым сдвигом от 50 до 500 кГц (максимальное мертвое время 15% от длительности импульса управления ключом)

• AC/DC-преобразователи: однофазный двухуровневый AFE, однофазный трехуровневый NPC AFE, трехфазный двухуровневый AFE, трехфазный трехуровневый NPC AFE, трехфазный трехуровневый AFE T-типа, трехфазный выпрямитель Vienna, с бестрансформаторным д ым выходом, повышающий выпрямитель с корректором коэффициента мощности

- диапазон входных напряжений 10...1700 В
- диапазон выходных напряжений 10...1700 В
- выходная мощность от 100 Вт до 300 кВт
- частота коммутации ключей от 1 до 500 кГц
- частота входного напряжения от 40 до 250 Гц

 DC/AC-преобразователи: однофазный двухуровневый инвертор, однофазный трехуровневый NPC-инвертор, трехфазный двухуровневый инвертор, трехфазный трехуровневый NPC-инвертор, трехфазный трехуровневый инвертор Т-типа

диапазон входных напряжений 10...1700 В

♦ диапазон выходных напряжений (среднеквадратическое значение)10...1700 В

- выходная мощность от 100 Вт до 300 кВт
- коэффициент мощности от 0.5 до 1
- частота коммутации ключей от 1 до 500 кГц
- частота выходного напряжения 40...250 Гц.

Для доступа к программе необходимо обратиться на страницу https://www.wolfspeed.com/speedfit/. На первой странице (рис. 1) пользователю предлагается выбрать тип преобразователя. Для примера рассмотрим процесс проектирования DC/DC-преобразователя мощностью 1 кВт с выходным напряжением 12 В.



Рис. 1. Выбор типа преобразователя для моделирования

В нижней части окна располагается кнопка **Next**, после нажатия на которую открывается вкладка **Input** (рис. 2), на которой необходимо задать параметры преобразователя. Зададим входное напряжение 24 В, выходное – 12 В, частоту коммутации ключей 200 кГц и выходную мощность 1000 Вт.

После нажатия кнопки **Next** осуществляется переход на вкладку **Device** (рис. 3), на которой необходимо выбрать либо полевой транзистор SiC, либо модуль.

Пользователю предлагается выбрать полевые транзисторы и диоды, либо модули, содержащие эти компонента. Для каждого из предлагаемых приборов доступна ссылка на загрузку Datasheet. Кроме выведенных на экран, можно выбрать и другие приборы, поставив птичку в окошке **Show all available modules** (или транзисторов, или диодов). Кроме выбора прбора необходимо задать число параллельно включенных транзисторов или модулей. В окне также выводится информация о сопротивлении внешнего резистора, включенного в цепь затвора.

Параметры для теплового расчета задаются на вкладке **Thermal** (рис. 4).

Пользователь может задать тип системы охлаждения и ее тепловые характеристики. Расчет производится для случая, когда все полупроводниковые приборы смонтированы на одном радиаторе. На радиаторе можно установить дополнительный источник тепла (например, вспомогательный конвертер для питания элементов схемы). Кроме того, можно задать сопротивление теплового интерфейса. Тепловое моделирование может производиться либо при изменяющейся температуре радиатора, либо при фиксированной (окошко Heatsink temperature T_h). В случае моделирования при изменяющейся температуре радиатора необходимо задать тепловое сопротивление (Thermal resistance **R**_{th,ha}), постоянную времени радиатора (**Heatsink** time constant τ_{ha}), дополнительные источники тепла на радиаторе (Additional heat source on heatsink P_{add})и температуру окружающей среды (Ambilent temperature T_{amb}).

После нажатия кнопки **Next** осуществляется переход на вкладку **Simulation** (рис. 5).

На рис. 5 выводится топология схемы выбранного DC/DC-преобразователя с рассчитанными параметрами пассивных компонентов. Для получения результатов моделирования преобразователя необходимо нажать кнопку **Simulate**. Результат моделирования приведен на рис. 6.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

ЭКиС

	put voltage		C	output voltag	e		Rated	d output	power S _o
2	24 V			12	V		100	0	W
V	witching frequency	Fsw							
2	200 kHz								
	- 1 - 1 1 1								
	Duck convertor					님	MOSFET		
	Buck-boost converter	erter			Input voltage			-	· · · · ·
	Synchronous Bud	ck				z	5 Diode	+ 3	Output voltage
E	Back Next								
	Рис. 2. І	Вкла	цка зада	ания пар	раметр	ов пр	реобраз	оват	еля
n	lication Input	Dev	ice Ther	mal Sim	ulation	Summa	rv User (Guide	
	inoution input	Der		indi oirri	diation	ournina		Juide	
n	g voltage: 24 V								
e	e current: 83.3 A								
1	mended MOSFETs					Show a	ll available M(OSFETs	
	Part Number		VD	S R _{DS on}	(mΩ)	ID	Datasheet		
	C3M0015065D	new	65	0 15		96			
	C3M0015065K	new	65	0 15		96			
1	mended Diodes					Show	w all available	diodes	
1	mended Diodes Part Number			V _{RRM}	l _F	Shov	w all available asheet	diodes	
	mended Diodes Part Number C3D20060D			V _{RRM} 600	I _F 20	Data	w all available asheet	diodes	
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D			V _{RRM} 600 650	ا د 20 20	Show Data	w all available asheet	diodes	
	mended Diodes Part Number C3D20065D C3D20065D n	new		V _{RRM} 600 650 650	l⊧ 20 20 20	Show Data	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D E3D20065D C6D20065D	new		V _{RRM} 600 650 650 650	l⊭ 20 20 20 20 20	Show	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D E3D20065D n C6D20065D n CVFD20065A	new		V _{RRM} 600 650 650 650 650	le 20 20 20 20 20 20 20	Show Data C C C C C C C C C C C C C C C C C C	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D C3D20065D C6D20065D CVFD20065A E3D30065D	new new new		V _{RRM} 600 650 650 650 650 650	⊧ 20 20 20 20 20 20 30	Show	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D C3D20065D C3D20065D C4D20065D C4D20065D C4D20065D C4D20065D C5D50065D	new new new		V _{RRM} 600 650 650 650 650 650 650	l⊧ 20 20 20 20 20 20 20 30 50	Show Data Cal Cal Cal Cal Cal Cal Cal Cal Cal Ca	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D E3D20065D C6D20065D CVFD20065A E3D30065D E3D30065D	new new		V _{RRM} 600 650 650 650 650 650 650	וּ 20 20 20 20 20 20 30 30 50	Show Data C C C C C C C C C C C C C C C C C C	w all available asheet	diodes	
	Part Number C3D20060D C3D20065D C3D20065D C6D20065D CVFD20065A E3D30065D C5D50065D	new New		V _{RRM} 600 650 650 650 650 650	⊧ 20 20 20 20 20 20 30 50	Show	w all available <mark>asheet</mark> all available m	diodes	
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C6D20065D CVFD20065A C5D50065D C5D50065D C4D20065D C4D200650 C4D20065C C4D20065C C4D20065C C4D20065C C4D20065C C4D20065C	new new new	Vo	V RRM 600 650 650 650 650 650 650	lε 20 20 20 20 20 20 20 30 50 50	Show	w all available asheet all available m Datasheet	diodes	10-10-10-10-10-10-10-10-10-10-10-10-10-1
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C6D20065D CVFD20065A CVFD20065A C5D50065D C5D50065D mended Modules Part Number CAB011M12FM3	new new new	Vp 12	V _{RRM} 600 650 650 650 650 650 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	ι _ε 20 20 20 20 20 30 50 50	Show Data Call Call Call Call Call Call Call C	v all available asheet all available m Datasheet	diodes	Contraction of the second seco
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C6D20065D r CVFD20065A C5D50065D mended Modules Part Number CAB011M12FM3 CAS120M12BM2	new new	Vp 12 12	Укям 600 650 650 650 650 650 650 650 650 111 00 113	Ιε 20 20 20 20 20 20 30 50	Show Cat Cat Cat Cat Cat Cat Cat Cat Cat Cat	w all available asheet all available m Datasheet 2	diodes	Der state
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C3D20065D CCFD20065A C5D50065D CCFD20065A C5D50065D CFD20065A C5D50065D CFD20065A C5D50065D CAS120M12FM3 CAS120M12BM2 r of parallel module	new new new	Vo 12 12	V RRM 600 650 650 650 650 650 650 650 00 111 00 13	l _F 20 20 20 20 20 30 50 50	Show Control C	v all available asheet all available m Datasheet	diodes	10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 -
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D E3D20065D CVFD20065A E3D30065D CVFD20065A E3D30065D C5D50065D mended Modules Part Number CAB011M12FM3 CAS120M12BM2 r of parallel module	new new new	<mark>Ур</mark> 12 12	V RRM 600 650 650 650 650 650 650 650 00 111 00 13 Turn-on 2.5	_F 20 20 20 20 30 50 50 50 50 50 20 30 50 50	Show Show Show 105 120 Rg-on,ext	v all available asheet all available m Datasheet all a	diodes	A State
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C3D20065D CVFD20065A E3D30065D C5D50065D mended Modules Part Number CAB011M12FM3 CAS120M12BM2 r of parallel module	new new new	V ₀ 12 12	 У RRM 600 650 650 650 650 650 650 00 11 00 13 Turn-on g 2.5 	l _F 20 20 20 20 30 50 50 α	Show Data Control Con	w all available asheet all available m Datasheet	diodes	6 - 5 10 - 5
	mended Diodes Part Number C3D20060D C3D20065D C6D20065D C6D20065D CVFD20065A E3D30065D CVFD20065A C5D50065D mended Modules Part Number CAB011M12FM3 CAS120M12BM2 r of parallel module f gate resistor R _{g-off}	new new new	Vp 12 12	V RRM 600 650 650 650 650 650 650 650 650 11 00 11 00 13 Тигл-о р 2.5	IF 20 20 20 20 20 30 50	Show Show Call Call Call Call Call Call Call Cal	w all available asheet all available m Datasheet	diodes	Contraction of the second seco

Рис. З. Вкладка выбора силового транзистора или модуля

ЭКиС

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Applica	tion I	nput	Device	Thermal	Simulation	Summary	User Guide
Cooling sys	tem						
	Heatsink						
 Isolated 	Heatsink						
Thermal int	erface res	sistance R	th,ch				
0.1	K/W						
For modules I	R _{th.ch} is includ	ed in each sw	ritch location.	. Refer to the Use	r Guide tab for more inf	ormation.	
Heatsink te	mperature	e T _h					
Variable							
O Fixed							
	. 62						
Thermal rea	sistance R	th,ha					
1	K/W						
Heatsink til	me consta	int τ _{ha}					
60	s						
Additional I	neat sourc	e on heat	sink P _{add}				
0	W						
Ambient te	mperature	Tamb					
25	°C	ano					
Back Ne	đ						
	Ри	с. 4. П	араме	етры для	а теплового	о расчета	
lication	Input	Devi	ce 1	Thermal	Simulation	Summary	User Guid
		Circuit				Gener	al
	_	o.roun			009		
	dan ba				1.0	Source Voltage (Green),	Load Voltage (Red) (V)
gate 🔎	中子	1: 05	mH		0.8		
,			>		0.6		



Рис. 5. Топология схемы, подготовленной для моделирования



		5	System	Overview				
Input Voltage Actual O Pow		output Swi er Free		tching C quency		eadtime	Efficiency	
—	-		-				-	
Device C	verview (c	ombine	d total	losses of a	ll de	vices of a give	n type)	
		Switc	hing	Conduction	on	Combined Losses	Junction Temperature	
Primary MOSFETs/Modules		-		_			-	
Secondary/Synchronous MOSFETs/Modules		-		-		-	_	
Diodes		-		_			-	
Converter Loss	es							

Simulate Hold result

Simulation Status: Assertion failed in 7at2651d/Assert Range4: Temperature of diode e: Assertion failed in 7at2651d/Assert Range5: Temperature of power semiconductors exc

Рис. 6. Результаты моделирования DC\DC-преобразователя с модулем CAB011M12FM3

Как следует из рис. 6, программа вывела предупреждение о превышении допустимой температуры диодов и транзисторов модуля. Для устранения этой ошибки необходимо вернуться на вкладку **Device** и либо включить несколько модулей CAB011M12FM3 параллелно, либо выбрать другой модуль, как показано на рис. 7.

После замены модуля следует вернуться на вкладку **Simulation** и вновь сделать попытку моделирования. Результаты расчетов и временные диаграммы сигналов в различных точках схемы приведены на рис. 8.

Как следует из рис. 8, при частоте коммутации ключей 200 кГц выходная мощность преобразователя составляет 863 ВТ, а КПД равен 84.8%. Из полученных результатов следует, что на вкладке **Input** в окне **Rated output power S**^o задается не выходная мощность преобразователя, а мощность, потребляемая от источника входного напряжения.

На вкладке **Summary** выводится отчет (рис. 9), который можно распечатать ли сохранить в файле .pdf.

Поскольку программа осуществляет расчеты практически мгновенно, проверим как влияет частота коммутации силовых ключей преобразователя на его КПД.

Для этого на вкладке Input введем значение частоты коммутации равное 20 кГц (рис. 10).

Результаты моделирования при частоте коммутации ключей 20 кГц приведены на рис. 11.

Сопоставляя полученные на рис. 11 и 8 результаты, можно сделать вывод о том, что КПД при снижении частоты коммутации ключй возрастает. При снижении частоты с 200 до 20 кГц КПД с 84.8% вырос до 86.16%, а температура транзисторов модуля снизилась на 15 °C.

Оценим, как влияет топология преобразователя на эффективность его работы. Для этого на вкладке Input выберем синхронный понижающий преобразователь (рис. 12).

Результаты моделирования синхронного понижающего преобразователя на базе модулей CAS120M12BM2 приведен на рис. 13. Как следует из рис. 13, КПД преобразователя вырос до 90.4%, температура транзисторов модулей снизилась до 124 °C. Однако для реализации такого преобразователя потребуется два модуля CAS120M12BM2, что значительно увеличит габариты и стоимость такого преобразователя.

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что использование программы Speed-Fit 2.0 Design Simulator позволяет значительно ускорить выбор параметров силовой части импульсных преобразователей напряжения. Программ удобна в использовании, результаты расчетов формируются очень быстро, что позволяет осуществить моделирование различных конфигураций преобразователей за очень короткое время.



Рис. 7. Замена модуля CAB011M12FM3 на другой рекомендуемый модуль CAS120M12BM2

ЭКиС



Рис. 8. Результаты моделирования с модулем CAS120M12BM2

Circuit	Buck converter
Input voltage	24 V
Output voltage	12 V
Rated power	1.000 kVA
Switching frequency	200 kHz
Deadtime	-
MOSFET	
Second MOSFET (CLLC)	
Diode	
Module	CAS120M12BM2
Second Module (CLLC)	
Turn-on gate resistance	2.500
Turn-off gate resistance	2.500
Combined Primary MOSFET conduction losses	68.08 W
Combined Primary MOSFET switching losses	12.88 W
Combined Primary MOSFET total losses	80.95 W
Combined Secondary/Synchronous MOSFET conduction losses	-
Combined Secondary/Synchronous MOSFET switching losses	-
Combined Secondary/Synchronous MOSFET total losses	-
Combined diode conduction losses	60.02 W
Combined diode switching total losses	0 W
Combined diode losses	60.02 W
Total converter losses	140.98 W
Efficiency	84.83 %
Primary MOSFET junction temperature	185.0 °C
Secondary/Synchronous MOSFET junction temperature	20
Diode junction temperature	178.8 °C

Рис. 9. Отчет о результатах моделирования DC/DC-преобразователя на базе модуля CAS120M12BM2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ





Рис. 10. Изменение частоты коммутации ключей на вкладке Input

		System	n Overview			
Input Voltage Actual O Powe 24 V		utput Switching Frequency		Deadtime	Efficiency	
		863 W	20 kHz		86.16 %	
Device C	verview (c	ombined tota	losses of all	devices of a give	en type)	
		Switching	Conductio	n Combined Losses	Junction Temperature	
Primary MOSFETs/Modules		1.29 W	67.53	W 68.82 W	169.8 °C	
Secondary/Syno MOSFETs/Modu	chronous iles	_			-	
Diodes		0 W	59.75	W 59.75 W	166.4 °C	
Converter Losses				128.57 W		

Simulation Status: Analysis completed.

Рис. 11. Результаты моделирования DC/DC-преобразователя на базе модуля CAS120M12BM2 при частоте коммутации ключей 20 кГц



Рис. 12. Выбор синхронного понижающего преобразователя для моделирования

ЛИТЕРАТУРА

1.https://www.cree.com/news-media/news/article/wolfspeed-launches-the-new-speedfit-online-circuit-simulation-tool-to-help-accelerate-sic-deviceevaluation-and-adoption

2.https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/the-wolfspeed-speedfit-2-0-design-simulator-accelerating-the-sic-design-process



Рис. 13. Результаты моделирования синхронного понижающего преобразователя на базе модулей CAS120M12BM2

3.https://www.wolfspeed.com/power/products/ref erence-designs

4.https://wbs.plexim.com/cree/speedfit_user_man ual.pdf

5. Е. Трудновская Высоковольтные быстродействующие драйверы АО "Ангстрем" серии 1358ЕХ / Силовая электроника, №2, 2021. с. 12-15.

6. Е. Карташев Быстрая разработка устройств на основе SiC с помощью симулятора SpeedFit 2.0 Design Simulator / Силовая электроника, №1, 2021. с. 34-37.

