

МРНТИ 44.29.01 : 45.37.01

А.С. Тлешова | ©



Ст. преподаватель

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-4594-5265>

Таразский университет им. М.Х. Дулати,



г. Тараз, Казахстан

akmaral.tleshova@mail.ru<https://doi.org/10.55956/ZSOA8105>

ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ИНВЕРТОРОВ

Аннотация. В статье предложен резонансный преобразователь напряжения и способы широтно-импульсного регулирования его выходного напряжения. Рассмотрены причины неэффективности регулирования выходной мощности тиристорных инверторов. Также описаны преимущества регулирования резонансных инверторов с закрытым входом выполненных на базе несимметричных ячеек. В ходе данного исследования рассмотрена схема простого несимметричного инвертора на тиристоре со встречно-параллельным диодом. Представлены результаты исследования двух методов широтно-импульсного регулирования мощности резонансных инверторов по цепи постоянного тока, а также их основные характеристики. Характеристики регулирования исследовались на математической модели резонансного инвертора, содержащего две указанные ячейки, работающие на общую нагрузку. Расчет проводился интегрированием системы дифференциальных уравнений и в результате расчета получены основные характеристики инвертора при двух способах регулирования. В результате исследования представлены возможные варианты использования рассмотренных способов регулирования.

Ключевые слова: широтно-импульсное регулирование, резонансный инвертор, мощность, тиристор, источник питания.



Тлешова, А.С. Широтно-импульсное регулирование резонансных инверторов [Текст] / А.С. Тлешова // *Механика и технологии* / Научный журнал. – 2025. – №3(89). – С.342-349. <https://doi.org/10.55956/ZSOA8105>

Введение. Существующие способы регулирования выходной мощности тиристорных инверторов: частотный, фазовый и регулирование путем изменения напряжения источника питания не всегда эффективны. Причины этого – низкая добротность нагрузки при частотном способе или принципиальная невозможность фазового регулирования для ряда схем инверторов, а также существенное усложнение схем (силовой и управления) при регулировании напряжения источника питания [1].

При работе резонансных инверторов с закрытым входом по цепи питания протекает переменная составляющая, которая определяется индуктивностью входного реактора, частотой коммутационных процессов в инверторе и его схемными особенностями. Эта переменная составляющая

может быть использована для коммутации ключа в цепи постоянного тока для широтно-импульсного регулирования мощности инвертора.

Эти свойства использованы в [2] для регулирования резонансных инверторов с закрытым входом, выполненных на базе несимметричных ячеек. Они позволяют регулировать выходную мощность инвертора путем изменения энергии, поступающей в коммутирующий контур от источника питания. Преимущества такого способа – простота и возможность регулирования при низкодобротной и чисто активной нагрузках.

Условия и методы исследований. Для пояснения принципа регулирования рассмотрим конкретную схему – простую несимметричную резонансную инверторную ячейку на тиристоре со встречно-параллельным диодом (рис. 1).

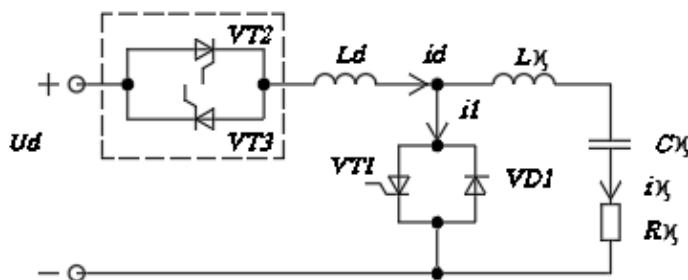


Рис. 1. Схема простого несимметричного инвертора на тиристоре со встречно-параллельным диодом

Работа инвертора описана в [2] и заключается в периодическом перезаряде коммутирующего конденсатора C_k через нагрузку z , коммутирующий реактор L_k и вентильную пару тиристор-диод VT1-VD1. Подзаряд конденсатора происходит от источника постоянного напряжения U_d через входной реактор L_d . При фиксированных параметрах схемы инвертора уменьшение индуктивности входного реактора ведет к увеличению пульсаций тока в нем и, начиная с определенного значения индуктивности, ток через реактор периодически, с частотой управления, становится отрицательным и течет обратно в источник. Вентильная пара, выполненная на тиристорах VT2-VT3 и установленная в цепи входного реактора, коммутируется обратным током, определяемым разностью потенциалов $U_{Ck} - U_d$, а регулируемая задержка на ее включение обеспечивает регулирование среднего тока, потребляемого инвертором, а следовательно, и его выходной мощности.

Второй метод регулирования основан на периодическом регулируемом разряде коммутационного конденсатора C_k после его полного заряда на источник питания. В этом случае тиристор VT2 используется в диодном включении, а VT3 осуществляет регулирование путем изменения момента начала возврата энергии коммутационного конденсатора источнику питания (рис. 1). Тиристор VT3 включается раньше инвертирующего тиристора VT1 на время опережения t_0 , которое регулируется от нуля до $T_y - T_0$, где T_0 – длительность проводящего состояния вентильной пары VT1-VD1. Изменение t_0 приводит к изменению напряжения на коммутационном конденсаторе перед очередным включением тиристора VT1 и энергии, передаваемой в нагрузку в очередном периоде работы инвертора, т.е. к регулированию выходной мощности инвертора.

Характеристики регулирования исследовались на математической модели резонансного инвертора, содержащего две указанные ячейки, работающие на общую нагрузку. Работа инвертора в обычном режиме описана в [2] и заключается в поочередном перезаряде через цепь нагрузки коммутационных конденсаторов ячеек C_k . В работе каждой ячейки принципиально существует пауза, в течение которой коммутационные конденсаторы C_k подзаряжаются от источника питания U_d через входные реакторы L_d .

В цепи каждого реактора, аналогично схеме на рисунке 1, а, установлены встречно-параллельные вентили. Принципы регулирования, описанные выше, при этом сохраняются. Регулирование мощности достигается введением схемы C_3 на выходе задающего генератора, выход которой подключается к управляющим электродам тиристоров, установленных в цепях входных токов инверторных ячеек.

Характеристики инвертора при рассматриваемых способах регулирования исследовались на математической модели, составленной на основе методики [2,3]. Система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в инверторе:

$$\begin{aligned}\frac{did1}{dt} &= K_{BX1}A_1/Ld \\ \frac{did2}{dt} &= K_{BX2}A_1/Ld \\ \frac{di_1}{dt} &= \frac{B(L_{T1}+L_{D1})-DL_{T1}}{L_{T1}L_{D2}+L_k(L_{T1}+L_{D1})} \\ \frac{di_1}{dt} &= \frac{B(L_{T2}+L_{D2})-DL_{T2}}{L_{T2}L_{D2}+L_k(L_{T2}+L_{D2})} \\ \frac{di_{T1}}{dt} &= \frac{B}{L_{T1}} - \frac{L_k}{L_{T1}} - \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_{T2}}{dt} &= \frac{B}{L_{T2}} - \frac{L_k}{L_{T2}} - \frac{di_2}{dt}\end{aligned}\tag{1}$$

Значения коэффициентов определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}A &= U_d - u_c - u_{K1} - K_{BX1}id_1(rL_d + r_{Ck}) + i_1r_{Ck}; \\ A1 &= U_d - u_{CH} - u_{K1} - K_{BX2}id_2(rL_d + r_{Ck}) + i_2r_{Ck}; \\ Q &= e_{T0}K_{T1} - r_{T1}i_{T1}(rL_k + r_{Ck}) + K_{BX1}id_1r_{Ck} + u_{K1} + 2u_{CH}; \\ B &= e_{T0}K_{T2} - r_{T2}i_2(rL_k + r_{Ck}) + K_{BX2}r_{Ck} + u_{K1} + 2u_{CH}; \\ D &= e + K_{T1} + e_{D0}K_{D1} - i_{T1}(r_{T1} + r_{D1}) + i_1r_{D1}; \\ E &= e_{T0}K_{T2} + e_{D0}K_{D2} - i_{T1}(r_{T2} + r_{D2}) + i_2r_{D2}.\end{aligned}\tag{2}$$

где, $K_{вх1}, K_{вх2}, K_{Т1}, K_{Т2}, K_{Д1}, K_{Д2}$ – переключающие функции, отражающие состояние вентилях в цепи входного тока, состояние инвертирующего тиристора и встречно-параллельного диода для первой и второй ячеек соответственно; переключающая функция равна единице, если соответствующий вентиль находится во включенном состоянии, и нулю, если вентиль выключен; $e_{т0}, r_{т}, e_{д0}, r_{д}, r_{Лд}, r_{Лк}, r_{с}$ – параметры схемы замещения силовых элементов инвертора, учитывающие их реальные свойства тиристоры, диоды, входных реакторов, коммутирующих реакторов и коммутирующих конденсаторов [3].

Результаты исследований. Расчет проводился интегрированием системы дифференциальных уравнений на ЭВМ методом Рунге-Кутты. Для конкретности исследовались процессы в схеме инвертора с частотой выходного тока 2400Гц, каждая ячейка которого содержит четыре тиристора ТБ-400 и три диода ВЧ-200. В соответствии с этим были приняты значения $I_{т0}, I_{д0}, r_{т}$ и $r_{д}$.

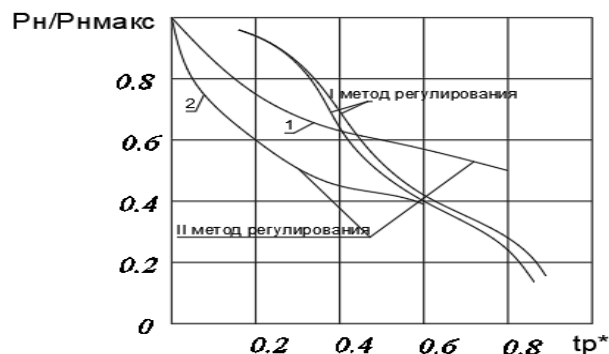


Рис. 2. Зависимость выходной мощности инвертора от времени регулирования при индуктивности входного реактора 1 мГн (1) и 0,75 мГн (2)

В результате расчета получены основные характеристики инвертора при двух способах регулирования. На рисунке 2 показана зависимость выходной мощности инвертора в функции времени. Для характеристики регулирования по первому способу времени t_p^* определялась из выражения:

$$t_p^* = \frac{t_3}{T_y} \quad (3)$$

Для второго способа

$$t_p^* = \frac{t_0}{T_y - T_0} \quad (4)$$

Мощности инвертора при $t_3 = 0$ для первого способа и при $t_0 = 0$ для второго способа регулирования максимальны и равны друг другу. При построении характеристик на рис. 2 данное значение мощности принято за базисную мощность $P_{макс}$.

При указанных значениях индуктивности реакторов (рис. 2) достижимый уровень снижения мощности при регулировании достигает 20% максимальной для первого метода и 40-50% – для второго. Дальнейшее снижение нижнего регулируемого уровня мощности требует уменьшения

индуктивности входных реакторов L_d , а также дополнительных мер по повышению устойчивости инвертора в пусковых режимах.

Обсуждение результатов исследований. Как и следовало ожидать, существенное воздействие на характеристики регулирования оказывает индуктивность входных реакторов. Чем меньше индуктивность входных реакторов, тем быстрее заряд или разряд коммутирующих конденсаторов, сильнее влияние времени на напряжение t_p^* на коммутирующих конденсаторах в момент очередного включения инверторных тиристоров, а следовательно, и на мощность инвертора. Одним из параметров, определяющих работоспособность инвертора, является время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств.

При обоих способах регулирования время, предоставляемое на восстановление тиристорам, включенным во входной цепи инвертора, всегда больше соответствующего времени для инверторных тиристоров. В свою очередь, время восстановления инверторных тиристоров определяется в основном параметрами коммутирующего контура L_k и C_k параметрами нагрузки Z_H и частотой выходного тока. Учитывая, что при рассматриваемых способах регулирования указанные параметры остаются постоянными, следует ожидать слабой зависимости времени восстановления от глубины регулирования. Расчеты подтвердили этот вывод и показали, что при снижении мощности время восстановления монотонно возрастает не более чем в 1,2 раза по сравнению с временем восстановления при максимальной мощности.

Существенное значение для эффективного использования инвертора имеет зависимость КПД от мощности инвертора. Используемые схемы замещения силовых элементов позволяют оценить потери в инверторе при регулировании. Более подробно об этом изложено в [2-7]. При регулировании во всем диапазоне КПД практически постоянен и несколько увеличивается при снижении выходной мощности. Это связано с тем, что при снижении мощности уменьшаются и выходной ток инвертора, и напряжение на его элементах, в отличие от частотного способа, при котором достигается регулирование только выходного напряжения, в то время как выходной ток остается практически постоянным.

Поэтому при рассматриваемых способах регулирования снижение выходной мощности вызывает пропорциональное снижение мощности потерь в инверторной части схемы. Учитывая, что мощность инвертора пропорциональна среднему значению тока, потребляемому от источника питания, а мощность потерь во входных реакторах L_d пропорциональна квадрату действующего тока, и предполагая, что коэффициент формы входного тока при регулировании остается постоянным, нетрудно видеть, что мощность потерь в реакторе L_d снижается быстрее, чем выходная мощность инвертора. Поэтому при регулировании наблюдается некоторое повышение КПД инвертора в целом.

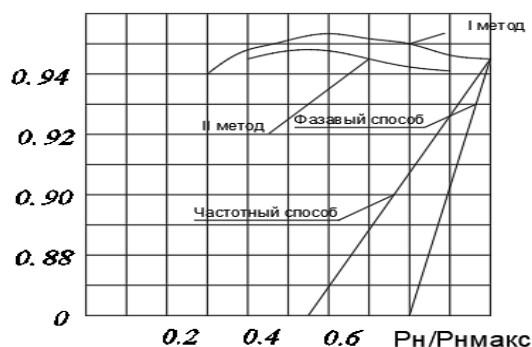


Рис. 3. Зависимости коэффициента полезного действия инвертора при различных методах регулирования

Для сравнения на рисунке 3 приведена зависимость КПД при регулировании мощности для частотного и фазового способов управления.

$$P_{BX} = P_H + \sum_{i=1}^n P_{pi} \quad (5)$$

где, P_{pi} – потери мощности в элементах силовой схемы инвертора.

Потери остальных элементов оказывают слабое влияние на к.п.д. инвертора, в связи с чем эти зависимости не приводятся. Указанное свойство данного способа регулирования по сравнению, например, с частотным регулированием, является существенным и практически ценным. С позиции лучших характеристик регулирования предпочтительным является первый метод регулирования, т.е. регулирование изменением напряжения на коммутирующих конденсаторах только в стадии заряда.

Заключение. На основании проведенного исследования можно выделить возможные варианты использования рассмотренных способов регулирования:

1. Основной вид регулирования. При этом характеристики регулирования определяются зависимостями, представленными на рисунках 2, 3.

2. Вспомогательный вид регулирования, например, совместно с частотным способом. В этом случае эти способы применяются при пониженных мощностях нагрузки, когда ток реакторов становится прерывистым. При этом характеристики регулирования могут быть существенно улучшены благодаря большому диапазону регулирования и снижению реактивной мощности входных реакторов.

Список литературы

1. Розанов, Ю.К. Силовая электроника [Текст]: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 704 с.
2. Томашевский, Д.Н. Автономные инверторы [Текст]: учебное пособие / Д.Н. Томашевский. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – 120 с.
3. Андреев, Ю.А. Измерительная аппаратура на транзисторах [Текст]: учебник / Ю.А. Андреев, Б.Г. Волков. – Москва : Энергия, 2015. – 755 с.
4. Важенина, З.П. Импульсные генераторы на транзисторах [Текст]: учебник / З.П. Важенина. – Москва: Энергия, 2013. – 128 с.

5. Воронков, Э.Н. Основы проектирования усилительных и импульсных схем на транзисторах [Текст]: учебник / Э.Н. Воронков, Ю.А. Овечкин. – Москва: Машиностроение, 2015. – 312 с.
6. Демьянов, В.В. Любительские телевизоры на транзисторах [Текст]: учебник / В.В. Демьянов. – Москва: Книга по Требованию, 2012. – 992 с.
7. Куликов, С.В. Дискретные преобразователи сигналов на транзисторах [Текст]: учебник / С.В. Куликов, Б.В. Чистяков. – Москва: Энергия, 2015. – 288 с.

Материал поступил в редакцию 06.01.25, принят 17.05.25.

А.С. Тлешова

М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., Қазақстан

РЕЗОНАНСТЫ ИНВЕРТОРДЫ ЕНДІК-ИМПУЛСТІ РЕТТЕУ

Аңдатпа. Мақалада резонанстық кернеу түрлендіргіші және оның шығыс кернеуін импульстің ені бойынша реттеу әдістері ұсынылған. Тиристорлық инверторлардың шығыс қуатын реттеудің тиімсіздігінің негізгі себептері қарастырылды. Сондай-ақ, асимметриялық ұяшықтар негізінде жасалған жабық кірісті резонанстық инверторларды реттеудің артықшылықтары сипатталған. Осы зерттеу барысында қарама-қарсы параллель диодты тиристордағы қарапайым асимметриялық инвертордың схемасы қарастырылды. Резонанстық инверторлардың тұрақты ток тізбегіндегі қуатын импульстің реттеудің екі әдісінің зерттеу нәтижелері, сондай-ақ олардың негізгі сипаттамалары келтірілген. Реттеу сипаттамалары жалпы жүктемеде жұмыс істейтін екі көрсетілген ұяшықтан тұратын резонанстық инвертордың математикалық моделінде зерттелді. Есептеу дифференциалдық теңдеулер жүйесін интеграциялау арқылы жүргізілді және есептеу нәтижесінде екі реттеу әдісімен инвертордың негізгі сипаттамалары алынды. Зерттеу нәтижесінде қарастырылған реттеу әдістерін қолданудың мүмкін нұсқалары келтірілген.

Тірек сөздер: кеңейтілген импульсті реттеу, резонанстық инвертор, қуат, тиристор, қорек көзі.

A.S. Tleshova

M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan

PULSE-WIDTH CONTROL OF RESONANT INVERTERS

Abstract. The article proposes a resonant voltage converter and methods for pulse-width regulation of its output voltage. The reasons for the inefficiency of regulating the output power of thyristor inventories are considered. The advantages of regulating resonant inverters with a closed input based on asymmetric cells are also described. In the course of this study, the scheme of a simple asymmetric inverter on a thyristor with a counter-parallel diode is considered. The results of a study of two pulse-width power control methods for resonant inverters in a DC circuit, as well as their main characteristics, are presented. The control characteristics were studied using a mathematical model of a resonant inverter containing two specified cells operating at a common load. The calculation was carried out by integrating a system of differential equations, and as a result of the calculation, the main characteristics of the inverter were obtained with two control methods. As a result of the study, possible options for using the considered methods of regulation are presented.

Keywords: pulse width regulation, resonant inverter, power, thyristor, power supply.

References

1. Rozanov, Yu.K., Ryabchitskiy, M.V., Kvasnyuk, A.A. Silovaya elektronika [Power Electronics]: textbook for Universities. – Moscow: Publishing House MEI, 2016. – 704 p. [in Russian].
2. Tomashevskiy, D.N. Avtonomnye invertory [Autonomous Inverters]: Study Guide. – Yekaterinburg: Ural University Press, 2019. – 120 p. [in Russian].
3. Andreev, Yu.A., Volkov, B.G. Izmeritel'naya apparatura na tranzistorakh [Measuring Equipment Based on Transistors]: textbook. – Moscow: Energiya, 2015. – 755 p. [in Russian].
4. Vazhenina, Z. P. Impul'snye generatory na tranzistorakh [Pulse Generators on Transistors]: textbook. – Moscow: Energiya, 2013. – 128 p. [in Russian].
5. Voronkov, E.N., Ovechkin, Yu.A. Osnovy proektirovaniya usilitel'nykh i impul'snykh skhem na tranzistorakh [Fundamentals of Designing Amplifying and Pulse Circuits on Transistors]: textbook. – Moscow: Mashinostroenie, 2015. – 312 p. [in Russian].
6. Demyanov, V. V. Lyubitelskie televizory na tranzistorakh [Amateur Televisions on Transistors]: textbook. – Moscow: Book on Demand, 2012. – 992 p. [in Russian].
7. Kulikov, S.V., Chistyakov, B.V. Diskretnye preobrazovateli signalov na tranzistorakh [Discrete Signal Converters on Transistors]: textbook. – Moscow: Energiya, 2015. – 288 p. [in Russian].