

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОЩНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ  
МНОГОУРОВНЕВЫХ КАСКАДНЫХ ИНВЕРТОРОВ  
В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ВЕНТИЛЯТОРАМИ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ**

**Цель.** Выдвинуть требования к построению мощного электропривода вентилятора главного проветривания железорудных шахт, и возможность применения мощных симметричных многоуровневых каскадных инверторов с применением мостовых H ячеек.

**Методы исследования.** При проведении рассматриваемого в статье исследования решаются путем применения, как математического аппарата так, и были использованы основные теории преобразователей электропривода, и проведено математическое моделирование.

**Научная новизна.** Разработка высоковольтных мощных преобразователей с использованием современных многоуровневых каскадных инверторов на основе H – мостовых ячеек, для возможности регулирования скорости и производительности вентиляторов главного проветривания железорудных шахт

**Практическая значимость.** Повышение энергоэффективности железорудных шахт за счет внедрения регулируемого электропривода вентилятора главного проветривания, рассмотрено возможность применения многоуровневых каскадных схем инверторов.

**Результаты.** Мировые тенденции энергоресурсосбережения, а также современные направления развития техники и технологии железорудного производства доказывают, что требуется создание регулируемого электропривода вентиляторами главного проветривания (ВГП), к которым выдвинуты общепринятые требования по безопасности, одно из главных это непрерывное обеспечение подземных работ необходимым количеством свежего воздуха. Вентиляторы главного проветривания используют мощный высоковольтный электропривод с синхронным электрическим двигателем. В данное время для регулирования производительности вентиляторами главного проветривания используются повороты лопаток, и поворот заслонок. Следует учитывать требования к созданию регулируемого электропривода с максимальной производительностью ВГП. При совершенствовании систем вентиляции на железорудных шахтах и разработке энергосберегающей части функционально-технических требований к регулируемого электропривода вентиляторами главного проветривания важно рассмотреть возможные энергосберегающие мероприятия. Одним из таких является создание мощного высоковольтного преобразователя, который позволит увеличить максимальную эффективность электропривода ВГП. В данном исследовании была рассмотрена возможность построения силового преобразователя на основе многоуровневого каскадного инвертора с использованием H – мостовых ячеек и также приведены достоинства и недостатки данных преобразователей.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, преобразователь, многоуровневый каскадный инвертор, H-мостовые ячейки, вентиляторы главного проветривания.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-153-157

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** На современном этапе проектирование и эксплуатация высоковольтных электроприводов неразрывно связаны с требованиями повышения их эффективности функционирования, что может быть достигнуто за счет обеспечения плавного регулирования частоты вращения электродвигателей. Для этого электроприводы, как правило, оснащаются высоковольтными преобразователями частоты (ВПЧ). В настоящее время существуют несколько топологий построения ВПЧ, наиболее перспективными из которых являются преобразователи, выполненные на базе многоуровневых автономных инверторов напряжения, которые наряду с делением напряжений на последовательно включенных полупроводниковых приборах обеспечивают форму выходного напряжения, приближающуюся к синусоиде [1–3].

**Анализ исследований и публикаций.** В настоящее время многие исследователи и научные коллективы занимаются исследованиями, связанными с созданием мощного высоковольтного регулируемого электропривода с синхронным двигателем. Работы в этой области в настоящее время ведутся такими отечественными и зарубежными исследователями, как Н. Донской, P. W. Hammond, W. A. Hill, R. H. Osman, N. Mohan, P. W. Wheeler, M. D. Manjrekar, G. Carrara, S. Gardella, L. M. Tolbert [1–8].

**Постановка задачи.** Исследование электропривода вентилятора главного проветривания и рассмотрение возможности создания современного мощного регулируемого высоковольтного синхронного электропривода.

**Изложение материала и результаты.** Мировые тенденции энергоресурсосбережения, а также современные направления развития техники и технологии железорудного производства доказывают, что требуется создание регулируемого электропривода вентиляторами главного проветривания (ВГП), к которым выдвинуты общепринятые требования по безопасности, т. е. непрерывного обеспечения подземных работ необходимым количеством свежего воздуха. Следует учитывать требования к созданию регулируемого электропривода с максимальной производительностью ВГП. При совершенствовании систем вентиляции на железорудных шахтах и разработке энергосберегающей части функционально-технических требований к регулируемого электропривода вентиляторами главного проветривания важно рассмотреть возможные энергосберегающие мероприятия (ВЭМ) [9,10].

В данное время для привода больших вентиляторов применяется в основном синхронные электродвигатели общепромышленного исполнения. Современный регулируемый высоковольтный синхронный электропривод должны отвечать требованиям таким как [9,10]:

максимальный КПД;

широкий диапазон плавной установки скорости вращения, момента, ускорения, угла и линейного положения;

быстрое удаление ошибок при изменении управляющих сигналов и/или помех;

максимальное использование мощности двигателя во время сниженного напряжения или тока;

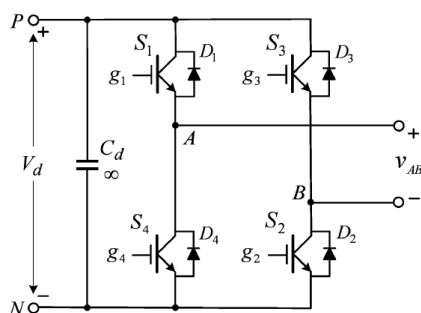
надежность, интуитивное управление.

Одним из таких решений может стать многоуровневый каскадный преобразователь основанные на модульных силовых ячейках со схемой Н-мост[1-4].

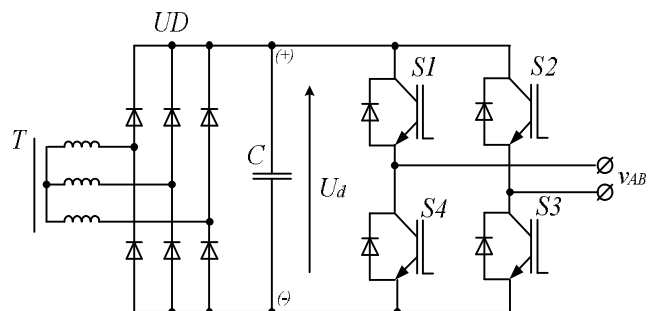
Многоуровневый преобразователь каскадного типа Н-моста – один из популярных преобразователей топологии, используемые в приводах большой мощности, среднего напряжения [1–3], которые состоят из нескольких единиц однофазных силовых элементов Н-моста. Ячейки Н-моста обычно соединены в каскад и на стороне переменного тока для достижения среднего напряжения, с не большими гармоническими искажениями. На практике количество силовых элементов в инверторе каскадного Н-моста в основном определяется его рабочим напряжением и стоимостью производства. Например, в приводах среднего напряжения с номинальным межфазным напряжением 3300 В, девятиуровневый инвертор может использоваться, инвертор каскадного Н-моста который имеет 12 силовых элементов, каждый из которых использует элементы с напряжением 600 В [1]. Использование идентичных силовых элементов приводит к модульной структуре, и является эффективным средством для снижения затрат.

Для многоуровневого инвертора каскадного Н-моста (рис.1) требуется несколько изолированных источников постоянного тока, каждый из которых питает силовые элементы Н-моста. При создании постоянного напряжения обычно используют многоимпульсные диодные выпрямители (рис.2). Для семи- и девятиуровневых преобразователей: 18- и 24-импульсные диодные выпрямители могут использоваться соответственно для достижения низкое гармоническое искажение тока в линии и высоким коэффициентом мощности на входе[4-6].

Показана упрощенная принципиальная схема однофазного инвертора Н-моста.



**Рис 1.** Однофазный Н-мостовой инвертор



**Рис 2.** Принципова схема с диодным выпрямителем однофазный Н-мостовой инвертор

Напряжение  $V_d$  шины постоянного тока инвертора обычно фиксировано, в то время как его выходное напряжение переменного тока  $v_{AB}$  можно регулировать с помощью схем биполярной или униполярной модуляции.

На рис. 3, 4 показан набор типичных сигналов инвертора Н-моста с биполярной модуляцией, где  $v_m$  - синусоидальная модулирующая волна,  $v_{cr}$  - треугольная несущая, а  $v_{g1}$  и  $v_{g3}$  - сигналы затвора для верхних переключателей  $S_1$  и  $S_3$  соответственно.

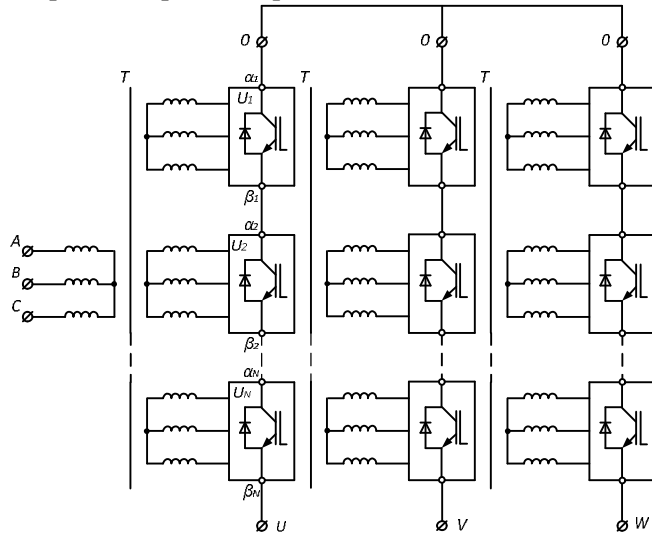


Рис. 3. Схема каскадного Н-мостового инвертора с подключением к силовому трансформатору

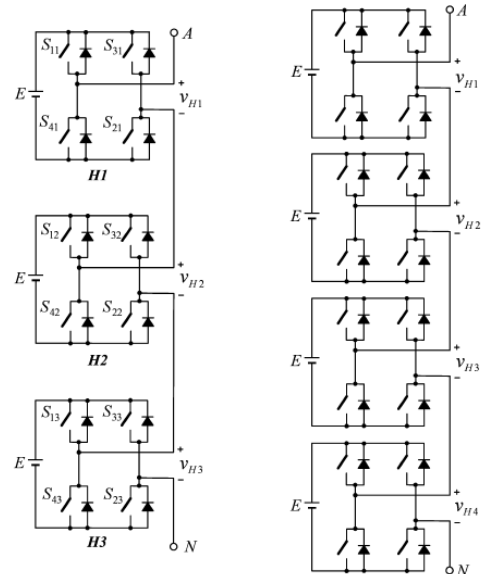


Рис. 4. Семи- и девятиуровневых преобразователей каскадного Н-мостового инвертора

Верхний и нижний переключатели в одном и том же плече инвертора работают дополняющим образом: один переключатель включен, а другой выключен. Таким образом, нам нужно рассмотреть два независимых стробирующих сигнала,  $v_{g1}$  и  $v_{g3}$ , которые генерируются путем сравнения  $v_m$  с  $v_{cr}$ . Можно получить кривые напряжений на клеммах инвертора  $v_{AN}$  и  $v_{BN}$ , из которых можно узнать выходное напряжение инвертора из  $v_{AB} = v_{AN} - v_{BN}$ . Поскольку форма сигнала  $v_{AB}$  переключается между положительным и отрицательным постоянным напряжением  $\pm V_d$ , эта схема называется биполярной модуляцией [4].

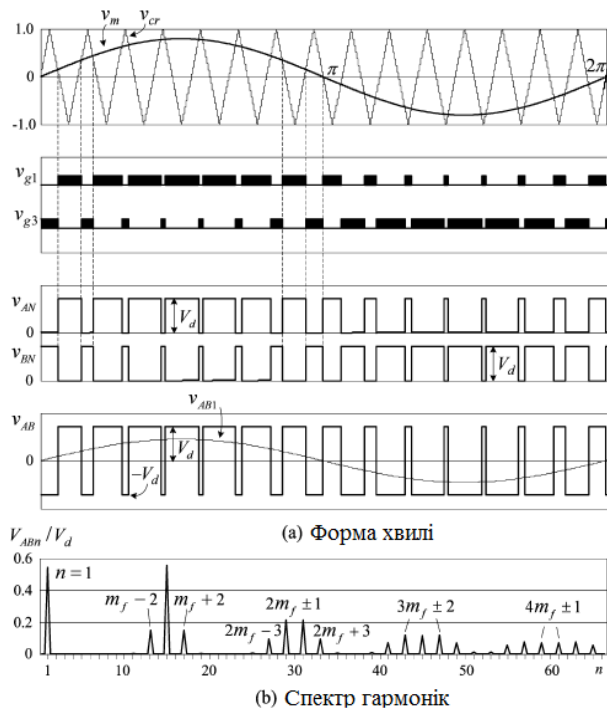


Рис. 5. Биполярный ШИМ для Н-мостового инвертора, работающего при  $m_f = 15$ ,  $m_a = 0,8$ ,  $f_m = 50 \text{ Гц}$ , и  $f_{cr} = 900 \text{ Гц}$

Спектр гармоник выходного напряжения инвертора  $v_{AB}$ , нормированного на его напряжение постоянного тока  $V_d$ , показан на рис. 5, где  $V_{ABn}$  - действующее значение гармонического напряжения  $n$ -го порядка. Гармоники отображаются в виде боковых полос, центрированных вокруг индекса частотной модуляции  $m_f$  и его кратных значений, таких как  $2m_f$  и  $3m_f$ . Гармоники напряжения с порядком ниже  $(m_f - 2)$  либо исключены, либо малы. Частота переключения IGBT-устройства, называемая частотой переключения устройства  $f_{sw,dew}$ , равна несущей частоте  $f_{cr}$ . На рис. 5 показано содержание гармоник  $v_{AB}$  в зависимости от индекса амплитудной модуляции  $m_a$ . Основное напряжение  $V_{AB1}$  (среднеквадратичное значение) линейно возрастает с ростом  $m_a$ . Доминантная гармоника  $m_f$  имеет высокую

величину, которая даже выше, чем  $V_{AB1}$  для  $m_a \leq 0.8$ . Эта гармоника вместе с ее боковыми полосами может быть устранена с помощью схемы модуляции ширины униполярного импульса [4].

Инвертор состоящий из каскадного Н-моста представлен на рис. 3 может генерировать фазное напряжение с пятью уровнями напряжения. Когда коммутаторы  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  и  $S_{22}$  проводят, выходное напряжение ячеек  $H_1$  и  $H_2$  равно  $v_{H1} = v_{H2} = E$ , а результирующее напряжение фазы инвертора равно  $v_{AN} = v_{H1} + v_{H2} = 2E$ , которое является напряжением на клемма  $A$  инвертора относительно нейтрали  $N$ . И аналогично, при включенных  $S_{31}$ ,  $S_{41}$ ,  $S_{32}$  и  $S_{42}$ ,  $v_{AN} = -2E$  [4-6].

Другими тремя уровнями напряжения являются  $E$ ,  $0$  и  $-E$ , которые соответствуют различным состояниям переключения, приведенным в табл. 1. Стоит отметить, что напряжение фазы инвертора  $v_{AN}$  не обязательно равно напряжению фазы нагрузки  $v_{AO}$ , которое является напряжением в узле  $A$  относительно нейтрали нагрузки  $O$ .

Таблица 1

Уровни напряжения и состояние переключения пятиуровневого преобразователя из каскадного Н-моста

Выходное напряжение $v_{AN}$	Состояние переключения					
	$S_{11}$	$S_{31}$	$S_{12}$	$S_{32}$	$v_{H1}$	$v_{H2}$
$2E$	1	0	1	0	$E$	$E$
$E$	1	0	1	1	$E$	0
	1	0	0	0	$E$	0
	1	1	1	0	0	$E$
	0	0	1	0	0	$E$
$0$	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0
	1	0	0	1	$E$	$-E$
	0	1	1	0	$-E$	$-E$
$-E$	0	1	1	1	$-E$	0
	0	1	0	0	$-E$	0
	1	1	0	1	0	$-E$
	0	0	0	1	0	$-E$
$-2E$	0	1	0	1	$-E$	$-E$

Из табл.1 можно наблюдать, что некоторые уровни напряжения могут быть получены более чем одним состоянием переключения. Например, уровень напряжения  $E$  может создаваться четырьмя наборами различных (избыточных) состояний переключения. Резервирование состояния переключения является обычным явлением в многоуровневых преобразователях. Это обеспечивает большую гибкость для разработки схемы переключения, особенно для схем пространственно-векторной модуляции[4].

Количество уровней напряжения в преобразователе каскадного Н-моста (КНМ) можно найти по формуле

$$m = (2H + 1), \quad (1)$$

где  $H$  - количество ячеек Н-моста на фазу. Уровень напряжения  $m$  всегда является нечетным числом для преоб-

разователя каскадного Н-моста, в то время как в других многоуровневых топологиях, таких как инверторы, с диодной фиксацией, он может быть четным или нечетным числом.

Инверторы состоящий их каскадных Н-мостовых ячеек, представленный выше, может быть создан на любое количество уровней напряжения. Структура семи- и девятиуровневых инверторов изображена на рис. 3, где у семиуровневого инвертора три каскада Н-мостиков в каскаде, а у девяти уровневых последовательно четыре ячейки. Общее количество активных переключателей (IGBT), используемых в преобразователях с каскадными Н-мостовыми ячейками, может быть рассчитано как

$$N_{sw} = 6(m - 1). \quad (2)$$

Многоуровневый инвертор КНМ имеет ряд особенностей и недостатков, в том числе: модульная структура. Многоуровневый инвертор состоит из нескольких блоков идентичных силовых элементов Н-моста, что приводит к снижению производственных затрат;

более низкий коэффициента нелинейных искажений и  $dv/dt$ . Форма выходного напряжения инвертора формируется несколькими уровнями напряжения с небольшими скачками напряжения. По сравнению с двухуровневым инвертором многоуровневый инвертор КНМ может создавать выходное напряжение с гораздо меньшими значениями коэффициента нелинейного искажения и  $dv/dt$ ;

работа с высоким напряжением выполняется последовательно без коммутационных устройств. Силовые ячейки мостового - Н соединены каскадно для создания высокого напряжения

переменного тока. Проблемы равного распределения напряжения для последовательно соединенных устройств устранены;

большое количество изолированных источников постоянного напряжения. Источники постоянного напряжения для преобразователя КНМ обычно получают от многоимпульсного диодного выпрямителя, использующего дорогой фазосдвигающий трансформатор;

большое количество компонентов. В преобразователе КНМ используется большое количество модулей IGBT. Для девятиуровневого преобразователя КНМ требуется 64 IGBT с таким же количеством драйверов для них.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Показана перспективность использования современных программных комплексов в процессе проектирования и конструирования преобразователей, что позволяет автоматизировать основные этапы их разработки. Предложенные схемотехнические решения позволили разработать и испытать высоковольтный преобразователь частоты для электропривода напряжением 6 кВ мощностью 2000 кВт. Разработанная схема с структурой H – мостовой ячейки, выполненная на базе встречнопоследовательно соединенных IGBT-модулей с обратными диодами по сравнению с аналогичными схемами является более надежной и экономичной.

#### *Список литературы*

1. **P. W. Hammond**, A New Approach to Enhance Power Quality for Medium Voltage AC Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 202–208, 1997.
2. **W. A. Hill and C. D. Harbourt**, Performance of Medium Voltage Multilevel Inverters, IEEE Industry Applications Society (IAS) Conference, Vol. 2, pp. 1186–1192, 1999.
3. **R. H. Osman**, A Medium Voltage Drive Utilizing Series-Cell Multilevel Topology for Outstanding Power Quality, IEEE Industry Applications Society (IAS) Conference, pp. 2662–2669, 1999.
4. **N. Mohan, T. M. Undeland**, et al., Power Electronics—Converters, Applications and Design, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2003.
5. **P. W. Wheeler, L. Empringham, et al.**, Improved Output Waveform Quality for Multilevel H-Bridge Chain Converters Using Unequal Cell Voltages, IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, pp. 536–540, 2000.
6. **M. D. Manjrekar, P.K. Steimer, et al.**, Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, pp. 834–841, 2000.
7. **Mokhberdorani A, Ajami A.** Symmetric and asymmetric design and implementation of new cascaded multilevel inverter topology. IEEE Trans Power Electron 2014;29(12):6712–24.
8. **Донской Н.** Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 43–46.
9. **Фащиленко В.Н.** Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. - Учеб. пособие. — М.: Горная Книга, 2011. — 260 с.
10. **Онищенко Г.Б., Юньков М.Г.** Электропривод турбомеханизмов – Москва: «Энергия», 1972. – 240 с.

Рукопись поступила в редакцию 16.04.2018

УДК 621.311.214

І.О. СІНЧУК, І.В. КАСАТКІНА, кандидати техн. наук, доценти,  
О.В. ДОЗОРЕНКО, Р.І. КРАСНОПОЛЬСЬКИЙ, аспіранти  
Криворізький національний університет

### **НОВИЙ ПОГЛЯД НА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОВІДЛИВНИХ УСТАНОВОК ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

**Мета.** Метою даної роботи є оцінка можливостей та розробка аспектів теорії підвищення ефективності споживання електричної енергії в умовах вітчизняних залізрудних шахт шляхом використання гідроаккумуляторів на основі головних насосних установок.

Для досягнення поставленої мети проаналізовані напрямки розширення кордонів функціонування головних насосних установок водовідливних систем залізрудних шахт з можливістю використання їх в режимі генераторів електричної енергії (міні гідроакмулюючих електростанцій), що дасть можливість підвищити електроенергоєфективність даних видів підприємств.