ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1086-1094

ANALYSIS OF EMPLOYMENT CURRENT SOURCE INVERTERS IN ELECTRICAL PROPULSION SYSTEMS

V. V. Romanovskiy, B. V. Shnyak, A. G. Gostev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In article questions of use in propulsion electrical units of frequency converters, perspective for powerful electrical machines, on the basis of current inverters are considered. For them there are, as we know, two features. The first, that has to stand on an entrance of the inverter inductance, infinite in size, then the entrance chain of the inverter will represent a source of a direct current. In practice it is enough that the inductive resistance of a throttle by 5-6 times exceeded on an absolute value at the minimum working frequency an active component of resistance of loading. In the course of switching of thyristor at the exit of the thyristor switchboard "variable" current, to be exact - rectangular impulses of a direct current of opposite polarity will take place. The second feature is that the chain with an internal dynamic resistance close to zero has to be loading of the inverter to pass rectangular impulses of current with the minimum distortions. For this purpose parallel to loading the condenser shunting loading at the time of emergence of fronts of impulses turns on. Thus, the output chain of the inverter of current on properties is close to tension source at the moments of switchings. The basic principles of creation of schemes of inverters of current (CSI) are considered. Circuit decisions for one - and three-phase current inverters, and also for the inverter of current of ship execution are analysed. The principle of operation of the converter of frequency like PowerFlex is considered. It is shown that improvement of a form of output current of the inverter is reached due to formation of each half-cycle of current in the form of sequence of impulses of current which duration changes under the trapezoidal law. Such algorithm of management is simply realized taking into account feature of the three-phase inverter of current – existence included at any moment one gate of cathodic group of the bridge of the inverter and one gate of anode group. The main characteristics of inverters of current and settlement formulas for a choice of their power elements are provided. Use in inverters of current of pulse-width modulation and thiristor of SGCT. Choice of basic elements of the schemes CSI. On the example of the converters of frequency installed in the scheme of the main current of system of electric motion of the m/v "Academician Treshnikov" uniform electro-installation merits and demerits of inverters of current are analysed. Characteristics of converters are provided.

Keywords: frequency converters, current inverters, rowing electrical units, scientific-research ship.

For citation:
Romanovskiy, Victor V., Boris V. Shnyak, and Alexey G. Gostev. "Analysis of employment current source inverters in electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1086–1094. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1086-1094.

УДК 621.12.001

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРОВ ТОКА В ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

В. В. Романовский, Б. В. Шняк, А. Г. Гостев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматриваются вопросы использования в гребных электрических установках перспективных для мощных электрических машин преобразователей частоты на основе инверторов тока. Рассмотрены особенности преобразователей. Одна из них состоит в том, что на входе инвертора теоретически должна стоять бесконечная по величине индуктивность, тогда входная цепь инвертора будет представлять собой источник постоянного тока. На практике достаточно, чтобы индуктивное сопротивление дросселя в 5 – 6 раз превышало по абсолютной величине на минимальной рабочей частоте активную составляющую сопротивления нагрузки. В процессе переключения тиристоров на выходе ти-

ристорного коммутатора будет иметь место «переменный» ток, а точнее, прямоугольные импульсы постоянного тока противоположной полярности. Вторая особенность заключается в том, что нагрузкой инвертора должна быть цепь с внутренним динамическим сопротивлением близким к нулю, чтобы пропускать прямоугольные импульсы тока с минимальными искажениями. С этой целью параллельно нагрузке включается конденсатор, шунтирующий нагрузку в момент возникновения фронтов импульсов. Таким образом, выходная цепь инвертора тока по свойствам близка к источнику напряжения в моменты переключений. Рассмотрены основные принципы построения схем инверторов тока (CSI). Проанализированы схемные решения для одно- и трехфазных инверторов тока, а также для инвертора тока судового исполнения. Рассмотрен принцип работы преобразователя частоты типа PowerFlex. Показано, что улучшение формы выходного тока инвертора достигается за счет формирования каждого полупериода тока в виде последовательности импульсов тока, длительность которых изменяется по трапецеидальному закону. Такой алгоритм управления просто реализуется с учетом особенности трехфазного инвертора тока — включенных в любой момент времени одного вентиля катодной группы моста инвертора и одного вентиля анодной группы. Приведены основные характеристики инверторов тока и расчетные формулы для выбора их силовых элементов. Описано использование в инверторах тока широтно-импульсной модуляции и тиристоров SGCT. Осуществлен выбор основных элементов схем CSI. На примере преобразователей частоты, установленных в схеме главного тока системы электродвижения единой электроэнергетической установки научно-исследовательского судна «Академик Трешников», проанализированы достоинства и недостатки инверторов тока. Приведены характеристики преобразователей.

Ключевые слова: преобразователи частоты, инверторы тока, гребные электрические установки, единые электроэнергетические системы, научно-исследовательские суда.

Для цитирования:
Романовский В. В. Анализ использования преобразователей частоты на основе инверторов тока в гребных электроустановках / В. В. Романовский, Б. В. Шняк, А. Г. Гостев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1086–1094. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1086-1094.

Введение

Применение на морском флоте все более мощных электрических машин, достигающих 30 – 40 МВт с перспективой увеличения единичной мощности, заставляет использовать мощные преобразователи электроэнергии. В настоящее время на судах морского флота нашли широкое применение преобразователи частоты со звеном постоянного тока. Такие преобразователи имеют возможность организовывать распределенные шины постоянного тока, которые используются также для привода мощных электроприводов, обеспечивающих маневренность, производственные нужды и безопасность работы судна. Прежде всего, это подруливающие устройства, грузовые насосы и компрессоры, пожарные насосы и лафеты [1] – [3]. По прогнозу компании *ABB* инверторы тока целесообразно применять в основном для больших мощностей и высоких напряжений, как показано на диаграммах (рис. 1). Рабочие напряжения современных судовых инверторов могут достигать 10 кВ, а мощности — 50 МВт.

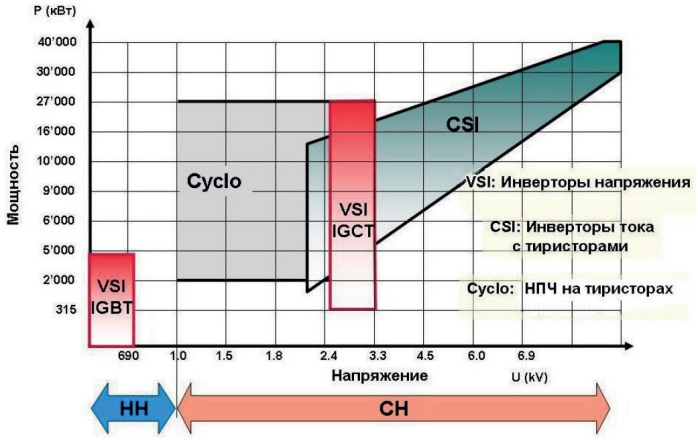


Рис. 1. Диапазоны напряжений и мощностей, при которых целесообразно применять различные типы инверторов и преобразователей частоты на их основе

Методы и материалы

Инвертор тока — CSI (Current Source Inverter) — схемотехнически являлся наиболее простым по конструкции и не требовал поначалу сложной элементной базы. У него существуют две особенности:

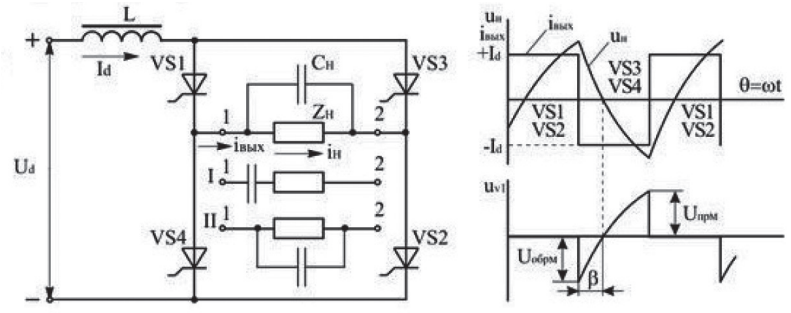
– на входе инвертора теоретически должна стоять бесконечная по величине индуктивность, тогда входная цепь инвертора будет представлять собой источник постоянного тока. На практике достаточно, чтобы индуктивное сопротивление дросселя в 5 – 6 раз превышало по абсолютной величине на минимальной рабочей частоте активную составляющую сопротивления нагрузки. В процессе переключения тиристоров на выходе тиристорного коммутатора будет иметь место «переменный» ток, а точнее, прямоугольные импульсы постоянного тока противоположной полярности;

– нагрузкой инвертора должна быть цепь с внутренним динамическим сопротивлением, близким к нулю, чтобы пропускать прямоугольные импульсы тока с минимальными искажениями. С этой целью параллельно нагрузке включается конденсатор, шунтирующий нагрузку в момент возникновения фронтов импульсов. Таким образом, выходная цепь инвертора тока по свойствам близка к источнику напряжения в моменты переключений.

Форма выходного тока $i_н$ определяется только порядком переключения тиристоров, а форма напряжения $u_н$ зависит от характера нагрузки. Автономные инверторы могут работать с естественной и искусственной коммутацией. Естественная коммутация автономного инвертора имеет место при его работе на перекомпенсированные синхронные двигатели, на статорные обмотки вентильного двигателя и др. Однако чаще всего в автономных инверторах, выполненных на тиристорах, применяется искусственная коммутация вентилей.

Общая нагрузка инвертора тока должна иметь емкостный характер. При этом конденсатор $C_н$ должен компенсировать не только реактивную мощность нагрузки $Z_н$, но и инвертора (рис. 2, *а*). Последнее означает, что при условии мгновенной коммутации тиристоров к запираемому вентилю должно быть приложено отрицательное напряжение в течение времени, определяемого углом $\beta = \delta$ и необходимого для восстановления его управляющих свойств. Напряжение на конденсаторе $u_{Cн}$ равно напряжению на нагрузке и на тиристоре U_{v1}. При регулировании частоты выходного тока необходимо изменять емкость конденсатора $C_н$ обратно пропорционально квадрату частоты для сохранения постоянства угла δ. Это приводит к очень большой величине емкости при низких частотах. Поэтому схема, представленная на рис. 2, *б* практически не применяется, а используются более сложные схемы.

а)



б)

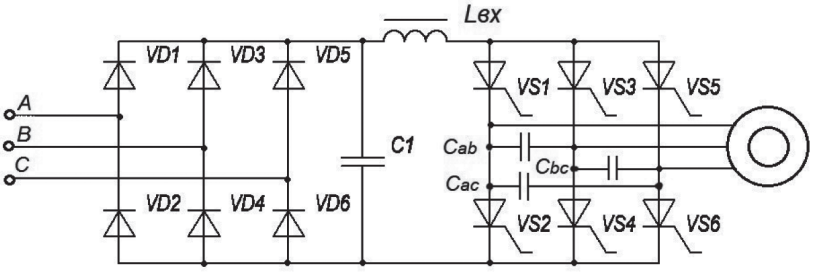


Рис. 2. Инверторы тока:
а — однофазный инвертор тока и диаграммы напряжений и токов, поясняющие его работу;
б — трехфазный инвертор тока с коммутирующими конденсаторами

Для улучшения качества выходного сигнала инвертора применяют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) [4] – [6]. Часто для большего эффекта применяют амплитудно-широтную модуляцию (АШИМ), как это сделано в многоуровневых инверторах, используемых на судах [7], [8].

Приведенная на рис. 3 схема преобразователя частоты (ПЧ) применяется на морских судах для напряжений 6000 – 6600 В в преобразователях частоты Power FlexTM 7000. ПЧ имеет на входе выпрямитель с ШИМ (с активным фильтром) (Active Front End AFE rectifier), а на выходе — инвертор тока с ШИМ. Единая электроэнергетическая система (ЕЭЭС) научно-экспедиционного судна «Академик Трешников» [9] состоит:

– из трех главных дизель-генераторов (ДГ) фирмы «Алконза» (Испания), первый тип NIR 90\104B-10QLW — 4200 кВт, второй и третий тип NIR 100\115B-10QLW — 6300 кВт, частота вращения – 600 об\мин, все машины с двумя подшипниками скольжения;

– из двух гребных синхронных электродвигателя (ГЭД) типа NIM 180130B-32QFLW мощностью по 7000 кВт с номинальной частотой вращения 177 об/мин.

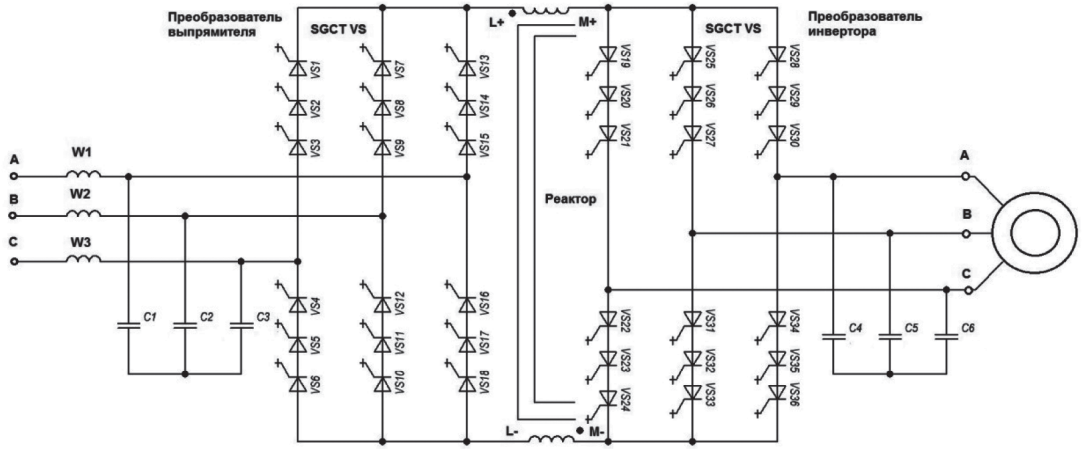


Рис. 3. Схема преобразователя частоты на основе инвертора тока и ШИМ

Для ГЭД установлены выносные подшипники скольжения, также каждый ГЭД имеет по две независимых статорных обмотки, расположенных в одной плоскости синфазно, а каждый ротор ГЭД имеет явно выраженные полюса. В составе ЕЭЭС — четыре преобразователя частоты Power Flex 7000 мощностью 4000 кВт. Каждый работает на свою статорную обмотку. При этом не предусмотрены согласующие силовые трансформаторы. Таким образом, каждый из двух синхронных гребных электродвигателей [10] получает питание от двух преобразователей частоты на свою обмотку статора. Такое схемное решение обеспечивает высокую структурную надежность гребной электроустановки (рис. 4).

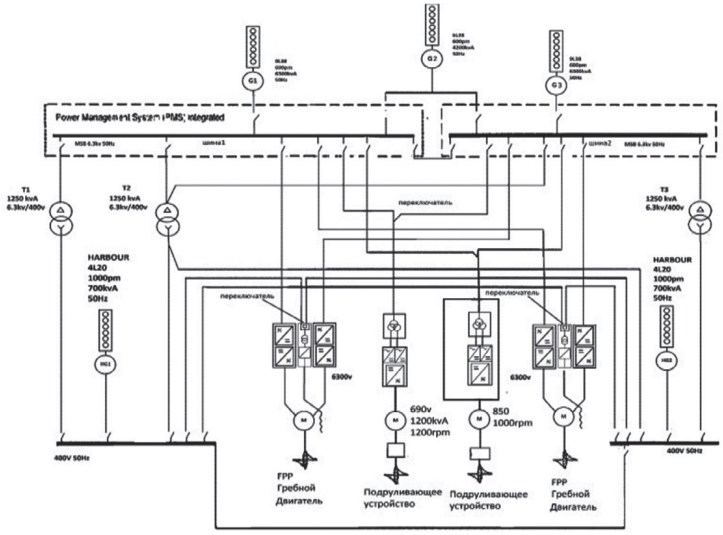


Рис. 4. Схема главного тока НЭС «Академик Трешников»

Power FlexTM 7000 является представителем третьего поколения высоковольтных приводов (по отечественной и международной терминологии «Преобразователи частоты» — ПЧ) компании *Rockwell Automation*. В схеме ПЧ применены тиристоры с симметричным управляющим электродом SGCT (Symmetrical Gate Commutated Thyristor). SGCT — модификация запираемого тиристора (GTO — Gate Turn-Off thyristor) с интегрированным драйвером. Размещение драйвера вблизи от SGCT определяет низкую индуктивность цепи управления, что обеспечивает более однородное и эффективное управление силовым коммутирующим прибором. Тиристор SGCT имеет такие же характеристики, как и прибор IGCT, они используются в ряде ПЧ, однако SGCT обладает способностью держать (блокировать) напряжение до 6500 В не только в прямом, но и обратном направлениях за счет NPT-структуры (Non-Punch-Through Structure — непробиваемая структура) с почти симметричным PNP транзистором в подложке, в то время как ток течет в одном направлении.

Результаты

Применение тиристоров SGCT в преобразователях типа PowerFlex 7000L дает существенные преимущества, включая [11]:

– упрощение конструкции цепей и уменьшение емкости конденсатора почти в 10 раз;

– формирование ШИМ при более высокой частоте модуляции (420 – 540 Гц), и, следовательно, уменьшение размеров пассивных компонентов (реактора звена постоянного тока и конденсаторов фильтра двигателя) на 50 %;

– улучшение в целом характеристик электромагнитных и электромеханических переходных процессов в электроприводе;

– уменьшение числа компонентов и увеличение надежности, снижение размеров преобразователя частоты.

Работа многофазного инвертора для каждой фазы аналогична работе однофазного инвертора, приведенного на рис. 2. Когда открыты *VS1* и *VS2*, ток течет слева направо. При этом коммутирующий конденсатор заряжается до величины напряжения U_d. На левой обкладке конденсатора будет «плюс». Ток через конденсатор течет только в момент коммутации, поэтому его и называют *коммутирующим*. Как только откроются тиристоры *VS3* и *VS4* (на схеме — после *VS1* и *VS4* для C_{ab} — *VS3* и *VS2*), открытые до этого тиристоры окажутся под действием обратного (запирающего) напряжения U_c и начнут запираться. Поэтому в схемах обычных инверторов тока могут использоваться простые незапираемые тиристоры. Несколько сложнее процесс происходит в инверторах с ШИМ (см. рис. 4). Здесь необходимы запираемые тиристоры, так как для модуляции необходимо принудительное запирание тиристоров инвертора по заданному блоком управления алгоритму. Поэтому в Power Flex 7000L, например, и применяют тиристоры SGCT.

Улучшение формы выходного тока инвертора достигается за счет формирования каждого полупериода тока в виде последовательности импульсов тока, длительность которых изменяется по трапецеидальному закону (рис. 5). Такой алгоритм управления просто реализуется с учетом особенности трехфазного инвертора тока — наличия включенными в любой момент времени одного вентиля катодной группы моста инвертора и одного вентиля анодной группы.

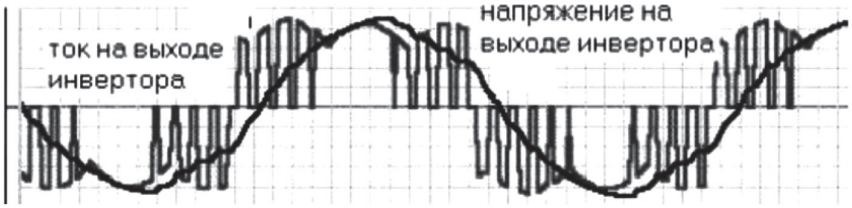


Рис. 5. Напряжение и ток на выходе инвертора с ШИМ

Конденсаторы *C* на выходе инвертора выполняют функцию «энергетического буфера» между импульсами тока, которым по выходу является инвертор тока, и нагрузкой $Z_н$, как правило,

имеющей индуктивный импеданс (индуктивности рассеивания трансформаторов, асинхронных двигателей), не допускающий скачков тока в них. Поэтому графики напряжения и тока гребного двигателя (для одной фазы) имеют вид, представленный на рис. 6.

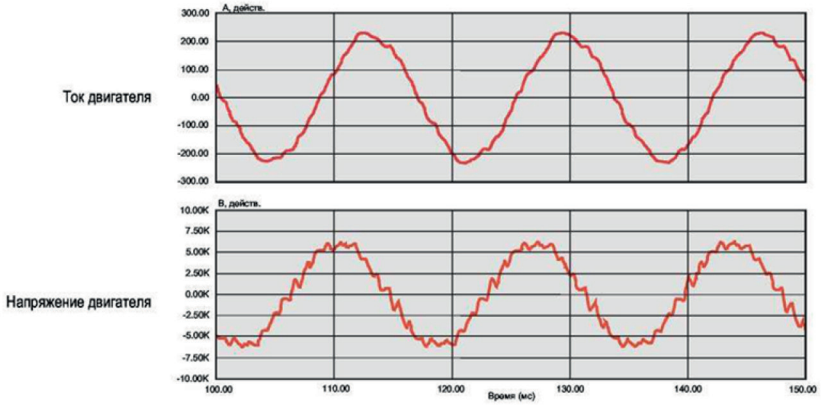


Рис. 6. Форма тока и напряжения двигателя при полной нагрузке и номинальной скорости

В зависимости от того, как включен конденсатор по отношению к нагрузке, инверторы тока и напряжения разделяются на *параллельные*, *последовательные* и *последовательно-параллельные*. В параллельном инверторе коммутирующий конденсатор подключается параллельно нагрузке.

Внешняя характеристика (рис. 7) инвертора имеет вид:

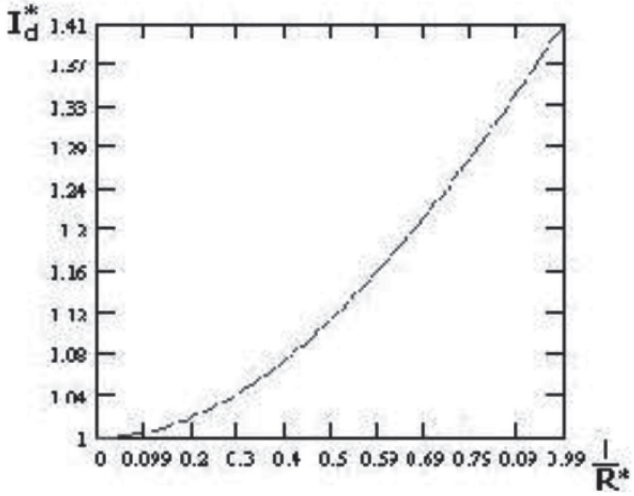


Рис. 7. Внешняя характеристика инвертора тока

В режиме холостого хода, когда конденсатор C заряжается до напряжения U, инвертор не работает, так как тиристоры перестают открываться. При большом токе нагрузки, когда напряжение на конденсаторе C быстро уменьшается (сокращается время t_c), может произойти опрокидывание, т. е. тиристоры, выходящие из работы, не успеют закрыться. При опрокидывании ток в цепи будет ограничен только активным сопротивлением дросселя L. Следовательно, автономный инвертор тока может работать в ограниченном диапазоне токов нагрузки. Время t_c, выраженное в долях синусоиды выходного переменного напряжения, можно рассматривать как угол β. Для нормальной работы инвертора должно выполняться условие

$$\beta \geq \omega\, t_{\text{выкл}}. \qquad (1)$$

Угол β можно также выразить следующим образом:

$$\operatorname{tg}\beta = Y / Y_{\text{н}} \cos\varphi - \operatorname{tg}\varphi_{\text{н}}, \qquad (2)$$

где $Y_C = wC$ — модуль проводимости конденсатора C; $Y_н = 1/Z_н$ — модуль проводимости нагрузки; $\varphi_н = \text{arctg}\, X_н / R_н$.

Напряжение на нагрузке и необходимую величину ёмкости конденсатора C можно представить в виде функций параметров нагрузки, полученных из баланса активных и реактивных мощностей:

$$P_н = U_d I_d = U_н I_н \cos\beta;$$

$$Q_н = P_н \operatorname{tg}\beta;$$

$$Q_и = Q_{C\,-}\, Q_н = U^2_н \omega\, C - P_н \operatorname{tg}\varphi_н,$$

где $P_н$ — активная мощность нагрузки; Q_C — реактивная мощность конденсатора C; $Q_н$ — реактивная мощность нагрузки; $Q_и$ — реактивная мощность, потребляемая инвертором.

Действующее значение переменного напряжения основной гармоники в нагрузке

$$U_н = \pi / 2(\sqrt{2} \cdot U_d) / \cos\beta.$$

Учитывая выражение (2), также можно записать

$$U_н = \pi / 2\sqrt{1 + \omega C / (Y_н \cos\varphi_н - \operatorname{tg}\varphi_н)^2}. \quad (3)$$

Необходимая величина ёмкости конденсатора C может быть вычислена по формуле

$$C = P_н(\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\varphi_н) / \omega\, U^2_н. \quad (4)$$

Частота выходного переменного напряжения в инверторах тока не может изменяться в широких пределах, так как индуктивность дросселя L имеет конечное значение, и с уменьшением частоты дроссель уже не сможет поддерживать в схеме режим генератора тока (рис. 8).

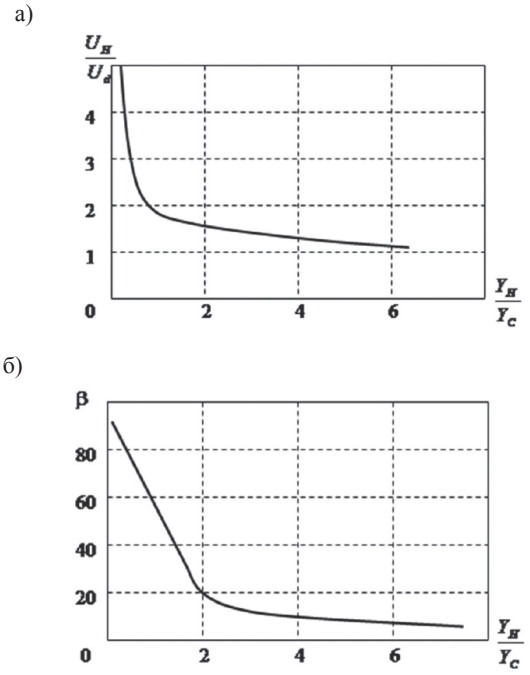


Рис. 8. Зависимости выходного напряжения инвертора (*а*) и угла β (*б*) от параметров нагрузки и величины ёмкости конденсатора C

Заключение

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы относительно инвертора тока:

– не допускает режимов холостого хода и имеет ограничение по предельному значению тока нагрузки;

– имеет внешнюю характеристику с участком резкого спада напряжения;

– имеет форму выходного напряжения, зависящую от величины нагрузки (треугольная форма в режимах, близких к холостому ходу, и синусоидальная — в режимах предельных нагрузок);

– является инерционным преобразователем, так как скорость изменения режима определяется скоростью изменения тока в реакторе с большой индуктивностью *Ld*;

– недостаточно рационален для получения низких частот выходного напряжения, так как при этом возрастают массогабаритные показатели реактора и конденсатора.

Для ослабления влияния этих недостатков или даже устранения некоторых из них обычно модифицируют классическую схему (так называемого *параллельного инвертора тока*) за счет следующих преобразований:

– введения дополнительных конденсаторов на выходе инвертора;

– введения *отсекающих вентилей*;

– введения *вентилей обратного тока*;

– введения тиристорно-индуктивного регулятора;

– введения необходимых для гребной электроустановки обратных связей;

– применения *широтно-импульсного регулирования выходного тока* инвертора;

– применения *векторного (фазового) регулирования.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники: учебник: в 2 ч. / Г. С. Зиновьев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. — Ч. 2. — 197 с.

2. *Дмитриев Б. Ф.* Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник / Б. Ф. Дмитриев, В. М. Рябенький, А. И. Черевко, М. М. Музыка. — Архангельск: Изд-во САФУ, 2015. — 556 с.

3. *Быков А. С.* Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.

4. НЭС «Академик Трешников». Военно-технический сборник «Бастион». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://bastion-karpenko.narod.ru/22280.html (дата обращения: 20.08.2017).

5. Силовые полупроводниковые устройства в цепях электрических машин. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://books.ifmo.ru/file/pdf/386.pdf (дата обращения: 20.08.2017).

6. *Radan D.* Power electronic convertors for ship propulsion electric motors / D. Radan. — Trondheim, Norway: NTNU, 2005. — 23 p.

7. *Романовский В. В.* Гребные электрические установки для арктических ледоколов / В. В. Романовский // Морской вестник. — 2015. — № 4 (56). — С. 53–54.

8. *Гармаш Д.* Суда спасатели: новые подходы к концепции создания / Д. Гармаш, Т. Наумова, М. Темкин, П. Мартулев // Морской флот. — 2014. — № 5. — С. 36–46.

9. *Романовский В. В.* Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178.

10. *Пашин В. М.* Новые принципы построения мощных статических преобразователей гребных электрических установок / В. М. Пашин, Г. М. Свиридов // Судостроение. — 2007. — № 2. — С. 29–33.

11. Rockwell Automation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.rockwellautomation.com (дата обращения – 20.08.2017).

REFERENCES

1. Zinov'ev, G. S. *Osnovy silovoi elektroniki: Uchebnik*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000. Part 2.

2. Dmitriev, B. F., V. M. Ryaben'kii, A. I. Cherevko, and M. M. Muzyka. *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli. Uchebnik*. Arkhangel'sk: SAFU, 2015.

3. Bykov, A. S., V. V. Bashaev, V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskii. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov.* SPb.: Elmor, 2004.

4. NES «Akademik Treshnikov». Voenno-tekhnicheskii sbornik «Bastion». Web. 20 Aug. 2017< http://bastion-karpenko.narod.ru/22280.html>.

5. Silovye poluprovodnikovye ustroistva v tsepyakh elektricheskikh mashin. Web. 20 Aug. 2017 <https://books.ifmo.ru/file/pdf/386.pdf>.

6. Radan D. *Power electronic convertors for ship propulsion electric motors*. Trondheim, Norway: NTNU, 2005.

7. Romanovskiy, V. V. "Grebnye elektricheskie ustanovki dlya arkticheskikh ledokolov." *Morskoi vestnik* 4(56) (2015): 53–54.

8. Garmash, D., T. Naumova, M. Temkin, and P. Martulev. "Suda spasateli: novye podkhody k kontseptsii sozdaniya." *Morskoi flot* 5 (2014): 36–46.

9. Romanovskiy, Viktor Viktorovich, Mirza Alimovich Sjubaev, and Igor Markovich Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178.

10. Pashin, V. M., and G. M. Sviridov. "Novye printsipy postroeniya moshchnykh staticheskikh preobrazovatelei grebnykh elektricheskikh ustanovok." *Sudostroenie* 2 (2007): 29–33.

11. Rockwell Automation. Web. 20 Aug. 2017 <www.rockwellautomation.com>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *vromanovsky@mail.ru*,
romanovskiyvv@gumrf.ru

Шняк Борис Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Гостев Алексей Германович — аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovskiy, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *vromanovsky@mail.ru*,
romanovskiyvv@gumrf.ru

Shnyak, Boris V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Gostev, Alexey G. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovskiy, Victor V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_edas@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 25 августа 2017 г.
Received: August 25, 2017.