

В. И. Дягилев, канд. техн. наук, доц., dvi-39@mail.ru,

В. А. Коковин, канд. техн. наук, доц., kokovin@uni-protvino.ru,

Государственный университет "Дубна", филиал "Протвино", г. Протвино, Московская область,

С. У. Увайсов, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научной работе, s.uvaysov@hse.ru,

С. С. Увайсова, аспирант, uvay@yandex.ru,

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ,

Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики, г. Москва

Компьютерное моделирование работы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением

Предложена математическая модель схемы силового преобразователя (СП) с выходным высокочастотным синусоидальным напряжением для питания пьезоэлектрических излучателей. Эти излучатели могут быть использованы в различных технологических установках.

На основе модели выполнены исследования, которые позволили сформулировать рекомендации для выбора параметров схемы преобразователя с индуктивно-емкостным фильтром.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, силовой преобразователь, математическая модель, методика расчета

Введение

Известно [1], что для многих технологических операций, таких как ультразвуковая мойка, очистка, сварка, резание и т. п., применяют пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи электрических колебаний в механические. Используемые для возбуждения таких преобразователей генераторы тока высокой частоты имеют, как правило, на выходе прямоугольное биполярное напряжение, которое с помощью фильтра первой гармоники преобразуется в синусоидальное [2]. Современные генераторы работают по принципу транзисторных инверторов — преобразователей постоянного напряжения в переменное [3], и электрические процессы в них достаточно сложны. В этом случае компьютерное моделирование упрощает задачу выбора компонентов этих генераторов при оптимизации системы генератор—нагрузка.

При разработке математической модели были учтены два условия: во-первых, реальные свойства всех компонентов схемы СП, во-вторых, особенности работы колебательного контура в резонансном режиме СП и нагрузки. При создании модели для выполнения первого условия были выбраны реальные мощные силовые ключи, а именно полевые MOSFET-транзисторы, а не их виртуальные модели. Кроме того, были учтены значения паразитных сопротивлений и индуктивностей источника питания, дросселя и выходного трансформатора. Выполнение второго условия позволяет оценить качество синусоиды выходного напряжения СП, а также получить расчетные формулы для опреде-

ления параметров силовых реактивных элементов — дросселя и конденсатора колебательного контура.

Проведенные на ЭВМ исследования предложенной модели показали, что существуют определенные трудности при расчете даже схемы замещения СП рассматриваемого типа ввиду нелинейности происходящих в нем процессов при переменной нагрузке. В предложенной работе показаны два пути преодоления таких проблем с использованием компьютерного моделирования и приведен пример расчета схемы СП для питания мощного пьезоэлектрического излучателя в режиме резонанса.

Разработка схемы замещения генератора

В общем случае силовой преобразователь состоит из источника переменного напряжения (промышленная сеть) и выпрямителя со сглаживающим фильтром. Для получения переменного напряжения с частотой, отличной от частоты промышленной сети, необходимо использовать инвертор (транзисторный или тиристорный) [4]. Как правило, современные СП средней мощности выполняют на транзисторах. При такой конфигурации СП в нагрузке при перекрестной коммутации двух пар транзисторов протекает переменный и прямоугольный по форме ток, равный $J_{\text{н}} = E/R_{\text{н}}$, где E — напряжение источника питания; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки. Для правильного функционирования схемы необходимо выполнение следующих двух условий:

$$J_{\text{кл}} < J_{\text{доп}}; \quad (1)$$

$$t_{\text{вкл}} < T/2, \quad (2)$$

где $J_{\text{кл}}$ — ток через ключ; $J_{\text{доп}}$ — максимальный допустимый ток через транзистор; $t_{\text{вкл}}$ — включенное

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422).

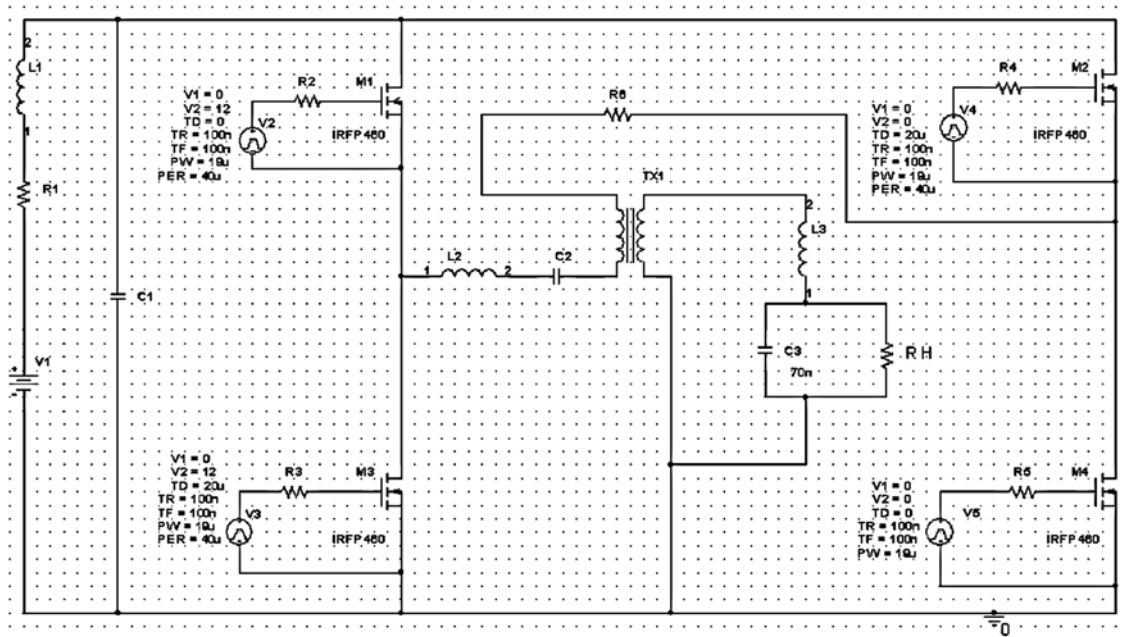


Рис. 1. Схема замещения СП

состояние транзистора; T — период отпирания двух пар транзисторов.

Для получения на выходе СП синусоидального напряжения необходимо дополнительно включить фильтр первой гармоники прямоугольного напряжения. Он представляет собой последовательный (или последовательно-параллельный) колебательный контур LC , настроенный в резонанс с первой гармоникой выходного напряжения [5]. Для выбора значений индуктивности дросселя L и емкости конденсатора C можно воспользоваться известными соотношениями [6], приведенными ниже.

Условие резонанса в цепи с колебательным контуром имеет следующий вид:

$$\omega_0^2 LC = 1, \quad (3)$$

где L и C — параметры колебательного контура; $\omega_0 = 2\pi f_0$ — круговая частота выходного напряжения; f_0 — частота требуемых колебаний рабочего органа технологической установки, $f_0 = 1/T_0 = 1/2t_{и}$, здесь $t_{и}$ — длительность импульса тока через транзистор; T_0 — период выходного синусоидального напряжения СП.

В этом случае можно записать

$$t_{и} < 1/\pi\sqrt{LC}. \quad (4)$$

Из этого выражения можно определить один из двух параметров колебательного контура (L или C). Для определения другого параметра воспользуемся выражением для волнового сопротивления контура

$$Z_B = \sqrt{L/C}. \quad (5)$$

Для нахождения значений L и C примем допущения [7], что

$$R_H = 1/\omega_0 C = \omega_0 L = Z_B. \quad (6)$$

Проверим правильность такого выбора с помощью исследования схемы замещения транзисторного генератора (рис. 1), входящего в состав СП, методом моделирования на ЭВМ.

Схема содержит: источник питания $V1$ с внутренними параметрами (сопротивлением $R1$ и индуктивностью $L1$); конденсатор фильтра $C1$; четыре мощных силовых транзистора $M1$ – $M4$ (MOSFET типа IRFP460) с цепями управления $V2$ – $V5$ и резисторами $R2$ – $R5$; цепь нагрузки, состоящую из колебательного контура (дроссель $L2$, резистор R_H и конденсатор $C3$) и выходного согласующего трансформатора $TX1$. Первичная обмотка трансформатора подключена через токоограничивающий последовательный конденсатор $C2$, индуктивность рассеивания $L2$ и активное сопротивление $R6$ в диагональ переменного тока транзисторного моста $M1$ – $M4$. Нагрузка R_H зашунтирована резонансным конденсатором $C3$. Этот контур подключен ко вторичной обмотке трансформатора $TX1$, с тем чтобы получить необходимое значение выходного напряжения. Такая схема позволяет работать СП в условиях большого диапазона изменения сопротивления нагрузки [8].

Моделирование схемы замещения генератора

Выберем для моделирования схемы значение $R_H = 100$ Ом, $f_0 = 25$ кГц, исходя из этого, с учетом допущения (6) рассчитаем $L3$ и $C2$: $L3 = R_H/(2\pi f_0) = 400$ мкГн. Соответственно, $C2 = 1/(R_H 2\pi f_0) = 40$ нФ.

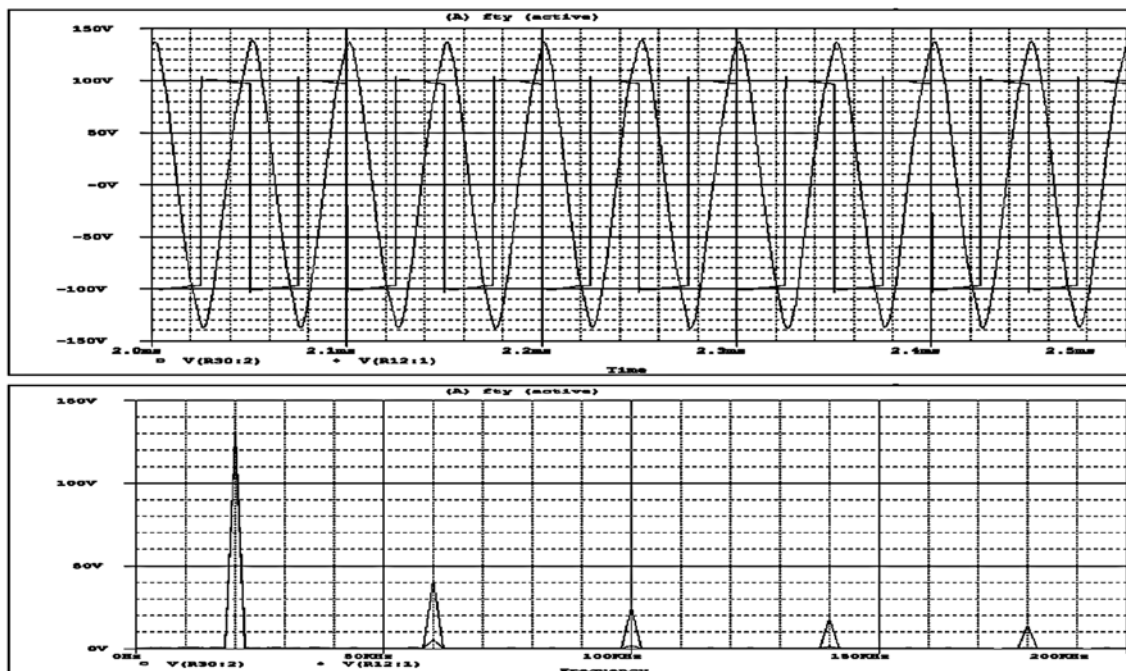


Рис. 2. Временные диаграммы на входе и выходе колебательного контура ($U_k(t)$ и $U_n(t)$ соответственно) — верхний рисунок; результат разложения прямоугольного напряжения в ряд Фурье. Нижняя кривая: ось ординат — напряжение в вольтах, ось абсцисс — частота в килогерцах. Верхняя кривая: ось ординат — напряжение в вольтах, ось абсцисс — время в микросекундах

На рис. 2 приведены временные зависимости $U_k(t)$ (U_k — входное напряжение колебательного контура $C3$ и $L3$). Первая кривая — это прямоугольное напряжение частотой 25 кГц с амплитудой, равной напряжению, питающему транзисторный мост ($M1-M4$). В нашем случае это значение равно 100 В. Вторая кривая — синусоидальное напряжение на выходе колебательного контура $U_n(t)$, и его амплитуда равна 135 В. Для получения первой (основной) гармоники используем разложение прямоугольного напряжения в ряд Фурье. Ее амплитуда равна 130 В (рис. 2). Примерное равенство этих амплитуд (не равны вследствие неидеальности дросселя $L3$) позволяет сделать заключение, что допущение (6) весьма удобно для расчетов параметров схемы генератора тока высокой частоты (ГТВЧ) в составе СП.

Решая (4), (5) и (6), найдем значение L и C :

$$L = t_n Z_B / \pi; C = t_n / \pi Z_B. \quad (7)$$

Теперь остается определить значение Z_B . Для этого необходимо найти коэффициент нагрузки K_H , равный соотношению значения сопротивления нагрузки R_H со значением волнового сопротивления Z_B :

$$K_H = R_H / Z_B. \quad (8)$$

Сопротивление нагрузки определяется заданными значениями (из технического задания) выходного напряжения U_H и мощностью в нагрузке P_H :

$$R_H = U_H^2 / P_H. \quad (9)$$

Чтобы определить K_H , необходимо знать зависимость $U_H(R_H)$. Эта зависимость не имеет аналитического выражения, так как определяется многими факторами: активным сопротивлением дросселя, внутренними параметрами источника питания, параметрами силовых транзисторов и т. д. Методом моделирования на ЭВМ [9] схемы замещения (см. рис. 1) можно получить зависимости $U_H(R_H)$ при различных значениях частот и параметров колебательного контура. Далее рассматривается ход таких исследований.

Для удобства проведения расчетов и построения универсальных характеристик воспользуемся способом расчета параметров СП, при котором значения величин (сопротивлений, напряжений, тока, т. д.) выражаются как множители определенной базовой величины, принятой за единицу. По такой методике принимается $U_H^* = U_H / E$. Здесь U_H^* — относительное значение напряжения на нагрузке (безразмерная величина).

Исследование на математической модели проводили таким образом, чтобы обеспечить инвариантность результатов. То есть необходимо доказать, что в относительных единицах кривая зависимостей $U_H(R_H)$ представляется как зависимость $U_H^*(K_H)$. Для определения параметров колебательного контура L и C необходимо построить зависимость $U_H^*(K_H)$, которая должна быть одинаковой для различных реальных значений сопротивлений нагрузки, выходных частот и питающих напряжений в относительных единицах. Расчет параметров схемы в относительных единицах позволяет получить ко-

Таблица 1

$E, В$	$R_H, Ом$	$Z_B, Ом$	$f, кГц$
100	1...1600	200	25
	1...800	100	
	1...400	50	
	1...200	25	
	1...80	10	

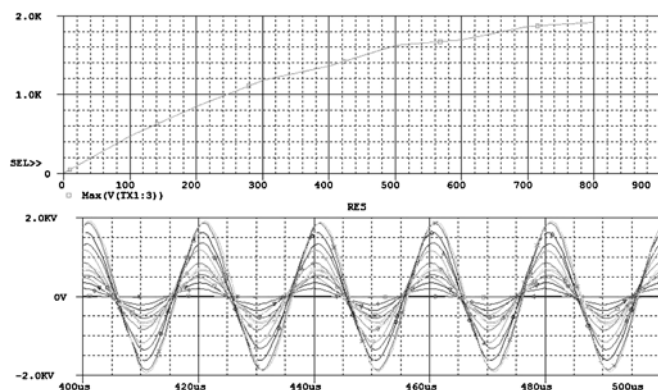


Рис. 3. Временные $U_H(t)$ (нижние) и параметрическая $U_{HM}(R_H)$ зависимости. Нижняя кривая: ось ординат — напряжение в вольтах, ось абсцисс — время в микросекундах. Верхняя кривая: ось ординат — напряжение в киловольтах, ось абсцисс — сопротивление в омах

Таблица 2

$Z_B, Ом$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$R_H, Ом$	1	100	200	300	400	500	600	700	800
K_H	0,01	1	2	3	4	5	6	7	8

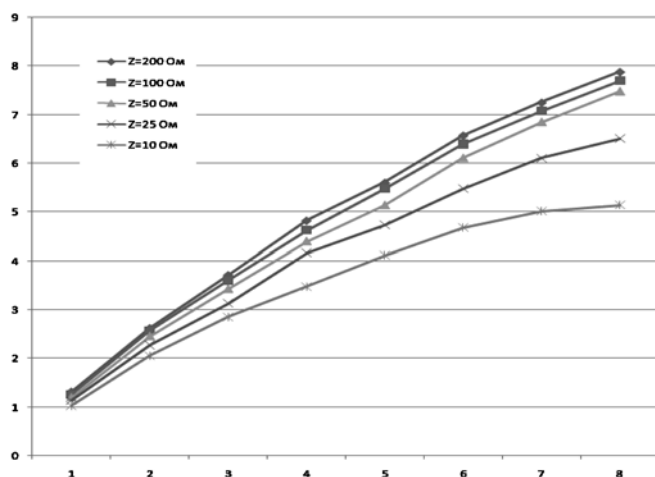


Рис. 4. Семейство параметрических зависимостей $U_{HM}^*(K_H)$ напряжения на нагрузке генератора с выходным колебательным контуром. По оси ординат откладывается напряжение U_{HM}^* в относительных единицах, а по оси абсцисс — значение K_H в относительных единицах

нечный результат для любых заданных параметров. Используя выражения (1–7) и воспользовавшись моделированием схемы замещения (см. рис. 1), можно получить зависимость $U_H^*(K_H)$.

Для демонстрации методики определения значений компонентов СП зададим диапазоны численных значений R_H при фиксированных значениях $E = 100 В$ и частоты генерации выходного напряжения $f = 25 кГц$. Зададим различные значения Z_B , которым соответствуют выбранные диапазоны значений R_H . Интервал значений изменяемости R_H определяется желаемой точностью построения кривой. Определенные значения представлены в табл. 1.

В процессе моделирования основное внимание было уделено построению параметрических зависимостей реальных значений $U_{HM}(R_H)$, $J_{BX}(R_H)$, $J_C(R_H)$ (где U_{HM} — амплитуда напряжения на нагрузке; J_{BX} — ток от источника питания, J_C — ток через конденсатор колебательного контура), при этом временные зависимости (рис. 3) использовали только для идентификации гармонических процессов.

В табл. 2 приведены данные одного из многих опытов при моделировании. Кроме того, в этой таблице рассчитан K_H для построения семейства кривых зависимостей $U_{HM}^*(K_H)$. Методика проведения опытов такова:

- задаем значение $Z_B = 100 Ом$;
- меняем нагрузочное сопротивление от 1 до 800 Ом;
- получаем временные и параметрические зависимости токов, напряжений и мощностей (см. рис. 3).

Ввиду большого объема экспериментального материала приведены только конечные результаты (рис. 4). На этом рисунке приведено семейство параметрических зависимостей $U_{HM}^*(K_H)$ напряжения на нагрузке генератора с выходным колебательным контуром. Кривые построены для различных значений волновых сопротивлений этого контура ($Z_B = 10...200 Ом$).

Анализ результатов исследования

Анализируя семейство кривых на рис. 4, можно сделать следующие замечания: кривые не совпадают и критерием различия является значение волнового сопротивления. Объяснить это явление можно следующими выводами:

- напряжение на резонансном конденсаторе $C3$ снижается при уменьшении шунтирующего сопротивления нагрузки;
- для различных значений Z_B значения $L3$ и $C3$ также различны;
- чем больше емкость $C3$, тем больше ток через нее, он создает дополнительные потери в элементах схемы генератора, особенно в транзисторах моста.

Для подтверждения этих выводов и в целях решения поставленной задачи (построить парамет-

Таблица 3

№	E , В	f , кГц	Z_B , Ом	J_{BX} , А	J_T , А	J_{C3} , А	P_{BX} , Вт	P_H , Вт
1	100	5	25	11,5	—	28,0	1100	1080
2	100	5	50	8,2	—	10,6	700	650
3	100	5	100	4,0	—	5,6	340	360
4	100	5	200	3,1	—	4,0	160	190
5	50	50	25	—	11,7	—	—	—
6	100	50	25	—	23,0	—	—	—
7	200	50	25	—	46,0	—	—	—

рическую зависимость $U_{HM}^*(K_H)$, одинаковую для различных реальных значений сопротивлений нагрузки, выходных частот и питающих напряжений (в относительных единицах) проведем расширенный эксперимент на математической модели. При его проведении фиксировали значения входного тока генератора (ток источника питания $J_{BX} = P_{BX}/E$, где P_{BX} — мощность источника питания) и амплитуды тока конденсатора колебательного контура J_{C3} , а также значения мощностей — входной P_{BX} и в нагрузке P_H при формировании выходного сигнала. Для выходного напряжения были заданы две частоты — 5 и 50 кГц. С уменьшением значения волнового сопротивления Z_B ток J_{C3} резко возрастает. Результаты измерений подтверждают сказанное и приведены в табл. 3. Данные приведены для случая, когда $K_H = 7$ (в табл. 3 J_T — ток силовых транзисторов).

Методика расчета генератора

С учетом разобшенности нагрузочных характеристик $U_H^*(K_H)$ предлагается следующая методика расчета СП. Пусть задано E , P_{HM} , U_{HM} , f (дополнительный индекс "м" у переменных P_H , U_H означает их амплитудное значение).

1. Для выполнения расчетов выберем кривую из семейства $U_H^*(K_H)$, построенную для контура с волновым сопротивлением, такую, где значение нагрузки (по заданию) и волнового сопротивления наиболее близки, например $Z_B = 100$ Ом (см. рис. 3).

2. Установим на ней для заданного значения E точку, соответствующую по ординате значению U_H^* .

3. Соответствующая ей абсцисса даст значение K_H .

4. Определим значение $R_H = K_H Z_B$.

5. Если найденное значение R_H не совпадает с заданным значением, т. е. $R_H \neq (U_{HM}^*/P_{HM})$, то для повышения или понижения напряжения на нагрузке необходимо использовать согласующий трансформатор, коэффициент трансформации которого $k = w_1/w_2$, w_1 , w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

6. Известно [2], что приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки $R'_H = k^2 \cdot R_H$. Согласно принятому нами выше допущению (6) R'_H должно быть равно Z_B . Тогда $k = \sqrt{R'_H/R_H}$. Далее по известной методике расчета трансформатора [2] находим значения w_1 и w_2 .

7. После определения числа витков трансформатора, зная первичное напряжение (из характеристики рис. 4), определяем токи в обмотках. Это позволяет выполнить расчет трансформатора.

Приведенная методика дает возможность сделать выбор компонентов СП.

Рассмотрим расчет генератора СП с числовыми значениями параметров. Пусть задано: $E = 100$ В, $P_{HM} = 500$ Вт, $U_{HM} = 500$ В, $f = 20$ кГц, $w_1 = 100$ витков. Необходимо определить токи и напряжения на элементах мостовой схемы СП и значения индуктивности дросселя L и емкости конденсатора C выходного фильтра. Далее выполним пошаговый расчет СП.

1. Построим кривую $U_H^*(K_H)$ для $Z_B = 100$ Ом.

2. Определим $U_{HM}^* = U_{HM}/E = 500/100 = 5$.

3. Используя построенную кривую зависимости $U_H^*(K_H)$, определяем $K_H = 4,25$.

4. Определим $R_H = K_H Z_B = 425$ Ом.

5. Определим коэффициент трансформации k согласующего трансформатора, используя формулу

$$k = \sqrt{R'_H/R_H} = 0,485.$$

6. По известным значениям w_1 и k получаем $w_2 = w_1/k = 100/0,485 = 235$ витков.

7. Для определения токов и напряжений можно в схему замещения (модель) схемы СП подставить полученные значения и смоделировать на ЭВМ.

Проверить правильность расчета можно с помощью эксперимента на физической модели или на ЭВМ.

Следует заметить, что имеется другой путь расчета параметров ГТВЧ для СП. Если сопротивление его нагрузки не равно волновому сопротивлению колебательного контура (принятому нами в примере $Z_B = 100$ Ом, см. рис. 4), то можно сделать расчет следующим образом. Выбираем $Z_B = R_H$ и делаем расчет на ЭВМ по указанной в данной работе методике. В этом случае не потребуется использовать согласующий выходной трансформатор для подключения нагрузки генератора.

Заключение

Разработана методика компьютерного моделирования генераторов СП, в составе которых имеются сложные резонансные схемы. На основе результатов моделирования предложена методика расчета таких генераторов и даны рекомендации по использованию параметрических зависимостей напряжения на нагрузке генератора с выходным колебательным контуром.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422).

Список литературы

1. Гершгал Д. А., Фридман В. М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, 1976. 319 с.
2. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1992. 296 с.
3. Дягилев В. И., Коквин В. А., Увайсов С. У. Исследование схемы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением для ВИЭ // Материалы Международной науч.-практ. конф. "Инновационные информационные технологии". Т. 2., М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2013. С. 99—106.
4. Беркович Е. И., Ивенский Г. В., Иоффе Ю. С. и др. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электро-технологических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
5. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001. 912 p.
6. Петрухин Г. Д., Волощенко Ю. И., Никитина И. Н. Основы радиоэлектроники. М.: Изд-во МАИ, 1993. 415 с.
7. Дягилев В. И. Транзисторные генераторы тока высокой частоты для электротехнологий. Дубна: Лика, 2011. 67 с.
8. Diagilev V. I., Kokovin V. A., Uvaysov S. U. Designing a power converter with an adaptive control system for ultrasonic processing units // Lecture Notes in Control and Information Sciences. T. 22. Springer, 2015. P. 39—47.
9. Verdieri F., Bacha S., Gerbaud L. Automatic modelling of static converter averaged models. Toulouse. EPE, 2003. P. 1—9.

V. I. Diagilev, Associate Professor, dvi-39@mail.ru,

V. A. Kokovin, Associate Professor, kokovin@uni-protvino.ru

The Public Institution of Higher Education of Moscow Region the Dubna State University,
branch "Protvino", Protvino, Russia,

S. U. Uvaysov, Professor, National Research University

The Higher School of Economics, s.uvaysov@hse.ru, Moscow, Russia,

S. S. Uvaysova, Graduate Student, National Research University

The Higher School of Economics, uvay@yandex.ru, Moscow, Russia

Computer Simulation of the Power Converter with Harmonic wave Output

This paper presents mathematical model of power converter (PC) circuit with output high-frequency sinusoidal voltage for in-feeding the piezoelectric transducers. These transducers can be used in various technological installations. To develop the model we took into account two aspects: the real schema attributes of power converter and peculiar properties of the oscillation circuit in a resonant mode and at load.

The real powerful power switches were chosen, named field MOSFET — transistors, rather than virtual model. Moreover, we also took into account the values of parasitic resistances and inductances of the power source, the output transformer and inductor. The implementation of second aspect gives an opportunity to assess the sine wave quality of PC output voltage, as well as get formulas for calculating the parameters of reactive power elements — inductor and a capacitor oscillation circuit.

The research of the proposed model showed that there are certain difficulties in calculating the PC equivalent circuit. The difficulties are because of the nonlinearity of the processes occurring in PC at variable load. The paper shows two approaches to solve these problems with the use of computer modeling. The example of PC scheme calculating for in-feeding the powerful piezoelectric transducers in resonant mode is also shown.

The research was based on proposed model. That allowed formulate recommendations for selection the converter circuit parameters with LC filters.

Keywords: computer modelling, the power converter, mathematical model, calculation procedure

References

1. Gershal D. A., Fridman V. M. *Ul'trazvukovaya tehnologicheskaya apparatura*, Moscow, Jenergija, 1976, 319 p.
2. Rozanov Ju. K. *Osnovy silovoj jelektroniki*, Moscow, Jenergoatomizdat, 1992, 296 p.
3. Djagilev V. I., Kokovin V. A., Uvajsov S. U. Issledovanie shemy silovogo preobrazovatelja s vyhodnym sinusoidal'nym naprjazheniem dlja VIJe, *Materialy mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., Innovacionnye informacionnye tehnologii*, T. 2, Moscow, NIU CShJe, 2013, pp. 99—106.
4. Berkovich E. I., Ivenskij G. V., Ioffe Ju. S. i dr. *Tiristomye preobrazovateli povyshennoi chastoty dlja jelektrotehnologicheskikh ustanovok*, Leningrad, Jenergoatomizdat, 1983, 208 p.
5. Erickson R. W. *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001, 912 p.
6. Petruhin G. D., Voloshhenko Ju. I., Nikitina I. N. *Osnovy radiojelektroniki*, Moscow, MAI, 1993, 415 p.
7. Dyagilev V. I. *Tranzistornye generatory toka vysokoj chastoty dlja elektrotehnologij* (Transistor high frequency power generators for electric technologies.), Dubna, Lika, 2011, 67.
8. Diagilev V. I., Kokovin V. A., Uvaysov S. U. Designing a power converter with an adaptive control system for ultrasonic processing units, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer, 2015, T. 22, pp. 39—47.
9. Verdieri F., Bacha S., Gerbaud L. Automatic modelling of static converter averaged models, Toulouse, EPE, 2003, pp. 1—9.