

УДК 621.314.5

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ПОНИЖЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ГАРМОНИК ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Г.В.Павлов\*, докт.техн.наук, И.Л.Винниченко, А.В.Обрубков\*\*, канд.техн.наук  
Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова,  
пр. Героев Сталинграда, 9, Николаев, 54001, Украина, e-mail: nil\_sound@mail.ru, [oscillon@rambler.ru](mailto:oscillon@rambler.ru)

*Развит способ нелинейного регулирования выходного напряжения резонансного инвертора, позволяющий создать низкочастотное синусоидальное выходное напряжение с помощью модуляции высокочастотных импульсов в резонансном контуре. Предложено использовать контур с коммутируемой емкостью для изменения характеристик импульсов при снижении абсолютной величины выходного напряжения преобразователя частоты. Разработан алгоритм расчета коммутационных последовательностей. Проведено имитационное моделирование преобразователя, подтверждающее снижение искажений выходного напряжения. Библ. 7, рис. 3.*

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, резонансный инвертор, нелинейное регулирование.

Для регулирования выходного напряжения двухзвенных преобразователей частоты достаточно эффективно используется времяимпульсная модуляция [1,2,7]. Однако жесткая коммутация силовых вентилях импульсного преобразователя приводит к значительным коммутационным потерям, которые можно свести к минимуму, используя явление резонанса [5,6]. Известен резонансный инвертор (РИ) с нелинейным управлением [4], который формирует требуемую синусоидальную форму напряжения на нагрузке, используя принципы импульсной модуляции и коммутации силовых ключей при нулевых значениях напряжения и тока. В [3] предложен способ и система управления резонансным инвертором, обеспечивающая требуемую форму выходного напряжения с заданными ограничениями коммутационных потерь и электромагнитных помех. В процессе исследования этой системы оказалось, что уменьшение нагрузки может привести к возникновению высших гармоник выходного напряжения, что может быть неприемлемо для потребителя. Поэтому **целью работы** является развитие способа нелинейного регулирования и усовершенствование схемы резонансного инвертора для снижения коэффициента гармоник выходного напряжения при напряжении на нагрузке преобразователя ниже номинального.

Особенностью резонансных преобразователей с переменным выходным напряжением является необходимость согласования контура и выходных фильтров с нагрузкой. Приемлемое качество выходного напряжения обеспечивается при незначительных отклонениях параметров нагрузки от расчетных значений. В случае существенных изменений нагрузки РИ либо регулируемого уменьшения амплитуды низкочастотного выходного напряжения на его кривой наблюдаются высокочастотные колебания в окрестности пересечения временной оси, что приводит к повышению коэффициента гармоник напряжения. Эти колебания появляются по причине чрезмерного прорезивания высокочастотных импульсов инвертора при отслеживании системой управления заданного текущего среднего выходного напряжения. За счет относительно большой энергии импульса резонансного контура при малой величине выходного напряжения возникают выбросы и пульсации, сравнимые с величиной текущего среднего. Это заметно искажает синусоидальную кривую выходного напряжения при его переходах через ноль. Появляются вредные для питаемой аппаратуры высокочастотные помехи на выходе. Снизить искажения от прорезивания импульсов можно с помощью перевода контура на более высокую резонансную частоту, когда снижается величина выходного напряжения либо уменьшается нагрузка преобразователя. Для этого предлагается использовать переключающиеся резонансные емкости. Данное решение позволяет снизить энергию импульсов при снижении напряжения. При этом заполнение импульсами становится более плотным и искажения напряжения снижаются.

Для определения критерия появления искажающих выходное напряжение высокочастотных колебаний воспользуемся моделью управления РИ [3]. Относительное время замыкания основных силовых ключей [3] определяется зависи-

$$\text{мостью} \quad n_{i+1} = \frac{1}{2\pi k_f} \cdot \arccos\left(\cos 2\pi k_f n_i - \frac{2\pi k_f}{k_u}\right), \quad (1)$$

где  $k_f = f_{out}/f_r$  – относительная частота выходного напряжения, равная отношению частот выходного напряжения и резонансного контура,  $k_u = (2U_{out})/U_s$  – относительное напряжение выходного сигнала, равное отношению амплитуды выходного напряжения к амплитуде напряжения на конденсаторе резонансного контура,  $n_i = t_i/T_r$  – относительное время замыкания ключей, определяемое как отношение времени, отсчитываемого от начала полуволны опорной синусоиды, равной периоду собственных колебаний резонансного контура, к длительности несущего импульса.

Исследование работы системы показало, что при выполнении условия  $(n_{i+1} - n_i \leq 25)$  высокочастотные колебания в

окрестностях пересечения кривой выходного напряжения с временной осью практически не влияют на коэффициент гармоник. В ином случае этот коэффициент растёт.

Снижения искажений выходного напряжения можно добиться также путем изменения параметров выходного фильтра. Однако индуктивность рассчитывается из условий энергетического баланса выходного и входного контуров [3] и является постоянным параметром схемы. А увеличение емкости фильтра приводит к снижению быстродействия преобразователя и отставанию по фазе выходного напряжения от эталонного сигнала. Поэтому для уменьшения колебаний предложен способ регулирования напряжения резонансным инвертором, который базируется на принципе времяимпульсной модуляции [3], но позволяет изменять количество введенной в течение каждого несущего импульса энергии за счет переключения емкости контура. Основное достоинство примененного способа регулирования заключается в том, что в отличие от широтно- или частотно-импульсной модуляции для регулирования не нужно изменять длительность импульса напряжения на резонансном контуре. Как показано в [3], длительность импульса напряжения определяется собственной частотой резонансного контура, что и позволяет переключать ключи инвертора при нулевом значении тока (ZCS) или напряжения (ZVS). Несовпадение моментов времени переключений ключей с переходами тока через нуль приведет к выходу из режима ZCS и к нежелательным коммутационным потерям, а также к снижению КПД и надежности преобразователя. Предложенный способ регулирования заключается в использовании переключаемого последовательного резонансного контура, состоящего из неизменяющейся катушки индуктивности и одного из двух резонансных конденсаторов  $C_{r1}$  или  $C_{r2}$  (рис. 1), переключение которых происходит благодаря коммутации дополнительных ключей резонансного контура.

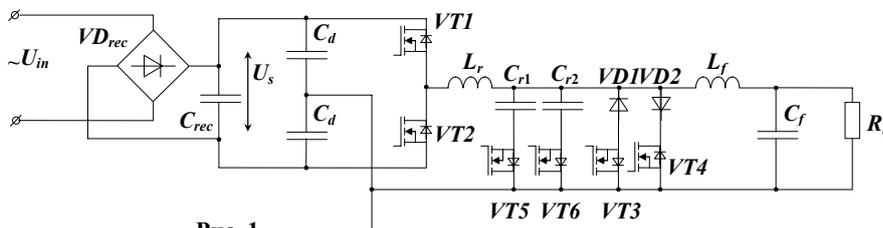


Рис. 1

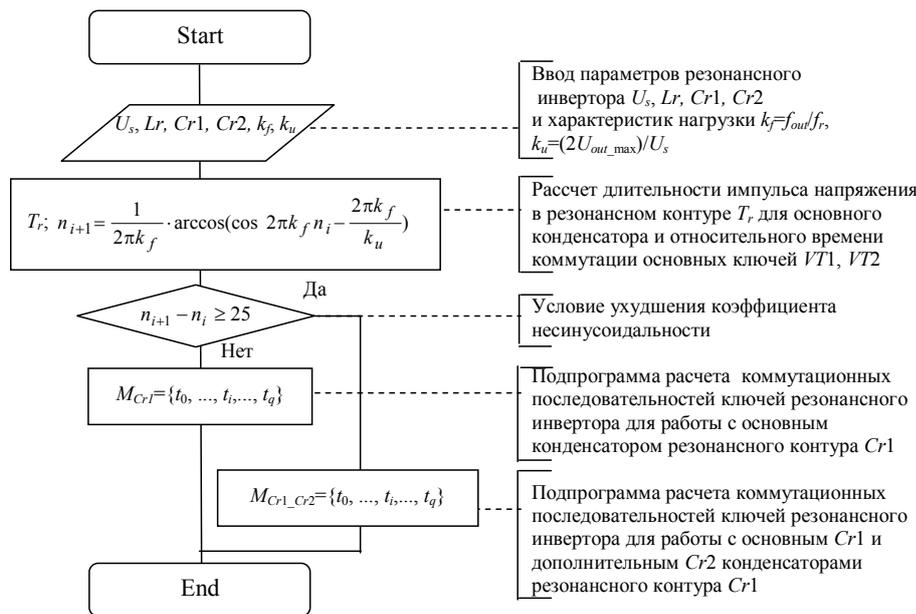


Рис.2. Алгоритм расчета управляющих последовательностей для резонансного инвертора

резонансным конденсатором (а) и с двумя резонансными конденсаторами, коммутируемыми последовательно (б), который формирует пониженное напряжение на выходе с амплитудой  $U_{Ra\max} = U_{in}/4 = 12,5$  В. Как видно, использование дополнительного резонансного конденсатора при предложенном способе управления силовыми ключами позволяет снизить коэффициент гармоник выходного напряжения в полтора раза.

**Выводы.** Получил развитие способ нелинейного управления резонансным инвертором, входящим в состав преобразователя частоты, который предполагает предварительное формирование коммутационных последовательностей всех управляемых ключей преобразователя. Модернизирована структура преобразователя путем добавления дополнительного резонансного конденсатора и ключей для коммутации резонансных элементов. Разработан и проверен при помощи имитационной модели алгоритм управления РИ. Результаты моделирования показали, что при усовершенствованном способе регулирования появилась возможность избежать

Для проверки эффективности предложенной модернизации построена имитационная модель преобразователя в среде Matlab, силовая часть которой соответствует схеме, показанной на рис. 1. Параметры элементов схемы рассчитаны на амплитудное значение выходного напряжения  $U_{Ra\max} = U_{in}/2 = 25$  В и являются следующими:  $C_{r1} = 0,1$  мкФ,  $L_r = 2,5$  мкГн,  $L_f = 1,8$  мГн,  $C_f = 4$  мкФ. В имитационной модели управляющие последовательности для ключей VT1-VT6 рассчитываются заранее, исходя из параметров элементов схемы преобразователя и параметров нагрузки. Когда возникает необходимость формирования пониженного напряжения на нагрузке, рассчитывается новая последовательность управляющих импульсов при неизменных параметрах элементов схемы. Расчет управляющих последовательностей производится по алгоритму, показанному на рис. 2.

На рис. 3 показаны результаты моделирования работы преобразователя с одним

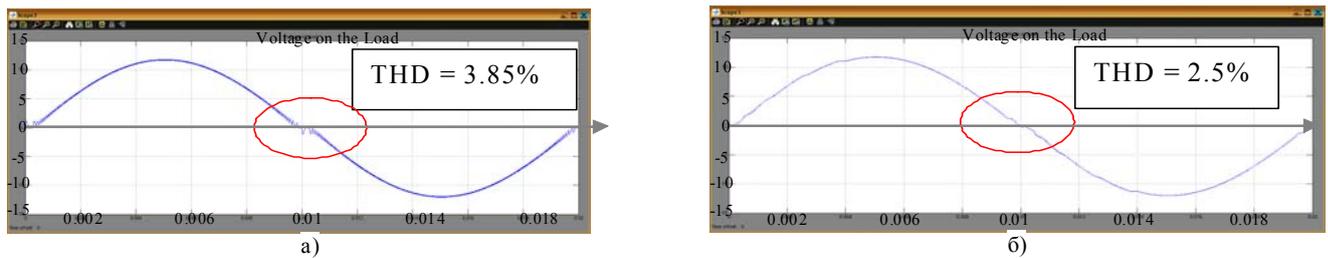


Рис. 3

значительного снижения качества выходного напряжения преобразователя. Длительность несущих высокочастотных импульсов сохраняется в заданных пределах и соответственно сохраняется оптимальная коммутация ключей в широком диапазоне регулирования выходного напряжения.

1. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. – Киев: МК-Пресс, 2007. – 288 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – Москва: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Павлов Г.В., Обрубов А.В., Винниченко И.Л. Преобразователь частоты на основе резонансного инвертора с нелинейным управлением // Вісник НТУ "ХПИ". – 2015. – № 12(1121). – С. 490-494.
4. Павлов Г.В., Обрубов А.В., Винниченко И.Л. Электромагнитные процессы и параметры накопительных элементов в резонансном инверторе с нелинейным регулированием // Судостроение и морская инфраструктура. – 2015. – № 2(4). – С. 96-107.
5. Павлов Г.В., Обрубов А.В., Нікітіна О.В., Покровський М.В. Перетворювачі постійної напруги на основі резонансних інверторів. – Миколаїв: НУК, 2013. – 372 с.
6. Rashid M. Power Electronics Handbook. Devices, Circuits, and Applications. – Cambridge: Elsevier Inc., 2007.
7. Steigerwald R.I. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies // IEEE APEC. – 1987. – Pp. 135–144.

УДК 621.314.5

### ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ ІЗ ЗНИЖЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ВИКРИВЛЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОСТІ КРИВОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Павлов Г.В., докт.техн.наук, Винниченко І.Л., Обрубов А.В., канд.техн.наук

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,

пр. Героїв Сталінграду, 9, Миколаїв, 54001, Україна, e-mail: nil\_sound@mail.ru, [oscillon@rambler.ru](mailto:oscillon@rambler.ru)

Отримав розвиток спосіб нелінійного регулювання вихідної напруги резонансного інвертора, що дозволяє створити низькочастотну синусоїдальну вихідну напругу за допомогою модуляції високочастотних імпульсів у резонансному контурі. Запропоновано використовувати контур з ємністю, що комутується, для зміни характеристик імпульсів при зниженні абсолютної величини вихідної напруги перетворювача частоти. Розроблено алгоритм розрахунку комутаційних послідовностей. Проведено імітаційне моделювання перетворювача, що підтверджує зниження викривлень вихідної напруги. Бібл. 7, рис. 3.

**Ключові слова:** перетворювач частоти, резонансний інвертор, нелінійне регулювання.

### FREQUENCY CONVERTER WITH THE REDUCED THD OF THE OUTPUT VOLTAGE

Pavlov G.V., Vinnichenko I.L., Obrubov A.V.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Geroev Stalingrada, 9, Nikolaev, 54001, Ukraine.

e-mail: nil\_sound@mail.ru, [oscillon@rambler.ru](mailto:oscillon@rambler.ru)

The method for a non-linear control of the resonant inverter's output voltage, which allows to create a low-frequency sinusoidal output voltage using the high-frequency modulation of the resonant pulses, was developed. It assumes the preliminary formation of the switching sequences for the converter's switches. It was proposed to use the circuit with the switched capacities to change the pulse characteristics while reducing the absolute value of the inverter's output voltage. The algorithm for the calculation of the switching sequences was proposed. The simulation of the inverter took place. It confirmed the reduction of the output voltage distortions. References 7, figures 3.

**Keywords:** frequency converter, resonant inverter, non-linear control.

1. Brown M. Power supplies. Computation and design. – Kyiv: MK-Press, 2007. – 288 p. (Rus)
2. Meleshyn V.I. Transistor converter technique. – Moskva: Tekhnosfera, 2005. – 632 p. (Rus)
3. Pavlov G.V., Obrubov A.V., Vinnichenko I.L. The frequency converter is based on a resonant inverter with nonlinear control // Visnyk NTU "KhPI". – 2015. – No 12(1121). – Pp. 490-494. (Rus)
4. Pavlov G.V., Obrubov A.V., Vinnichenko I.L. Electromagnetic processes and parameters of storage elements in the resonant inverter with nonlinear control // Sudostroenie i morskaiia infrastruktura. – 2015. – No 2(4). – Pp. 96-107. (Rus)
5. Pavlov G.V., Obrubov A.V., Nikitina O.V., Pokrovskiy M.V. DC voltage converters based on the resonant inverters: monograph. – Mykolayiv: NUoS, 2013. – 372 p. (Rus)
6. Rashid M. Power Electronics Handbook. Devices, Circuits, and Applications. – Cambridge: Elsevier Inc., 2007.
7. Steigerwald R.I. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies // IEEE APEC. – 1987. – Pp. 135–144.

Надійшла 24.01.2016  
Остаточний варіант 07.04.2016