

Силовой преобразователь частоты на транзисторах

Н. Т. Исембергенов

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

isembergenov@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается силовой преобразователь частоты на IGBT-транзисторах, который состоит из двух силовых транзисторов, что повышает КПД и снижает стоимость преобразователя частоты. Показана возможность интеллектуальных модулей на IGBT-транзисторах. Такой преобразователь частоты может работать при высокой частоте тока, от нескольких до сотни кГц. Описан принцип работы преобразователя частоты на двух IGBT-транзисторах.

Ключевые слова. Преобразователь частоты, IGBT-транзистор, частота, энергоэффективность и КПД, индукционный нагрев.

Power frequency converter build on transistors

Nalik T. Isembergenov

The Kazakh National Research Technical University
named after K. I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan

isembergenov@mail.ru

Annotation. This article deals with the energy-efficient frequency converter for induction heating, which consists of two power transistors. This configuration of the converter increases coefficient of performance and reduces the cost of the frequency converter. The converter provides a high frequency of current from several kHz to hundreds of kHz. The operating principle of the frequency converter is described.

Keywords. Frequency converter, IGBT transistor, energy efficiency and ECE, frequency, induction heating

На протяжении десятков лет требования потребителей к преобразователям электрической энергии остаются прежними: меньшие размеры (при той же выходной мощности), более высокий КПД, лучшие функциональные возможности (включая электрические параметры), меньшая стоимость.

Методы транзисторного преобразования энергии, развитые в последнее время, новые компоненты (IGBT-транзисторы) и материалы позволили, не снижая, а даже увеличивая КПД, поднять рабочие частоты серийно выпускаемых импульсных преобразователей до нескольких сотен кГц, что, в свою очередь, позволило, в сочетании с новыми конструкторскими, схемными и технологическими решениями, снизить размеры преобразователей при той же выходной мощности.

В современной силовой электронике широкое распространение получили так называемые транзисторы IGBT. Данная аббревиатура заимствована из зарубежной терминологии и расшифровывается как Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), а на русском языке звучит как биполярный транзистор с изолированным затвором. IGBT-транзистор представляет собой электронный силовой прибор, который используется в качестве мощного электронного ключа [1].

Для согласования схемы управления с входными затворами MOSFET и IGBT-транзисторов применяют устройства, называемые драйверами. Основная задача драйвера — обеспечить согласование низковольтных логических сигналов от контроллера с сигналами управления затвора MOSFET и IGBT-транзисторов [1, 2].

В настоящее время выпускают интеллектуальные силовые модули (IPM) серии V, которые являются новым этапом развития силовых ключей на базе IGBT-модулей и представляют собой функционально законченное изделие, исполненное в компактном изолированном корпусе и включающее в себя:

- силовые IGBT-транзисторные ключи;
- встроенные драйверы IGBT-транзисторов;
- встроенные цепи защиты: от короткого замыкания, перегрузки по току, от перегрева, по напряжению питания;
- логические входы управления.

Особенности:

- IGBT третьего поколения с низким напряжением $U_{кз}$ насыщения;
- диоды с быстрым восстановлением;
- улучшенная схема защиты от короткого замыкания.

Цель проводимых исследований — разработать и исследовать преобразователь частоты на IGBT-транзисторах с максимально эффективным значением КПД (за счет уменьшения количества транзисторов) и низким значением стоимости.

В существующих преобразователях частоты применяют силовые транзисторы и инверторы, выполненные на четырех транзисторах [3]. КПД преобразователей частоты не превышает 90–92 % при высокой частоте коммутации транзисторов. При больших токах нагрузки возрастают потери в транзисторах преобразователя частоты. При этом снижается КПД и возрастает мощность вентиляции, что приводит к существенному увеличению массогабаритных размеров преобразователя частоты и снижению мощности в индукторе.

В статье описана разработка преобразователя частоты с наименьшим количеством транзисторов и высоким значением КПД при подключении его к трехфазным источникам питания [4, 5]. Научной новизной является сокращение количества транзисторов до двух, что увеличивает КПД, вследствие чего происходит экономия электроэнергии и снижение стоимости преобразователя частоты.

На рис. 1 представлена схема преобразователей частоты для индукционного нагрева. Преобразователь частоты для индукционного нагрева содержит трехфазный выпрямитель, два ключа на транзисторах, высокочастотный трансформатор с двумя первичными и одной вторичной обмотками и индуктором (рис. 1). На вход преобразователя частоты подается переменное трехфазное напряжение, которое трехфазным выпрямителем преобразуется в источник постоянного напряжения (рис. 1).

Первичная обмотка с числом витков W_1 высокочастотного трансформатора через первый транзисторный ключ T_1 подключена к трехфазному выпрямителю, вторая первичная обмотка с числом витков W_2 высокочастотного трансформатора через второй транзисторный ключ T_2 подключена также к трехфазному выпрямителю. Вторичная обмотка W трансформатора подключена к индуктору.

Таким образом, трехфазный выпрямитель преобразует трехфазное напряжение в постоянное напряжение, а транзисторные ключи T_1 и T_2 постоянное напряжение преобразуют в переменное однофазное напряжение требуемой частоты f_n . Трансформатор понижает переменное напряжение высокой частоты до требуемой величины.

Преобразователь частоты работает следующим образом.

При включении транзисторного ключа T_1 постоянное напряжение трехфазного выпрямителя подключается к первой первичной обмотке W_1 высокочастотного трансформатора и по обмотке W_1 будет протекать ток до момента времени t_1 (рис. 2). Таким образом формируется положительная полуволна входного напряжения первичной обмотки W_1 высокочастотного трансформатора.

В момент времени t_1 транзисторный ключ T_1 выключается, а включается транзистор T_2 . При этом постоянное напряжение трехфазного выпрямителя подключается ко второй первичной обмотке W_2 вы-

сокочастотного трансформатора, по обмотке W_2 будет протекать ток обратной полярности до момента времени t_2 (рис. 2). Так формируется отрицательная полуволна входного напряжения первичной обмотки W_2 высокочастотного трансформатора.

Частота напряжения преобразователя частоты определяется известным выражением

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{T}, \quad (1)$$

где T — период напряжения преобразователя частоты.

Известно, что при высокой частоте напряжения массогабаритные размеры высокочастотного трансформатора снижаются, поэтому преобразователь частоты будет иметь низкие массогабаритные размеры. Кроме того, преобразователь частоты выполнен на двух транзисторах, и соответственно, электрические потери на транзисторах будут меньше, что приведет к увеличению КПД преобразователя частоты по сравнению с аналогом и снижению стоимости всего преобразователя частоты.

Сущность работы заключается в том, что предлагается усовершенствованная конструкция преобразователя частоты на двух IGBT-транзисторах. При этом конструкция получается более простой и технологичной для изготовления и может быть изготовлена для конкретного случая. Кроме того, разработанная технология и методы проектирования позволяют создать преобразователь частоты для конкретного типа технологического процесса [4].

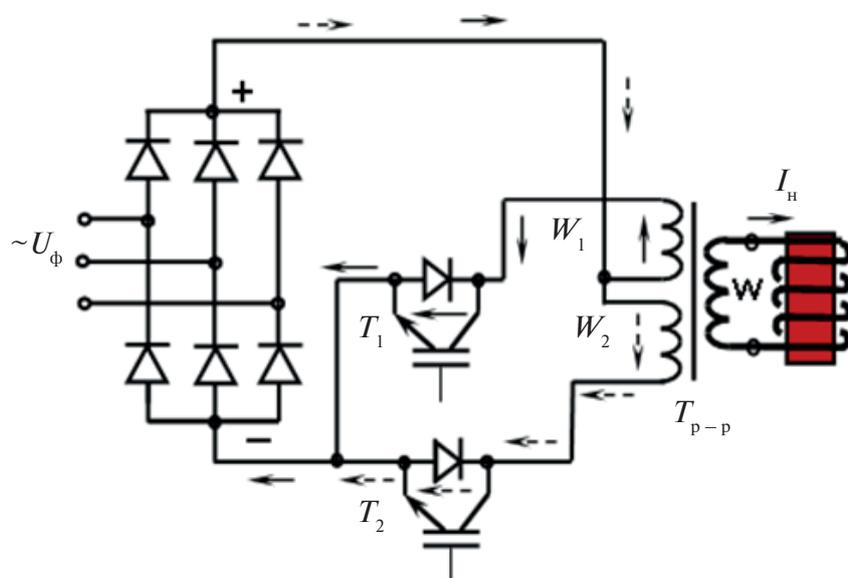


Рис. 1. Схема преобразователя частоты на двух IGBT-транзисторах

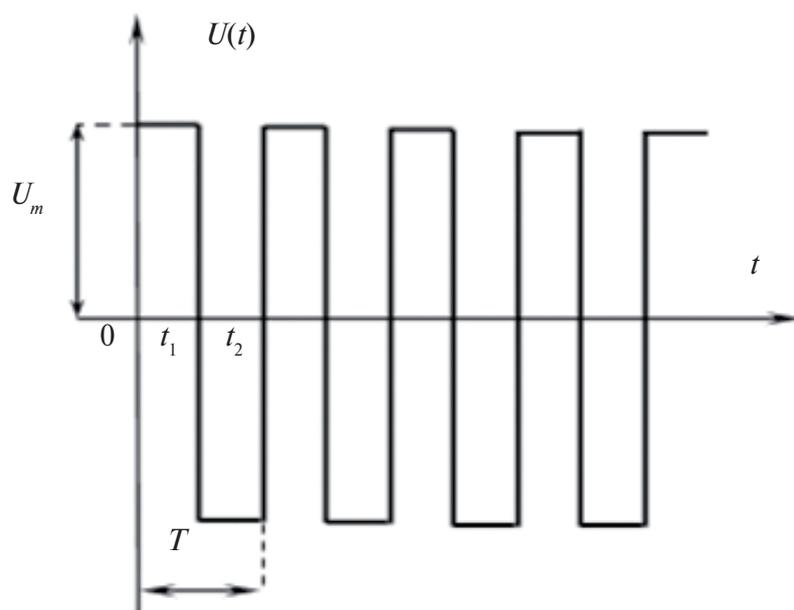


Рис. 2. График выходного напряжения преобразователя частоты

На рис. 1 преобразователь частоты подключен к обмоткам индуктора, внутри которого находится металлическая круглая заготовка. При этом по этим обмоткам индуктора будет протекать высокочастотный ток, который образует переменный магнитный поток. Переменный магнитный поток, пересекая металлические стенки металла, согласно закону электромагнитной индукции, индуцирует в нем электродвижущую силу, под влиянием которой потечет переменный электрический вихревой ток. Этот ток и будет нагревать металл до требуемой температуры.

Был разработан и изготовлен опытный образец преобразователя частоты. На рис. 3 показан опытный образец преобразователя частоты мощностью 6 кВт на частоты от 2 до 20 кГц. В преобразователе частоты в качестве источника использована трехфазная система питания 380 В промышленной частоты. Преобразователь частоты реализован на транзисторах IGBT. Система управления реализована на логических элементах математического аппарата программного комплекса. Выпрямитель был изготовлен на базе мостовой схемы трехфазного выпрямления. Для согласования напряжения и гальванической развязки был использован двухобмоточный высокочастотный силовой трансформатор.

В качестве нагрузки для преобразователя частоты был использован индукционный нагрев, который применяют для обогрева технологического оборудования (нефтепровода, трубопровода, емкости и т. д.), нагрева металла, жидких сред, для сушки покрытий, материалов (например, древесины). Важнейший параметр установок индукционно-

го нагрева — частота. Для каждого процесса существует оптимальный диапазон частот, обеспечивающий наилучшие технологические и экономические показатели. Для индукционного нагрева металла используются частоты от 50 Гц до 5 МГц.

Результаты экспериментального исследования показали, что опытный образец преобразователя частоты работает стабильно, выдает заданные технические характеристики. На рис. 3 показан процесс индукционного поверхностного нагрева металла диаметром 120 мм при частоте 20 кГц. Это сделано, чтобы показать, что преобразователь частоты нагревает только поверхность металла при частоте 20 кГц, при этом температура нагрева достигает 800 градусов.



Рис. 3. Процесс индукционного поверхностного нагрева металла диаметром 120 мм при частоте 20 кГц

Как видно из рисунка, преобразователь частоты для поверхностного индукционного нагрева должен иметь диапазон частот в пределах 16–20 кГц. При этом глубина проникновения электромагнитной волны в этом частотном диапазоне составляет 2–5 мм. При необходимости дальнейшего нагрева в глубины металла увеличивают время нагрева и снижают частоту.

Литература

1. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры : учебник / О. К. Березин, В. Г. Костиков, Е. М. Парфенов [и др.] ; под ред. В. А. Шахнова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2005. 504 с.
2. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование : пер. с англ. К. : МК-Пресс, 2005. 288 с.
3. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование. К. : МК-Пресс ; СПб.: Корона — Век, 2013. 256 с.
4. Исембергенов Н. Т. Преобразователь частоты на двух транзисторах для электротехнологии // XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Алушта, 2012.
5. Исембергенов Н. Т. Преобразователь частоты для индукционного нагрева нефтепровода при трехфазном питании. Номер патента 99534: авторское свидетельство к инновационному патенту. Комитет по правам интеллектуальной собственности министерства юстиции Республики Казахстан. Бюл. № 18 от 29.09. 2017.

References

1. Berezin O. K., Kostikov V. G., Parfenov E. M. *Proektirovanie istochnikov ehlektropitaniya ehlektronnoj apparatury* [The design of the power supplies of electronic equipment], Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2005, 504 p. (In Russian).
2. Braun M. *Istochniki pitaniya Raschet i konstruirovaniye* [Power supply. Calculation and construction], МК-Press, 2005, 288 p. (In Russian).
3. Moskatov E. A. *Silovaya ehlektronika Teoriya i konstruirovaniye* [Power electronics. Theory and construction], Saint Petersburg, МК-Press KORONA — VEK, 2013, 256 p. (In Russian).
4. Isembergenov N. T. *Preobrazovatel chastoty na dvuh tranzistorah dlya ehlektrotekhnologii* [Power frequency converter build on two transistors for Electrotechnology], *Proceedings of the XIV International Conference “Ehlektromekhanika Ehlektrotekhnologii Ehlektrotekhnicheskie Materialy i Komponenty”* [Electromechanics, Electrotechnologies, Electrotechnical Materials and Components], Alushta, 2012, pp. 28–32. (In Russian).
5. Isembergenov N. T. *Preobrazovatel chastoty dlya indukcionnogo nagreva nefteprovoda pri trekhfaznom pitanii* [Frequency converter for induction heating of the oil pipeline with three-phase power supply], patent number 99534, Bul. № 18 from 29.09.2017. (In Russian).

Информация об авторе

Исембергенов Налик Турегалиевич — доктор технических, наук, профессор, родился в 1949 г. В 1975 г. окончил Московский энергетический институт, 1977–1980 гг. — учился в аспирантуре Московского энергетического института и в 1981 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию. Докторскую диссертацию защитил в 2002 г. В настоящее время работает профессором кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Казахского национального технического исследовательского университета. Автор более 250 научных работ и 35 изобретений и патентов.

Information about the author

Mr. Isembergenov Nalik Turegalievich, Doctor of Engineering Science, Professor.

Mr. Isembergenov N. T. was born in 1949. He is graduated from Moscow Power Engineering Institute in 1975. He received the Master degree after successful completion the study in Moscow Power Engineering Institute in the period between 1977 and 1980. He received the degree of Doctor of Engineering Science in 2002. Currently Mr. Isembergenov N. T. is working in the position of Professor in the Department of Radiotechnics, Electronics and Telecommunication of The Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpaev. He is the author of more than 250 scientific works and researches. 35 inventions and patents belong to Mr. Isembergenov N. T.