

## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.314

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)

Дунаев М.П., Довудов С.У.

Иркутский национальный исследовательский технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ

Представленный метод компьютерного моделирования статических и динамических потерь мощности в полупроводниковых диодах и транзисторах позволит с достаточной точностью определить составляющие потерь мощности преобразователя частоты. Цель исследования заключается в разработке компьютерной модели блока расчета потерь мощности силовых ключей преобразователя частоты, которая позволила бы адекватно определить статические и динамические потери мощности в транзисторах и диодах полупроводникового преобразователя *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт. Для анализа полупроводниковых схем выпрямителя и автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в статье применены методы имитационного моделирования в среде *Matlab/Simulink*. Приведены аналитические выражения, описывающие статические и динамические потери мощности в силовых полупроводниковых диодах и транзисторах. Методом полиномиальной аппроксимации силовых характеристик IGBT-транзисторов получены математические выражения, описывающие зависимости  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . На базе полученных выражений в среде *Matlab/Simulink* разработан блок расчета статических и динамических потерь мощности. Разработана компьютерная модель преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* в среде *Matlab/Simulink* с использованием блоков из библиотеки *SimPowerSystem*. С помощью разработанного блока расчета потерь мощности получены зависимости потерь мощности от частоты коммутации и тока нагрузки. Верификация результатов проведена путем сопоставления данных моделирования с данными производителя преобразователя. Представленный метод моделирования статических и динамических потерь мощности применен в инженерных и научных исследованиях при оценке потерь мощности и коэффициента полезного действия преобразователей частоты и других типов полупроводниковых преобразователей. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволил учесть характеристики конкретных диодов и транзисторов.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, статические потери, динамические потери, аппроксимация, характеристика, коэффициент полезного действия.

## ВВЕДЕНИЕ

Преобразование напряжения сети переменного тока с постоянной амплитудой и частотой в переменное напряжение с регулируемыми параметрами амплитуды и частоты может осуществляться с помощью преобразователя частоты, выполненного по схеме со звеном постоянного тока. Такой преобразователь частоты включает в себя входной неуправляемый выпрямитель, на выходе которого имеется сглаживающий фильтр, и автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1-7] на транзисторных модулях IGBT [8-12]. Одним из распространенных преобразователей этого типа является преобразователь частоты *SIEMENS SINAMICS G110*, силовая схема которого представлена на **рис. 1**.

Преобразователь частоты (см. **рис. 1**) питается от сети переменного тока с напряжением  $U_c$  220 В и частотой  $f_c = 50$  Гц. Преобразователь частоты содержит входной неуправляемый мостовой выпрямитель (НВ) на диодах VD7–VD10, сглаживающий фильтр (Ф) на конденсаторе C и трехфазный мостовой АИН на шести IGBT-транзисторах (VT1–VT6), к которым встречно-параллельно подключены диоды обратного тока (VD1–VD6). Нагрузка инвертора ( $R_n$ ,  $L_n$ ) включена в диагональ переменного тока АИН.

Значительная часть потерь, возникающих в ПЧ, возникают в выпрямителе, состоящем из диодов, и в модулях АИН, состоящих из IGBT-транзисторов и подключенных к ним обратных диодов. Потери, которые происходят в конденсаторе фильтра, системе охлаждения и системе управления, в данной статье не рассматриваются.

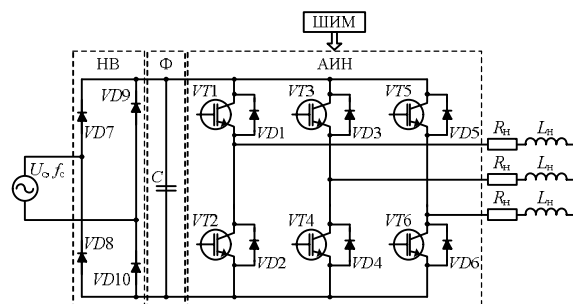


Рис. 1. Силовая схема преобразователя частоты

В ПЧ большой мощности потери, возникающие в неуправляемом выпрямителе и автономном инверторе напряжения, могут быть критическими [13, 14]. В этой статье рассматриваются потери в схемах выпрямителя и инвертора. В настоящее время для этих видов потерь существуют различные способы их точного расчета, но с довольно сложной формулой и сложными параметрами. Следовательно, эти методы расчета нелегко реализовать на практике. В статье методом моделирования определены потери в цепи выпрямителя и в цепи АИН. Достоверность предлагаемого метода моделирования потерь мощности оценивается путем сравнения результатов моделирования преобразователя частоты в среде *Matlab* и данных по потерям, приведенных в документации ПЧ *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт.

Технические данные преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт приведены в **табл. 1**.

В преобразователе частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт в качестве НВ используется модуль *GBPC2508W*, данные которого приведены в **табл. 2**, а в качестве АИН – модуль IGBT-транзисторов с обратными диодами типа *FS15R06XE3*, данные которого приведены в **табл. 3**.

Таблица 1

Основные данные ПЧ G110

Показатель	Технические характеристики
Напряжение сети, В	230
Частота сети, Гц	50
Выходная мощность, кВт	1,5
Мощность потерь, Вт	118
КПД (при частоте ШИМ 8 кГц)	0,927
Частота ШИМ, кГц	Заводская настройка – 8, диапазон регулирования 2 – 16 (с шагом 2кГц)

Таблица 2

Основные данные модуля FS15R06XE3 IGBT-транзисторов и обратных диодов

Параметр	Обозначение	Значение
Максимальное импульсное повторяющееся напряжение, В	$U_{RRM}$	800
Длительный постоянный ток, А	$I_o$	25
Максимальный пиковый неповторяющийся прямой ток за один цикл, А	$I_{FSM}$	400
Максимальное падение напряжения в прямом направлении, В	$U_{FM}$	1,1

Таблица 3

Основные данные модуля FS15R06XE3 IGBT-транзисторов и обратных диодов

Параметр	Условия	Обозначение	Значение
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер, В	При температуре IGBT модуля $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{CES}$	600
Ток коллектора, А	При температуре окружающей среды $T_c=80^{\circ}\text{C}$ , IGBT модуля $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$	$I_{cnom}$	15
Повторяющийся пиковый ток коллектора, А	При длительности импульса $tr = 1\text{ms}$	$I_{CRM}$	30
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{CESat}$	1,55
	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		1,7
	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		1,8
Потери энергии при включении, мДж	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{CE}=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{on}$	0,25
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,32
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,36
Потери энергии при выключении, мДж	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{CE}=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{off}$	0,34
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,44
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,46
Повторяющееся пиковое обратное напряжение в диоде, В	$T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{RRM}$	600
Постоянный прямой ток обратного диода, А		$I_F$	15
Прямое напряжение, В	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_F$	1,60
	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		1,55
	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		1,50
Энергия обратного восстановления диода, мДж	$I_F=15\text{ A}$ , $U_R=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{rec}$	0,16
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,28
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,37

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Потери мощности при коммутации IGBT-транзистора для заданных форм сигналов тока и напряжения разделены на три части, как показано на рис. 2 [15, 16].

Суммарные потери энергии включают в себя статические и коммутационные потери в IGBT-транзисторе и в обратном диоде. Статические потери IGBT-транзисторов и диодов происходят при включенном состоянии. Потери  $P_{cond}$  можно рассчитать как произведение тока коллектора и напряжения коллектора-эмиттера по формуле

$$P_{cond.inv} = \int_{t_2}^{t_3} (U_{ce} (I_c) I_c) \cdot dt, \quad (1)$$

где  $I_c$  – ток коллектора;  $U_{ce}$  – напряжение коллектор-эмиттер.

Статические потери в диодном неуправляемом выпрямителе и в обратном диоде модуля IGBT-транзистора можно рассчитать, используя формулу (1). При включении и выключении диоды также имеют потери [13], которые называют коммутационными. Для диодного неуправляемого выпрямителя вследствие низкой частоты сети коммутационные потери малы и ими можно пренебречь. Потери проводимости в однофазном диодном мостовом неуправляемом выпрямителе в 4 раза превышают потери в одном диоде.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Динамические потери в IGBT-транзисторах происходят при переходе из одного установившегося режима в другой (см. рис. 2), т.е. при переходе от выключенного состояния во включенное и наоборот [17-20]. Потери энергии при переключении устройства могут изменяться в зависимости от тока, напряжения, сопротивления затвора и температуры перехода [21].

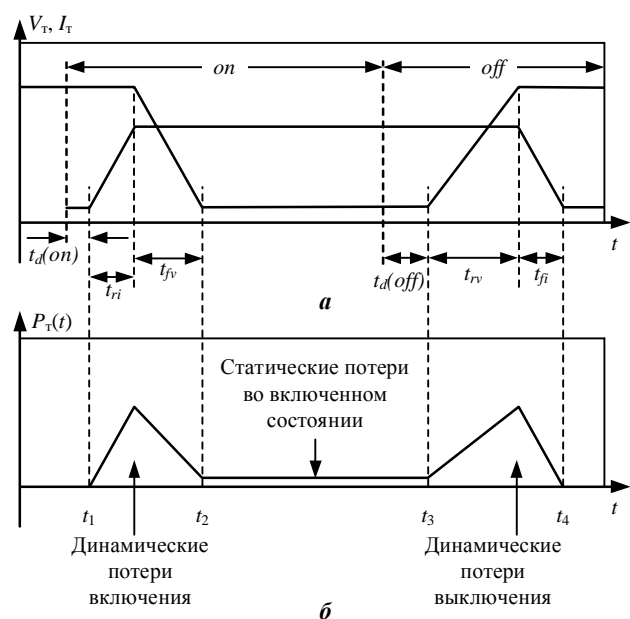


Рис. 2. Процесс коммутации IGBT-транзистора:  $t_1 - t_2$  – интервал включения,  $t_2 - t_3$  – интервал включенного состояния,  $t_3 - t_4$  – интервал выключения

Величина средней мощности коммутационных потерь определяется по формулам

$$P_{sw.inv} = [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] f, \quad (2)$$

или

$$P_{sw.inv} = \int_{t_1}^{t_2} (I_c U_{CE}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (I_c U_{CE}) dt, \quad (3)$$

где  $E_{on}(I_c)$  – энергия при включения, которая зависит от величины тока коллектора;  $E_{off}(I_c)$  – энергия при выключения, которая тоже зависит от значения тока коллектора;  $f$  – частота коммутации.

Суммарные потери в ПЧ можно определить по выражению

$$P_{ПЧ} = P_{con.rec} + P_{con.inv} + P_{SW.inv}, \quad (4)$$

где  $P_{ПЧ}$  – потери мощности в ПЧ;  $P_{con.rec}$  – статические потери мощности в неуправляемом выпрямителе;  $P_{con.inv}$  – статические потери мощности в обратном диоде;  $P_{SW.inv}$  – коммутационные потери мощности в IGBT-транзисторе.

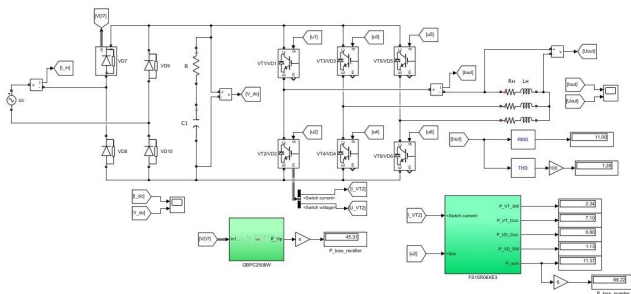
В ПЧ значительный вклад в общие потери вносят коммутационные потери, возникающие в АИН. Чтобы верно оценить коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя частоты и надежность его конструкции, необходимо точно рассчитать коммутационные потери.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ SINAMICS G110

В среде *MatlabR2019a* с использованием блоков из библиотеки *Simulink/Simscape* [4, 12, 22 - 24] смоделирована схема преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт, которая приведена на **рис. 3**.

Модель содержит следующие блоки:

- Блок мостового неуправляемого выпрямителя на диодах *VD7–VD10*, включающий сглаживающий фильтр на конденсаторе *C1*.
- Блок автономного трехфазного мостового инвертора напряжения на шести IGBT/Diode-модулях *VT1(VD1)–VT6(VD6)*.
- Блок расчета потерь в выпрямителе и в инверторе.
- Блок нагрузки.
- Комплект измерительных приборов.



**Рис. 3. Модель преобразователя частоты  
SIEMENS SINAMICS G110**

Методом аппроксимации определены математические функции, наиболее точно описывающие энергетические графики зависимостей  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ , которые приведены на **рис. 4 и 5**.

Используя данный метод расчета, можно определить статические потери в неуправляемом выпрямителе, статические и динамические потери в IGBT-транзисторах и обратных диодах АИН, а также в целом можно количественно оценить КПД преобразователя частоты.

После аппроксимации графиков потерь мощности диодного неуправляемого выпрямителя типа *GBPC2508W* и IGBT-транзисторного модуля типа *FS15R06XE3* получены следующие уравнения:

– Уравнение для диодного неуправляемого выпрямителя типа *GBPC2508W*:

$$U_F(I_F) = 0,0277 \left( \frac{I_F}{100} \right)^5 - 0,2812 \left( \frac{I_F}{100} \right)^4 + 0,9917 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 1,4921 \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 1,6057 \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,6551. \quad (5)$$

– Уравнения для IGBT-транзисторного модуля типа *FS15R06XE3*:

$$U_{CE}(I_C) = -102775 \left( \frac{I_C}{100} \right)^6 + 98467 \left( \frac{I_C}{100} \right)^5 - 36327 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 6505,8 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 - 590,76 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 32,772 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,3152; \quad (6)$$

$$U_F(I_F) = -72672 \left( \frac{I_F}{100} \right)^6 + 71308 \left( \frac{I_F}{100} \right)^5 - 27122 \left( \frac{I_F}{100} \right)^4 + 5045,3 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 481,84 \cdot \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 27,018 \cdot \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,4514; \quad (7)$$

$$E_{on}(I_C) = 4,8894 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 7,928 \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 + 0,0715 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 1,8573 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,0486; \quad (8)$$

$$E_{off}(I_C) = -15,198 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 16,984 \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 - 8,0363 \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 3,6428 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,0456; \quad (9)$$

$$E_{rec}(I_F) = 5,4932 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 5,7025 \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 2,6764 \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,0792. \quad (10)$$

Полученные математические зависимости достаточно точно описывают энергетические графики потерь мощности диодного неуправляемого выпрямителя и IGBT/Diode модулей АИН.

Для расчета статических и динамических потерь мощности IGBT-транзистора используются напряжение и ток транзистора.

На рис. 6 показан блок расчета статических и динамических потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

На рис. 7 показан блок расчета статических и динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

Результаты моделирования статических и динамических потерь показаны на рис. 8 и 9.

Как видно из рис. 9, энергии включения и выключения зависят от величины тока транзистора. Для моделирования динамических потерь необходимо использовать метод моделирования с постоянным шагом расчета [17].

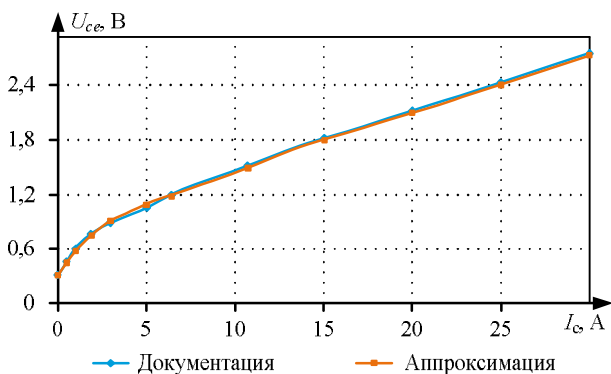


Рис. 4. Напряжение насыщения коллектор-эмиттера силового транзистора типа FS15R06XE3

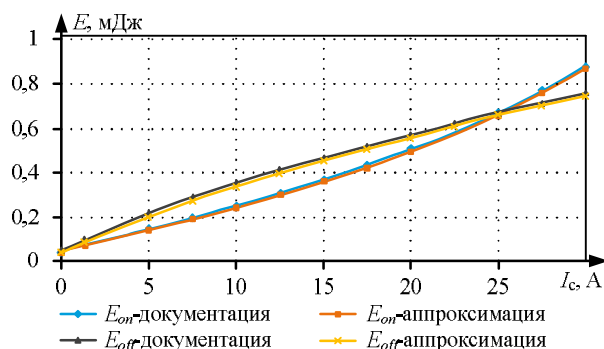


Рис. 5. Энергетические характеристики переключения силового транзистора типа FS15R06XE3

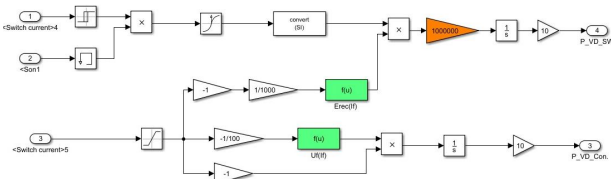


Рис. 6. Блок расчета потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

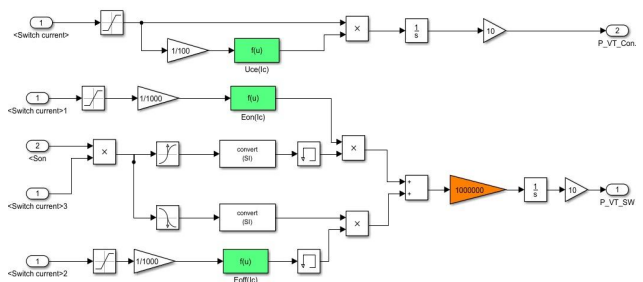


Рис. 7. Блок расчета потерь мощности IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

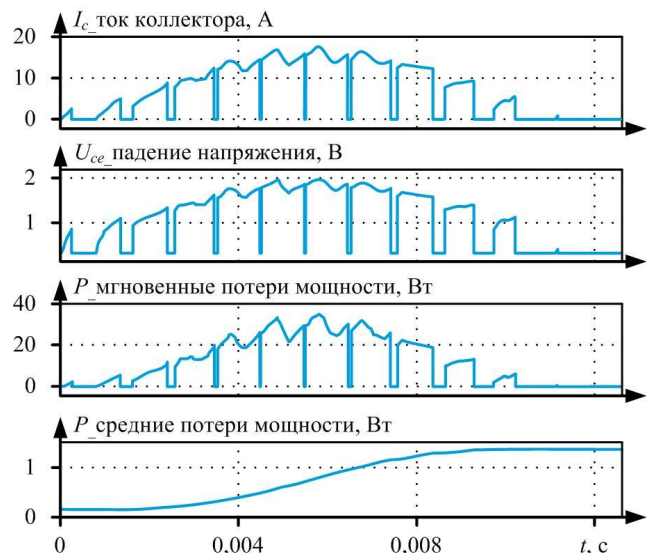


Рис. 8. Результаты моделирования статических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

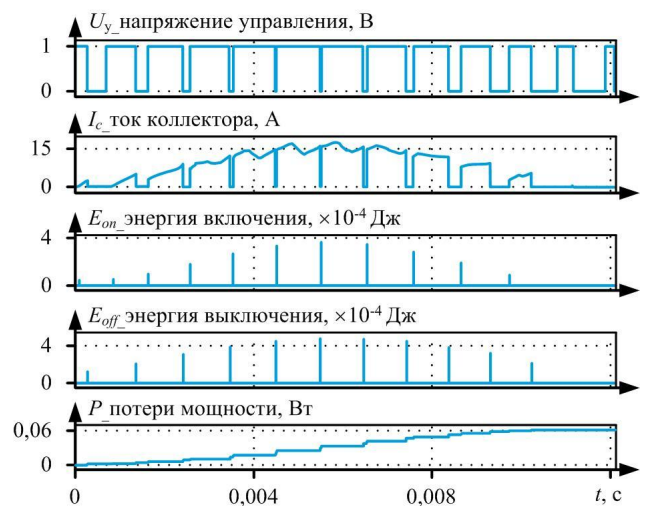


Рис. 9. Результаты моделирования динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

#### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

В табл. 4 приведено сравнение между потерями, полученными при моделировании в Matlab/Simulink, и потерями, приведенными в документации на ПЧ SIEMENS SINAMICS G110 мощностью 1,5 кВт. Погрешность моделирования потерь составляет 3,78 %, что является показателем достаточной адекватности работы модели преобразователя частоты в Matlab/Simulink.

Таблица 4  
Результаты расчета потерь мощности ПЧ  
в *SIEMENS SINAMICS G110*

Параметры	Документация ПЧ	<i>Matlab</i>	Погреш- ность
Суммарные потери в ПЧ	118 Вт	113,53 Вт	3,78 %

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод имитационного моделирования, позволяющий оценить потери мощности в силовых полупроводниковых преобразователях. Разработаны блоки модели, которые рассчитывают потери проводимости в неуправляемом выпрямителе и потери, возникающие в АИН преобразователя частоты. Для расчета потерь мощности методом аппроксимации определены математические уравнения, описывающие энергетические графики зависимостей  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . Полученные математические уравнения достаточно точно описывают графики потерь мощности. Достоверность предлагаемого метода моделирования расчета потерь мощности оценивалась путем сравнения результатов, приведенных в документации преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110*, и моделирования в среде *Matlab*. Данный метод дал погрешность 3,78% относительно данных, заявленных производителем. Представленный метод моделирования статических и динамических потерь мощности применен в инженерных и научных исследованиях при оценке потерь мощности и КПД преобразователей частоты и других типов полупроводниковых преобразователей. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет учесть характеристики конкретных силовых диодов и транзисторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 345-355.
2. Yao Y., Lu D.C., Verstraete D. Power loss modelling of MOSFET inverter for low-power permanent magnet synchronous motor drive // 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). 2013. Pp. 849-854. doi: 10.1109/IFEEC.2013.6687620.
3. Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters // 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). 2015. Pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894.
4. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
5. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems / E. Villanueva, P. Correa, J. Rodriguez, M. Pacas // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. Iss. 11. Pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579.
6. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2003. Pp. 51-57. doi: 10.1109/APEC.2003.1179175.
7. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications / B. Xiao, L. Hang, J. Mei, C. Riley, L.M. Tolbert,

- B. Ozpineci // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 1722-1731. doi: 10.1109/TIA.2014.2354396.
8. Hafezi H., Faranda R. A New Approach for Power Losses Evaluation of IGBT/Diode Module // Electronics. 2021. Vol. 10. No. 280. doi: 10.3390/electronics10030280.
9. <https://mathworks.com/help/physmod/sps/ug/loss-calculation-in-a-three-phase-3-level-inverter.html> (accessed on 23 January 2021).
10. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2016. 116 с.
11. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
12. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. Vol. 2. Iss. 4. Pp. 307-316.
13. Loss calculation of a frequency converter with a fixed-step circuit simulator / L. Aarniovuori, L. Laurila, M. Niemela, J. Pyrhonen // European Conference on Power Electronics and Applications. 2007. Pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2007.4417355.
14. <https://www.semikron.com/service-support/downloads/detail/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00.html> (accessed on 23 January 2021).
15. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss Calculation Methods of Half-Bridge Square-Wave Inverters // Elektronika Ir Elektrotehnika. 2011. Vol. 113. No. 7. Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
16. Ahmed M.M.R., Putrus G.A. A method for predicting IGBT junction temperature under transient condition // 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2008. Pp. 454-459. Doi: 10.1109/IECON.2008.4757996.
17. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics / O.A. Plakhtii, V.P. Nerubatskyi, D.A. Hordiienko, H.A. Khoruzhevskiy // Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.
18. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. No. 2. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ecce-2013-0003.
19. Гуляев А. Визуальное моделирование в среде MatLab. Учебный курс. С.-Петербург; Москва; Харьков; Минск: Питер, 2000. 432 с.
20. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3. С. 144-152.
21. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: тр. Всерос. Науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2019. Т.1. С. 3-6.
22. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
23. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
24. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52. Iss. 2. Pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

Поступила в редакцию 27 марта 2021 г.



# SIMULATION OF POWER LOSSES IN A FREQUENCY INVERTER

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: mdunaev10@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>.

Sarfaro U. Dovudov

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: dsu\_1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>

The presented method of computer modeling of static and dynamic power losses in semiconductor diodes and transistors will make it possible to determine with sufficient accuracy of the components of the power losses of the frequency converter. The purpose of the study is to develop a computer model of the block for calculating the power losses of the power switches of the frequency converter, which would allow us to adequately determine the static and dynamic power losses in the transistors and diodes of the semiconductor converter SIEMENS SINAMICS G110 with a power of 1.5 kW. To carry out the analysis of semiconductor circuits of a rectifier and an autonomous voltage inverter with pulse-width modulation, the article uses simulation methods in the Matlab / Simulink environment. Analytical expressions describing static and dynamic power losses in power semiconductor diodes and transistors are given. Using the method of polynomial approximation of the power characteristics of IGBT transistors, mathematical expressions are obtained that describe the dependences  $V_{se}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . On the basis of the obtained expressions in Matlab / Simulink, a block for calculating static and dynamic power losses has been developed. A computer model of the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter has been developed in the Matlab / Simulink environment using blocks from the SimPowerSystem library. Using the developed block for calculating power losses, the dependences of power losses on the switching frequency and load current are obtained. The results were verified by comparing the simulation data with the manufacturer data. The presented method for modeling static and dynamic power losses is applied in engineering and scientific research in assessing power losses and efficiency of frequency converters and other types of semiconductor converters. The advantage of this method is that it makes it possible to take into account the characteristics of specific diodes and transistors.

**Keywords:** frequency converter, uncontrolled rectifier, autonomous voltage inverter, pulse-width modulation, static losses, dynamic losses, approximation, characteristic, efficiency.

## REFERENCES

- Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355 (In Russian)
- Yao Y., Lu D.C., Verstraete D. Power loss modelling of MOSFET inverter for low-power permanent magnet synchronous motor drive. 1<sup>st</sup> International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). IEEE, 2013. Pp. 849-854. doi: 10.1109/IFEEC.2013.6687620.
- Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters. 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). IEEE, 2015. Pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894.
- Perutka K. MATLAB for Engineers. Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics. InTechOpen, 2011. 512 p.
- Villanueva E., Correa P., Rodriguez J., Pacas M. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. Iss. 11. Pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579.
- Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter. Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2003. Pp. 51-57. doi: 10.1109/APEC.2003.1179175.
- Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L.M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter with Distributed MPPT for Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 1722-1731. doi: 10.1109/TIA.2014.2354396.
- Hafezi H., Faranda R. A New Approach for Power Losses Evaluation of IGBT/Diode Module. *Electronics*. 2021. Vol. 10. No. 280. doi: 10.3390/electronics10030280.
- Loss Calculation in a Three-Phase 3-Level Inverter. Available at: <https://mathworks.com/help/physmod/sps/ug/loss-calculation-in-a-three-phase-3-level-inverter.html> (accessed on 23 January 2021).
- Dunayev M.P. *Silovyye elektronnyye preobrazovateli v elektrostantsiy* [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 116 p. (In Russian)
- Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovyye polnostyu upravlyayemye poluprovodnikovyye preobrazovateli* [Power turn-off semiconductor converters]. Saint Petersburg, Elektrosila Publ., 2003. 172 p. (In Russian)
- Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads. *Armenian Journal of Physics*. 2009. Vol. 2. Iss. 4. Pp. 307-316.
- Aarniovuori L., Laurila L., Niemela M., Pyrhonen J. Loss calculation of a frequency converter with a fixed-step circuit simulator. *European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2007. Pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2007.4417355.
- Semikron. Available at: <https://www.semikron.com/service-support/downloads/detail/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00.html> (accessed on 23 January 2021).
- Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss Calculation Methods of Half-Bridge Square-Wave Inverters. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2011. Vol. 113. No. 7. Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
- Ahmed M.M.R., Putrus G.A. A method for predicting IGBT junction temperature under transient condition // 34<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. IEEE, 2008. Pp. 454-459. doi: 10.1109/IECON.2008.4757996.
- Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordienko D.A., Khoruzhevskyi H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.

18. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2013. No. 2. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ecce-2013-0003.
19. Gulyayev A. *Vizualnoye modelirovaniye v srede MatLab* [Visual modeling in MatLab]. St. Petersburg, Moscow-Kharkov-Minsk, 2000. 432 p. (In Russian)
20. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of frequency-pulse converter circuit. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management]. 2019. No. 3(15). Pp. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13. (In Russian)
21. Dunaev MP, Dovudov SU. Modeling a Pulse-Width Converter Circuit. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyakh Sibiri: Trudy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia. Proceedings of All-Russian practical and scientific conference]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2019, vol. 1, pp. 3-6. (In Russian)
22. Dyakonov V.P. *MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera* [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. M.: DMK Press, 2011. 976 p. (In Russian)
23. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
24. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. Iss. 2. Pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 45-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)

Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of Power Losses in a Frequency Inverter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)