

УДК 621.314

А.М. Афанасьев, Ю.М. Голембиовский, А.В. Куликов

Синхронный время-импульсный способ управления резонансным инвертором с последовательной емкостной компенсацией нагрузки

Предложен синхронный время-импульсный способ управления резонансным инвертором с последовательной емкостной компенсацией нагрузки. Проведен сравнительный анализ синхронных и асинхронных способов управления инвертором напряжения. Показано, что синхронное управление обеспечивает «мягкое» включение силовых транзисторов с циркуляцией энергии в нагрузочном резонансном контуре инвертора напряжения и позволяет снизить суммарную мощность потерь инвертора или повысить частоту преобразования.

Ключевые слова: резонансный инвертор, колебательный контур, частотный способ управления, фазовый способ управления, время-импульсная модуляция.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-95-99

В настоящее время инверторы (конверторы) с резонансной и квазирезонансной нагрузкой находят все большее применение в устройствах на основе статических высокочастотных преобразователей электрической энергии как для вторичных источников питания (0,1–1 кВт), так и для мощных (0,1–1 МВт) высокочастотных установок индукционного нагрева. Схемы подобных преобразователей содержат неуправляемый выпрямитель и регулируемый инвертор тока или инвертор напряжения. Нагрузка инверторов обычно имеет индуктивную составляющую, которая в соответствии с явлением резонанса компенсируется последовательным либо параллельным включением конденсатора. Общей тенденцией в преобразовательной технике является уменьшение стоимостных и массогабаритных показателей при повышении частоты преобразования, что достигается с применением схем инверторов напряжения [1, 2]. Также в соответствии с различными электрическими и технологическими требованиями, существует необходимость в качественном регулировании выходных параметров – стабилизация тока, напряжения или мощности с заданной точностью [3, 4].

Управление резонансными инверторами

Наиболее известным способом регулирования выходных параметров в резонансных инверторах является частотный способ управления [5–7]. Для инверторов напряжения с последовательной емкостной компенсацией и индуктивным характером нагрузки увеличение выходной мощности получают при уменьшении частоты управления от стартовой частоты до частоты близкой к собственной резонансной частоте. Преимуществом частотного способа управления является «мягкое» включение силовых транзисторов. К недостаткам можно отнести частичную рекуперацию энергии колебательного контура в емкостной фильтр, установленный на входе инвертора, через обратные диоды силовых ключей, что приводит к дополнительным потерям в силовых элементах схемы.

Известен также фазовый способ управления [8–10], реализуемый путем смещения фазы управляю-

щих импульсов одной силовой стойки инвертора по отношению к управляющим импульсам второй силовой стойки. Способ позволяет консервировать накопленную в колебательном контуре энергию за счет соответствующего открытия ключей инвертора и ее циркуляцию в контуре в отличие от частотного способа. При этом для реализации режима «мягкой» коммутации ключей в процессе регулирования необходимо одновременно менять фазовое рассогласование и подстраивать частоту управления.

Для согласованного управления инверторов с параллельной компенсацией индуктивности нагрузки используется способ [11], при котором импульсы управления подаются синхронно с моментами перехода мгновенного значения переменного тока в нагрузку через ноль и после снижения мгновенных значений напряжения на ключах, подлежащих очередному включению, ниже заданного уровня. Данный способ обеспечивает минимальные динамические потери энергии в ключах, при этом регулирование выходного напряжения возможно за счет применения дополнительного импульсного регулятора на входе резонансного инвертора.

В работе [12] для преобразователя комбинированной структуры с параллельной емкостной компенсацией индуктивности нагрузки предложен способ управления с синхронизацией по выходному напряжению и время-импульсной модуляцией, который обеспечивает включение транзисторов соответствующей диагонали мостового инвертора синхронно с моментами переходов выходного напряжения через ноль с возможностью регулирования выходного напряжения изменением коэффициента заполнения импульсов управления. При этом обеспечивается «мягкое» включение всех транзисторов и меньшие потери мощности при выключении двух регулирующих транзисторов. Также возможно плавное регулирование мощности, передаваемой в нагрузку.

Следует отметить общий недостаток представленных способов управления резонансными инверторами – выключение силовых транзисторов происходит в режиме «жесткой» коммутации. Для сниже-

ния коммутационных потерь выключения применяются цепи формирования траектории переключения.

Синхронный способ управления

В настоящей работе с целью уменьшения мощности потерь в силовых элементах инверторов напряжения, работающих на резонансную нагрузку с последовательной емкостной компенсацией, предложен способ управления с синхронной время-импульсной модуляцией (СВИМ), при котором включение транзисторов соответствующей диагонали мостового инвертора осуществляется синхронно с моментами переходов выходного тока через ноль в режиме «мягкой» коммутации, а выключение – в соответствии с заданным коэффициентом заполнения управляющих импульсов.

При этом можно выделить два возможных варианта синхронной время-импульсной модуляции. В первом варианте (СВИМ-1) управляющие импульсы ключей обеих стоек моста резонансного инвертора формируются с одинаковым коэффициентом заполнения; во втором (СВИМ-2) – импульсы управления силовыми ключами одной из стоек формируются с максимальным коэффициентом заполнения, а второй силовой стойки – с регулируемым коэффициентом заполнения. В качестве ключей инвертора К1–К4 могут использоваться IGBT или MOSFET-модули со встроенными обратными диодами. Питание инвертора осуществляется от источника ЭДС (емкостный или индуктивно-емкостный фильтр). Система управления инвертором (СУИ) построена по двухканальному принципу с возможностью реализации способов управления СВИМ-1 и СВИМ-2 (рис. 1).

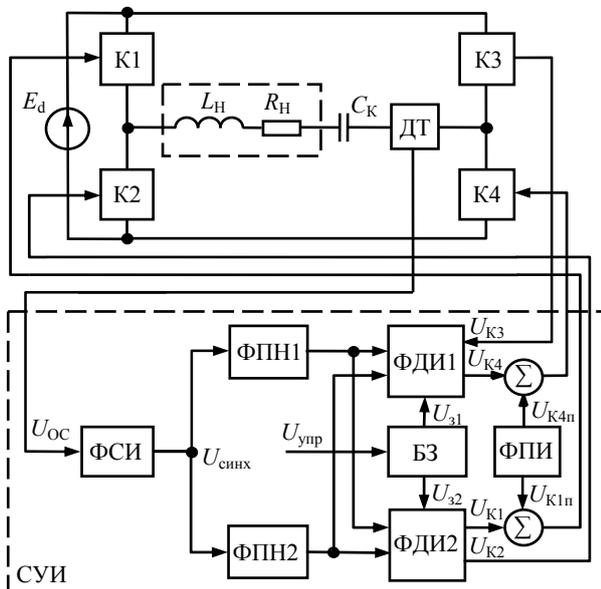


Рис. 1. Функциональная схема инвертора напряжения с системой управления способом СВИМ

Функциональная схема системы управления содержит следующие узлы: ФПИ – формирователь пускового импульса, ФСИ – формирователь синхронизирующих импульсов, ФПН1 и ФПН2 – формирователи пилообразного напряжения, ФДИ1 и ФДИ2 – формирователи длительности импульсов, БЗ – блок

задания коэффициента заполнения импульсов управления, Σ – сумматоры.

Алгоритм работы инвертора с синхронной системой управления

В соответствии с режимом работы системы управления на выходе БЗ формируются сигналы U_{31} и U_{32} для СВИМ-1, равные по уровню и пропорциональные сигналу управления $U_{упр}$, а для СВИМ-2 один из сигналов подается фиксированный и соответствующий максимальному коэффициенту заполнения, второй – пропорциональный сигналу $U_{упр}$. Соответственно на выходах ФДИ1 и ФДИ2 формируются сигналы управления ключами К3, К4 и К1, К2 с регулируемыми коэффициентами заполнения для двух стоек инвертора или для одной стойки с максимальным, а для другой – с регулируемым коэффициентами заполнения. Скорость нарастания сигнала ФПН2 должна соответствовать максимально возможному коэффициенту заполнения на резонансной частоте нагрузочного контура.

Рассмотрим работу СУИ в режиме СВИМ-1. Начало работы СУИ осуществляется по сигналам блока ФПИ, на выходе которого формируются импульсы управления $U_{к1п}$ и $U_{к4п}$ с длительностью, необходимой для накопления начальной энергии в резонансном контуре. Далее через сумматоры они подаются на ключи К1 и К4, открывая их. В результате происходит запуск инвертора и по контуру $+E_d - K1 - L_H - R_H - C_K - ДТ - K4 - -E_d$ течет выходной ток инвертора (положительная полуволна), возбуждающий колебательный нагрузочный контур $L_H - R_H - C_K$. В результате на выходе ДТ формируется сигнал обратной связи U_{oc} , пропорциональный положительной полуволне выходного тока, который подается на вход ФСИ (рис. 2).

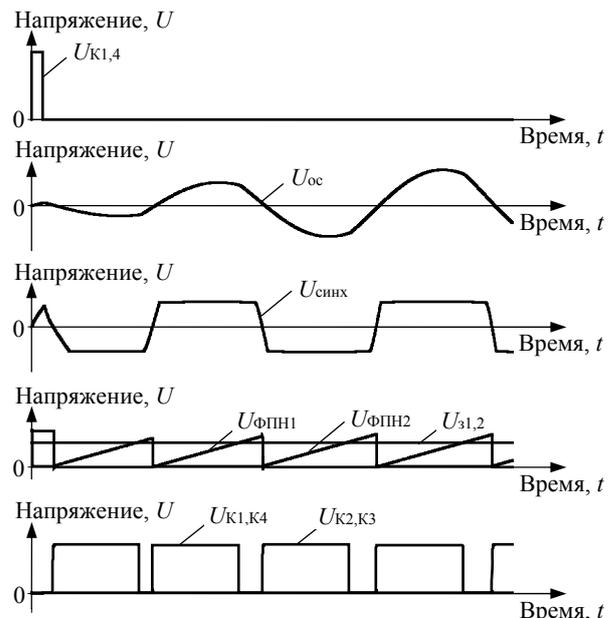


Рис. 2. Временные диаграммы формирования импульсов управления инвертора с СВИМ-1

По окончании длительности импульсов $U_{к1п}$ и $U_{к4п}$ ключи К1 и К4 закрываются и ток контура про-

текает за счет энергии, накопленной в индуктивности L_H , через обратные диоды ключей K2 и K3, при этом часть энергии отдается в источник ЭДС на входе инвертора.

Таким образом, формируется начальная положительная полуволна выходного тока, возбуждающего резонансный контур. В моменты перехода сигнала U_{OC} через ноль на выходе ФСИ меняется полярность синхронизирующего напряжения $U_{синх}$.

При переходе U_{OC} из положительной полуволны к отрицательной ФСИ формирует на выходе отрицательный импульс, разрешающий работу ФПН2 и блокирующий ФПН1. Сформированный сигнал пилообразной формы от ФПН2 совместно с сигналом U_{32} от БЗ подается на входы ФДИ2, где формируется импульс управления U_{K2} , при этом ФДИ1 формирует импульс U_{K3} для включения, соответственно K2 и K3. В результате по контуру $+E_d - K3 - ДТ - C_K - R_H - L_H - K2 - -E_d$ протекает выходной ток инвертора.

По окончании длительности импульсов ключи K2 и K3 закрываются и колебательный контур опять отдает часть энергии в источник ЭДС на входе ин-

вертора через обратные диоды ключей K1 и K4. Таким образом, формируется отрицательная полуволна тока колебательного контура.

Далее процесс формирования тока контура повторяется, в результате чего на выходе инвертора формируется ток, близкий к синусоидальному.

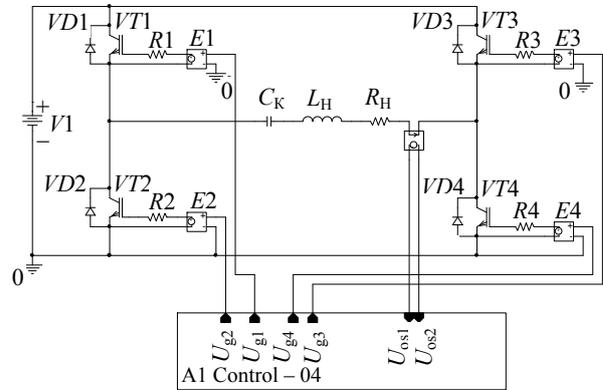


Рис. 3. Схема имитационной модели инвертора напряжения с блоком системы управления

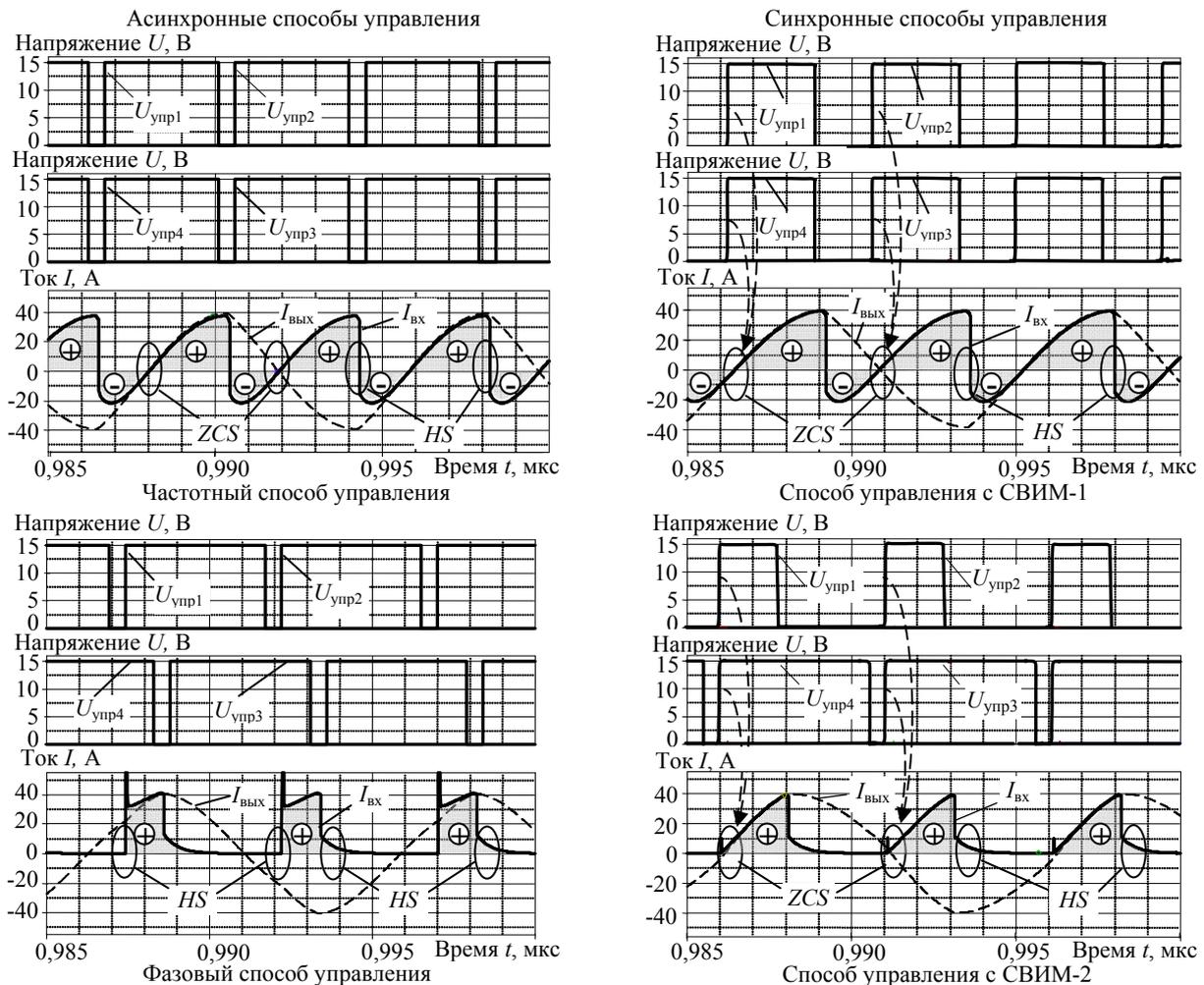


Рис. 4. Диаграммы электромагнитных процессов в модели инвертора напряжения с асинхронными и синхронными способами управления

Имитационное моделирование

В программе OrCAD 9.2 разработана имитационная модель (рис. 3) и получены временные диаграммы работы модели инвертора напряжения с применением асинхронных и синхронных способов управления (рис. 4). На приведенных диаграммах $U_{\text{упр1}} - U_{\text{упр4}}$ – импульсы управления транзисторами $VT1 - VT4$; $I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}$ – входной ток источника питания и выходной ток инвертора.

При анализе диаграмм тока источника питания $I_{\text{вх}}$ можно видеть, что во время открытого состояния транзисторов $VT1$ и $VT4$ мостового инвертора с управлением способом СВИМ-1 происходит накопление энергии в контуре (участок с положительной полярностью тока в источнике – «+» на диаграммах). Во время выключенного состояния транзисторов часть энергии контура рекуперирована в источник ЭДС на входе инвертора (участок с отрицательной полярностью тока в источнике – «-» на диаграммах). Аналогичные процессы протекают в инверторе напряжения с частотным способом управления.

В инверторе с управлением способом СВИМ-2 транзисторы одной силовой стойки ($U_{\text{упр1}}, U_{\text{упр2}}$) работают с регулируемым коэффициентом заполнения, а второй силовой стойки ($U_{\text{упр3}}, U_{\text{упр4}}$) – с фиксированным максимально возможным коэффициентом заполнения, что обеспечивает циркуляцию энергии колебательного контура через ключи инвертора без ее рекуперации в источник питания (отсутствие участка «-» на диаграммах), что позволяет уменьшить потери энергии в силовых элементах преобразователя аналогично с фазовым способом управления.

Также способ СВИМ-2 за счет синхронизации управляющих импульсов с моментами перехода выходного тока через ноль, обеспечивает режим «мягкого» включения транзисторов (ZCS). Это позволяет минимизировать динамические потери при включении, в отличие от фазового способа, при котором несинхронизированное включение транзисторов при некотором ненулевом значении тока в режиме «жесткого» переключения (HS) приводит к большим динамическим потерям.

Уменьшение мощности потерь в силовых элементах преобразователя с управлением способом СВИМ-2 позволяет уменьшить энергию, потребляемую от источника ЭДС для поддержания требуемой мощности в нагрузке, вследствие чего уменьшается значение тока в момент выключения транзисторов, пропорционально которому дополнительно уменьшаются динамические потери выключения.

Заключение

На основании предложенного способа управления с синхронной время-импульсной модуляцией резонансным инвертором синтезирована структура системы управления, позволяющая реализовать два варианта способов управления: с рекуперацией энергии колебательного контура в диагонали мостового инвертора напряжения в нагрузку (СВИМ-1) и

с циркуляцией энергии в нагрузочном резонансном контуре инвертора напряжения (СВИМ-2).

Проведено сравнение электромагнитных процессов инвертора напряжения с синхронными (СВИМ-1 и СВИМ-2) и асинхронными (частотный и фазовый) способами управления и показана возможность снижения коммутационных потерь силовых транзисторов инвертора напряжения с синхронными способами управления.

Литература

1. Васильев А.С. Источники питания электротермических установок / А.С. Васильев, С.Г. Гуревич, Ю.С. Иоффе. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Способы регулирования тока транзисторного инвертора напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе / Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк и др. // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2002. – Ч. 1. – С. 79–81.
4. Тихомиров И.С. Адаптивный алгоритм самовозбуждения транзисторного инвертора напряжения для установок индукционного нагрева / И.С. Тихомиров, А.С. Васильев, Д.А. Патанов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 8. – С. 262–267.
5. Земан С.К. Анализ импульсно-модуляционных способов регулирования последовательного резонансного инвертора / С.К. Земан, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 88–97.
6. Бондаренко Д.Н. Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева / Д.Н. Бондаренко, С.В. Дзлиев, Д.А. Патанов // Изв. ГЭТУ. – 1996. – № 497. – С. 98–110.
7. Частотный и широтно-частотный способы регулирования транзисторным инвертором напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе / В.Я. Гуцалюк, П.Н. Шевченко, И.О. Слесаревский, П.Ю. Герасименко // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 6. – С. 25–29.
8. Дзлиев С.В. Характеристики транзисторного резонансного инвертора напряжения при фазовом и частотном регулировании / С.В. Дзлиев, Д.А. Патанов // Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева: материалы междунар. конф., 25–26 мая 2005 г. / Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». – СПб.: Изд-во «ЛЭТИ». – 2005. – С. 363–369.
9. Kifune H. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications / H. Kifune, Y. Hatanaka, M. Nakaoka // IEEE Proc.-Electr. Power. Appl. – 2004. – Vol. 151 (1). – P. 19–25.
10. Патанов Д.А. Общие проблемы снижения коммутационных потерь в инверторах напряжения // Схемотехника. – 2001. – № 7. – С. 17–19.
11. Способ управления автономным согласованным инвертором с квазирезонансной коммутацией: пат. Рос. Федерация № 2458450; заявл. 24.07.09; опубл. 10.08.12, Бюл. № 22. – 12 с.
12. Спосіб регулювання вихідної напруги перетворювача: пат. Україна № 78600; заявл. 17.09.2012; опубл. 25.03.2013. Бюл. № 6. – 7 с.

Афанасьев Александр Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиопроизводства и электроники (РФиЭ) Донбасского гос. технического ун-та (ДонГТУ)
Ленина пр-т, д. 16, г. Алчевск, Украина, 94204
Тел.: +3 (8-095) 512-59-41
Эл. почта: alexandr.afanasyev@gmail.com

Голембиовский Юрий Мичиславович

Д-р техн. наук, профессор каф. системотехники (СТ) Саратовского гос. технического ун-та (СГТУ)
Политехническая ул., д. 77, г. Саратов, Россия, 410054
Тел.: +7 (845-2) 99-88-43
Эл. почта: yrmg_37@mail.ru

Куликов Антон Владимирович

Магистр каф. РФиЭ ДонГТУ
Ленина пр-т, д. 16, г. Алчевск, Украина, 94204
Тел.: +3 (8-050) 979-08-95
Эл. почта: kyl_an@mail.ru

Afanasyev A.M., Golembiovsky Y.M., Kulikov A.V.

Synchronous time-pulse method to control the resonant inverter with serial capacitive load compensation

A synchronous time-pulse method to control a resonant inverter with a serial capacitive load compensation is proposed. The comparative analysis of synchronous and asynchronous method for controlling the voltage inverter is carried out. It is shown that synchronous control provides the soft switching of power transistors with energy circulation in the load resonance circuit of the voltage inverter. The method allows to reduce the total loss capacity of inverter or to increase the frequency of conversion.

Keywords: resonant inverter, oscillatory circuit, frequency control method, phase control method, time-pulse modulation.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-95-99

References

1. Vasil'ev A.S., Gurevich S.G., Ioffe Yu.S. Istochniki pitaniya elektrotermicheskikh ustanovok [Power supplies for electrothermal installation]. M., Energoatomizdat, 1985. 248 p.
2. Zinov'ev G. S. Osnovy silovoi elektroniki [Fundamentals of power electronics]. Ucheb. Posobie, Izd. 2, ispr. i dop. Novosibirsk, NGTU, 2003. 664 p.
3. Yurchenko N.N., Shevchenko P.N., Gutsalyuk V.Ya. Sposoby regulirovaniya toka tranzistornogo invertora napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym konturom na vykhode [Methods for regulating the current of a transistor voltage inverter with a series resonant circuit at the output]. Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. «Silova elektronika ta energoefektivnist'». [Technical electro-dynamics. Them. issue «Power Electronics and Energy Efficiency»], 2002, vol. 1, pp. 79–81.
4. Tikhomirov I.S., Vasil'ev A.C., Patanov D.A. Adaptivnyi algoritm samovozbuzhdeniya tranzistornogo invertora napryazheniya dlya ustanovok induktsionnogo nagreva [Adaptive self-excitation algorithm for transistor voltage inverter for induction heating units]. Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov [Journal of Scientific Publications of Post-Graduate Students and Doctoral Students], 2008, no. 8, pp. 262–267.
5. Zeman S.K., Osipov A.V., Yushkov A.V. Analiz impul'sno-modulyatsionnykh sposobov regulirovaniya posledovatel'nogo rezonansnogo invertora [Analysis of pulse-modulation methods for regulating a series resonant inverter].

Silovaya elektronika [Power electronics], 2007, no. 4, pp. 88–97.

6. Bondarenko D.N., Dzljev S.V., Patanov D.A. Kommutsatsionnye protsessy v tranzistornykh invertorakh dlya induktsionnogo nagreva [Switching processes in transistor inverters for induction heating]. Izv. GETU, 1996, no. 497, pp. 98–110.

7. Gutsalyuk V.Ya., Shevchenko P.N., Slesarevskii I.O., Gerasimenko P. Yu. Chastotnyi i shirotno-chastotnyi sposoby regulirovaniya tranzistornym invertorom napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym konturom na vykhode [Frequency and wide band frequency methods of controlling a transistor inverter voltage with a series resonant circuit at the output]. Tekhnichna elektrodinamika [Technical electro-dynamics], 2006, no. 6, pp. 25–29.

8. Dzljev S.V., Patanov D. A. Kharakteristiki tranzistor-nogo rezonansnogo invertora napryazheniya pri fazovom i chastotnom regulirovanii [Characteristics of a transistor resonant voltage inverter with phase and frequency control]. Aktual'nye problemy teorii i praktiki induktsionnogo nagreva : materialy mezhdunar. konf. [Actual problems of theory and practice of induction heating: materials of international. Conf.]. 25–26 maya 2005 g., Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet im. V.I. Ul'yanova (Lenina) «LETI», SPb. Izd-vo SPbGETU «LETI», 2005, pp. 363–369.

9. Kifune H., Hatanaka Y., Nakaoka M. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications. IEE Proc.-Electr. Power. Appl., 2004, vol. 151(1), pp. 19–25.

10. Patanov D.A. Obshchie problemy snizheniya kommutatsionnykh poter' v invertorakh napryazheniya [General problems of reducing switching losses in voltage inverters]. Skhemotekhnika [Circuit design], 2001, no. 7, pp. 17–19.

11. Silkin E.M. Sposob upravleniya avtonomnym soglasovanym invertorom s kvazirezonansnoi kommutatsiei [Method for controlling an autonomous coupled inverter with quasi-resonance switching]. Patent RF, no. 2458450; zayavl. 24.07.09, opubl. 10.08.12, Byul. no. 22, 12 p.

12. Saratovskii R.M., Afanas'ev O.M., Pronchatova T.I. Sposib regulyuvannya vikhidnoi naprugi peretvoryuvacha [Method of regulating the output voltage of the converter]. Patent UA, no. u201210822; zayavl. 17.09.2012, opubl. 25.03.2013, Byul. no. 6, 7 p.

Aleksandr M. Afanasyev

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Department of Radiophysics and Electronics
Donbass State Technical University
16, Lenin Av., Alchevsk, Ukraine, 94204
Phone: +3 (8-095) 512-59-41
Email: alexandr.afanasyev@gmail.com

Yuriy M. Golembiovsky

Doctor of Engineering Sciences, professor
Department of Systems Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Polytechnic st., Saratov, Russia, 410054
Phone: +7 (845-2) 99-88-43
Email: yrmg_37@mail.ru

Anton V. Kulikov

Master, Department of Radiophysics and Electronics
Donbass State Technical University
16, Lenin Av., Alchevsk, Ukraine, 94204
Phone: +3 (8-050) 979-08-95
Email: kyl_an@mail.ua