

УДК 621.389

А.А. Собко

Усовершенствование реверсивного преобразователя с дополнительным ключом управления средней мощностью элемента Пельтье

Проведен анализ влияния силовых цепей питания элемента Пельтье (ЭП) на слаботочные цепи управления реверсивного преобразователя с дополнительным ключом управления средней мощностью элемента Пельтье. Преобразователь предназначен для системы контроля температуры внешней поверхности испытательного контейнера климатической экранированной камеры. Выполнено его усовершенствование, позволившее увеличить максимальную мощность на ЭП, снизить потери и уменьшить габариты устройства.

Ключевые слова: ЭМС, мостовая схема, реверсивный преобразователь, элемент Пельтье.

Термоэлектрические элементы на основе эффекта Пельтье (ЭП) применяются достаточно широко, в особенности при терморегулировании систем на кристалле [1], мощных полупроводниковых лазеров [2–4] и перестраиваемых СВЧ-генераторов [5]. Также известен специальный терморегулятор на ЭП, позволивший исследовать оптические эффекты в кристаллах при поддержании их стабильной заданной температуры [6].

В работе [7] описаны разработка методики управления группой ЭП и алгоритм контроля температуры, обеспечивающие распределённое управление группой ЭП с поддержкой многофазного режима работы, и создан реверсивный преобразователь для электропитания ЭП с управлением посредством одного ШИМ-сигнала и сигнала реверса. Показана разработанная печатная плата и указано, что трассировка цепей питания и управляющих цепей проведена с учетом требований электромагнитной совместимости (ЭМС). В частности, устранены лицевые связи управляющих и силовых цепей на большой протяженности, а пересечения трасс на разных слоях печатной платы реализованы под углом 90°. Однако не приведено расчётов взаимовлияний силовых и управляющих цепей. Также показано, что разработанный реверсивный преобразователь обеспечивает мощность на ЭП до 91 Вт, с управлением средней мощностью одним ШИМ-сигналом и КПД 81,8%. Однако указано что суммарные потери мощности в транзисторах составляют 6,63 Вт.

Цель работы – провести оценку влияния силовых цепей питания ЭП на слаботочные цепи управления в реверсивном преобразователе и усовершенствовать реверсивный преобразователь с дополнительным ключом управления средней мощностью ЭП.

Исходная схема

Разработанный реверсивный преобразователь (рис. 1) отличается тем, что две пары активных ключевых элементов (АЭ) АЭ1–АЭ4 соединены относительно источника электропитания последовательно с ключевым элементом АЭ5 и позволяют управлять направлением тока через ЭП и средней мощностью, используя один сигнал реверса (1 или 0) и один ШИМ-сигнал.

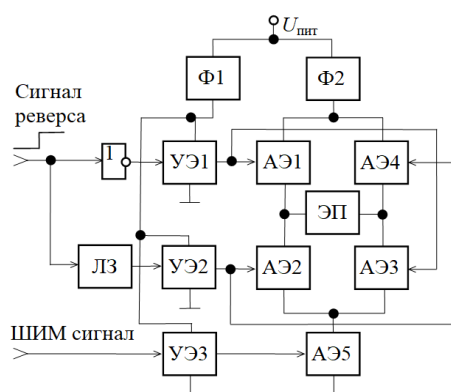


Рис. 1. Структурная схема реверсивного преобразователя для электропитания ЭП

Таким образом, как наиболее критичную управляющую цепь можно выделить именно ШИМ-сигнал, так как управление реверсом осуществляется сменой логического уровня (1 или 0). При этом наиболее критичными силовыми цепями тогда будут являться те цепи, которые проходят наиболее близко к цепи ШИМ.

Влияние силовых цепей на управляющие

При анализе топологии ПП реверсивного преобразователя (рис. 2) выявлено, что пересечения проводников на разных слоях ПП при трассировке выполнены оптимально под углом 90°, однако на верхнем слое ПП присутствует протяженный участок слаботочной цепи управления, а именно проводник с управляющим ШИМ-сигналом, проходящий параллельно с проводником силовой цепи питания ЭП, находящимся на нижнем слое ПП, что говорит о возможном влиянии силовой цепи питания на слаботочную цепь управления. Также выявлен протяженный участок нижнего слоя ПП, на котором расположены параллельно друг другу три проводника силовых цепей питания ЭП. Поэтому проведён анализ двух вышеописанных участков ПП на наличие взаимовлияний. При моделировании все полигоны «земли» считались под нулевым потенциалом, а структура рассматривалась как 4 связанные линии.

Поперечное сечение выделенного участка ПП представлено на рис. 3. Длина структуры равна

6,475 мм, толщина диэлектрической подложки с диэлектрической проницаемостью 4,5 (FR-4) составляет 1,6 мм, высота всех проводников равна 35 мкм. На верхнем слое располагается проводник управляющего ШИМ-сигнала шириной $w_2 = 0,5$ мм, на расстоянии $s_1 = 0,21$ мм с левой стороны расположен полигон «земли» шириной $w_1 = 2,5$ мм, а с правой стороны на аналогичном расстоянии s_1 расположен полигон «земли» шириной 8,5 мм.

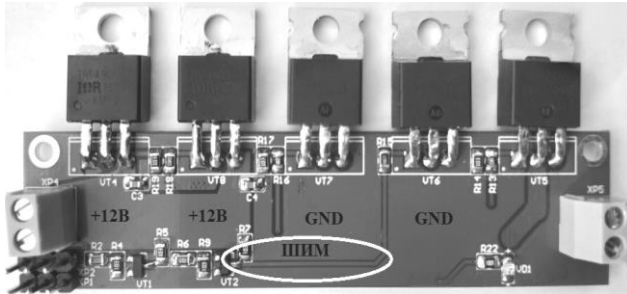


Рис. 2. Печатная плата реверсивного преобразователя

На нижнем слое под проводником управляющего ШИМ-сигнала расположен полигон «земли» шириной $w_6 = 2,235$ мм, по левую сторону от которого на расстоянии $s_2 = 0,5$ мм располагается проводник сильноточной цепи питания ЭП шириной $w_5 = 2,5$ мм, от которого на расстоянии s_2 присутствует полигон «земли» шириной $w_4 = 4$ мм. С правой стороны присутствуют два пассивных проводника шириной $w_7 = 0,5$ мм на расстоянии $s_4 = 0,59$ мм друг от друга, и $s_3 = 0,2$ мм от полигона «земли» шириной $w_9 = 0,33$ мм.

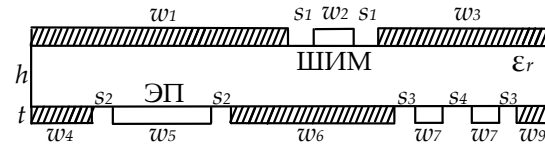


Рис. 3. Поперечное сечение участка ПП, на котором оценивается влияние цепей питания на цепь управления

Вычисление параметров линий и форм сигнала выполнялось в системе TALGAT [8]. Вычислены матрицы погонных параметров C (Ф/м) и L (Гн/м) для расчёта наводок на управляющий проводник:

$$C = \begin{bmatrix} 1,25523e-10 & -9,41955e-13 & -3,5021e-12 & -8,22801e-13 \\ -8,84723e-13 & 1,94966e-10 & -4,67078e-13 & -3,58477e-13 \\ -3,4537e-12 & -5,42821e-13 & 1,1161e-10 & -2,30823e-11 \\ -7,66081e-13 & -3,34269e-13 & -2,23505e-11 & 1,08816e-10 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 3,37444e-07 & 1,42236e-09 & 6,85057e-09 & 3,41771e-09 \\ 1,43754e-09 & 2,54992e-07 & 5,39694e-09 & 4,89673e-09 \\ 6,85893e-09 & 5,38279e-09 & 4,07368e-07 & 9,29999e-08 \\ 3,43112e-09 & 4,8843e-09 & 9,30056e-08 & 4,12854e-07 \end{bmatrix}.$$

В связи с несимметричностью структуры поперечного сечения матрицы погонных параметров из-за вычислительных погрешностей также не симметричны, однако асимметрия невелика. Далее построена принципиальная схема с резисторами 50 Ом (рис. 4), в которой к активному проводнику подключен источник сигнала.

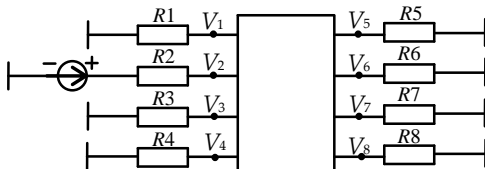


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная участка ПП, на котором оценивается влияние цепей питания на цепь управления

В качестве тестовых сигналов выбраны: импульсный сигнал частотой 245 Гц, имитирующий сигнал в стандартном режиме работы реверсивного преобразователя и коэффициентом заполнения 50%, и электростатические разряды (сверхкороткие импульсы) генераторов импульсов ВАЕ-NLTL (60 кВ) и FPG30-1KM (25 кВ) с оцифрованными версиями, формы сигналов которых реализованы в системе TALGAT. Моделирование показало сигнал наводки на управляющей линии -104 дБ относительно испытательного как при подаче на силовую линию им-

пульса, имитирующего сигнал в стандартном режиме работы реверсивного преобразователя, так и при подаче электростатических разрядов двух видов. Это говорит о пренебрежимо малом влиянии сильноточной цепи питания ЭП на слаботочную цепь управления.

Вторая структура при моделировании рассматривалась как 3 связанные линии. Длина структуры второго участка ПП равна 6,5 мм. На верхнем слое расположен сплошной полигон «земли» шириной $w_1 = 15,25$ мм, на нижнем слое расположены 3 проводника сильноточных цепей питания шириной $w_2 = 2,5$ мм, проходящих параллельно друг другу на расстоянии $s_2 = 0,8$ мм и $s_3 = 0,95$ мм друг от друга (рис. 5). По краям нижнего слоя расположены полигоны «земли», имеющие ширину $w_2 = 2,5$ мм.

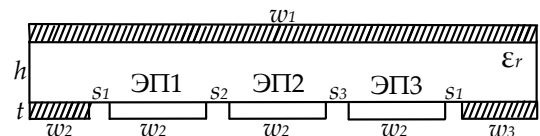


Рис. 5. Поперечное сечение участка ПП, на котором оценивается взаимовлияние сильноточных цепей питания

Проведён анализ взаимовлияний сильноточных цепей питания ЭП друг на друга. Для этого, аналогично первой структуре, создана модель поперечного сечения и вычислены матрицы C и L :

$$C = \begin{bmatrix} 1,93665e-10 & -2,66505e-11 & -7,82226e-13 \\ -2,65302e-11 & 1,80862e-10 & -2,26656e-11 \\ -1,07979e-12 & -2,2836e-11 & 1,87675e-10 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 2,83148e-07 & 7,10401e-08 & 2,02929e-08 \\ 7,10399e-08 & 3,14695e-07 & 6,49152e-08 \\ 2,02919e-08 & 6,49142e-08 & 2,84522e-07 \end{bmatrix}.$$

Построена принципиальная схема участка ПП, и вычислены отклики на пассивных проводниках при подаче сигнала на активный проводник, в качестве активного поочередно выбраны проводники ЭП1–ЭП3.

Моделирование второй структуры показало максимальную наводку на пассивных линиях при подаче на силовую линию ЭП2 импульса, имитирующего сигнал от генератора электростатических импульсов ВАЕ-NLTL (60 кВ). В этом случае отношение амплитуды испытательного сигнала к амплитуде наводок на концах пассивных проводников ЭП1 и ЭП3 составило 64 дБ.

Усовершенствование преобразователя

Так как потери мощности в полевых транзисторах в первую очередь связаны с сопротивлением открытого канала, решено использовать в качестве АЭ1–АЭ4 *n*-канальный транзистор (TPHR9203PL) с меньшим сопротивлением канала (1,1 мОм). Выбор также объясняется конструктивным исполнением транзистора, выполненного в корпусе «SOP Advance», что позволяет значительно снизить массогабаритные показатели усовершенствованного реверсивного преобразователя.

После замены транзисторов проведены моделирование усовершенствованного реверсивного преобразователя в программе LTspice и сравнение его результатов с результатами моделирования исходного реверсивного преобразователя (рис. 6). Частота ШИМ-сигнала выбрана 245 Гц. Усовершенствование схемы позволило увеличить максимальную силу тока через ЭП до 11 А (см. рис. 6, б).

Благодаря описанным изменениям удалось увеличить напряжение и ток на ЭП, что позволило достичь максимальной мощности на ЭП 105,6 Вт при КПД η=80%. Также удалось улучшить форму импульсов тока и напряжения на ЭП благодаря значительному снижению времени нарастания импульса *t_{ф+}* со 180 мкс до 7 мкс, что можно видеть из сравнения импульсов тока исходного и усовершенствованного реверсивных преобразователей (рис. 7).

Заключение

Выполнен анализ реверсивного преобразователя на ЭМС, показавший отсутствие влияния сильноточных цепей питания ЭП на слаботочные управляющие. Проведено усовершенствование реверсивного преобразователя с дополнительным ключом управления средней мощностью ЭП, позволившее повысить максимально возможную мощность на ЭП до 105,6 Вт с КПД 80%, снизить время нарастания импульса в 25 раз и улучшить массогабаритные показатели.

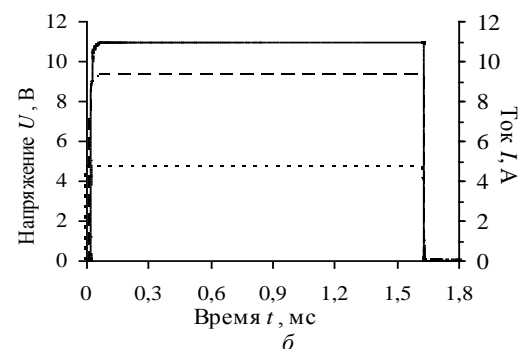
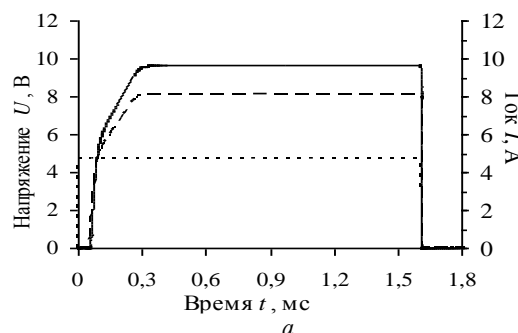


Рис. 6. Результаты моделирования исходного (а) и усовершенствованного (б) реверсивного преобразователя: напряжение (---) и ток (—) ЭП, управляющий ШИМ-сигнал (- - -)

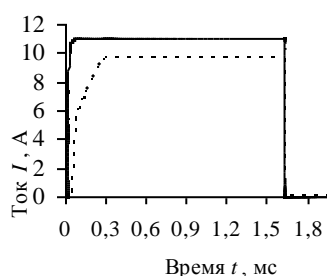


Рис. 7. Сравнение импульсов тока на ЭП для реверсивного преобразователя (- - -) и усовершенствованного реверсивного преобразователя (—)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-79-10162) в ТУСУРе.

Литература

1. Kim S., Lee H., Kim N., Yoo J. A thin film thermoelectric cooler for Chip-on-Board assembly // IEICE Electronics Express. – 2010. – Vol. 7, № 21. – P. 1615–1621.
2. Zou W.D., Ye Q., Xie H.H., Zhao L.Z. LD temperature control based on TMS320F2812 // Infrared and Laser Engineering. – 2008. – Vol. 37, № 4. – P. 642–645.
3. Xie H., Zou W.D., Huang C.H. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier // Chinese

Journal of Scientific Instrument. – 2009. – Vol. 30, № 7. – P. 1530–1534.

4. Li J., Xu X., Zhang J., Wang X., Cao J. High power laser constant temperature control system // IEEE International conference on mechatronics and automation (Takamatsu, Japan, 6–9 August 2017). – Takamatsu, 2017. – P. 1–5.

5. Zhou F., Wang R.G., Ji Z.B., Zhao L. Tunable photonic microwave signal generation based on TEC temperature controller // Journal of Optoelectronics Laser. – 2014. – Vol. 25, № 9. – P. 1691–1694.

6. Дубровин А.Н., Мандель А.Е., Шандаров С.М., Шмаков С.С. Терморегулятор для исследований температурных зависимостей оптических эффектов в кристаллах // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 4. – С. 156–158.

7. Собко А.А., Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополни-

тельным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 323–341.

8. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.

Собко Александр Александрович
Аспирант каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Тел.: +7-913-104-73-60
Эл. почта: alexfreetibet@gmail.com