

УДК 621.313.13

**Рымша В. В.**, д-р техн. наук  
**Радимов И. Н.**, канд. техн. наук,  
**Гулый М. В.**, канд. техн. наук.  
**Матющенко А. В.**

### ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ РУДНИЧНОГО АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

***Аннотация.** Разработан вентильный электропривод для рудничного аккумуляторного электровоза типа ЭРА-П8. Представлены результаты как стендовых испытаний электровоза, так и испытаний на кольцевом полигоне с установкой двух электроприводов на электровоз. Оценена эффективность применения вентильных электроприводов по сравнению с существующими коллекторными электроприводами постоянного тока.*

***Ключевые слова.** Синхронный двигатель, постоянный магнит, электровоз, энергопотребление, обмотка, ток, векторное управление, широтно-импульсная модуляция.*

**Римша В. В.**, д-р техн. наук  
**Радимов И. М.**, канд. техн. наук,  
**Гулый М. В.**, канд. техн. наук.  
**Матющенко О. В.**

### ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ РУДНИЧНОГО АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

***Анотация.** Розроблено вентильний електропривод для рудничного акумуляторного електровоза типу ЕРА-П8. Наведено результати як стендових випробувань електровоза, так і випробувань на кільцевому полігоні з установкою двох електроприводів на електровоз. Оцінено ефективність застосування вентильних електроприводів у порівнянні з існуючими колекторними електроприводами постійного струму..*

***Ключові слова.** Синхронний двигун, постійний магніт, електровоз, енергоспоживання, обмотка, струм, векторне керування, широтно-імпульсна модуляція.*

**Rimsha V. V.**, ScD,  
**Radimov I. N.**, PhD,  
**Guliy M. V.**, PhD,  
**Matyuschenko A. V.**

### BRUSHLESS MOTOR FOR MINING BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE

***Abstract.** A brushless electric motor for mine battery-electric locomotive ERA-P8 has been developed. The results of bench tests and railway tests of battery-electric locomotive equipped with two brushless motors are exposed. The efficiency of brushless motor application compared to existing brush DC motors has been evaluated.*

***Keywords** – Synchronous motor, permanent magnet, electric locomotive, power consumption, winding, electric current, vector control, pulse width modulation.*

**Введение.** На сегодняшний день рудничные аккумуляторные электровозы во многих случаях комплектуются коллекторными электроприводами постоянного тока [1]. Этим электроприводам присущи такие недостатки, как:

- коллекторно-щеточный узел электродвигателя требует регулярного обслуживания, искрение под щетками опасно при проведении работ в шахтах;

- двойное преобразование энергии при регулировании скорости вращения электродвигателя, которое заключается в преобразовании постоянного напряжения аккумуляторной батареи в регулируемое постоянное напряжение, подаваемое на электродвигатель и, затем, коммутация в переменное напряжение на коллекторе. Такое двойное преобразование энергии снижает общий КПД электропривода.

Современный бесконтактный электропривод на базе синхронной электрической машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ПМ) - вентильный электропривод (ВЭП) - свободен от указанных недостатков и обладает характеристиками, позволяющими считать ВЭП одними из наиболее перспективных тяговых электроприводов для шахтных аккумуляторных электровозов [2].

**Цель работы.** Создание ВЭП, предназначенного для замены существующего электропривода рудничного электровоза, состоящего из коллекторного электродвигателя постоянного тока ДРТ-13 мощностью 13 кВт и преобразователя напряжения "Curtis" [3].

**Основные положения.** При создании ВЭП реализовано следующее:

- вентильный двигатель с ПМ (ВДПМ) располагается во взрывозащищенном корпусе, причем силовой инвертор и управление ВДПМ интегрированы в этот же корпус;

- присоединительные размеры ВЭП (рис. 1) полностью соответствуют присоединительным размерам электродвигателя ДРТ-13, что позволяет без каких-либо конструктивных изменений в рудничном электровозе выполнять замену ДРТ-13 на ВЭП;

- ВЭП получает питание и управляющие сигналы от системы управления электровозом (СУЭ) посредством аналогового или цифрового интерфейсов, позволяющих полностью контролировать работу электропривода.

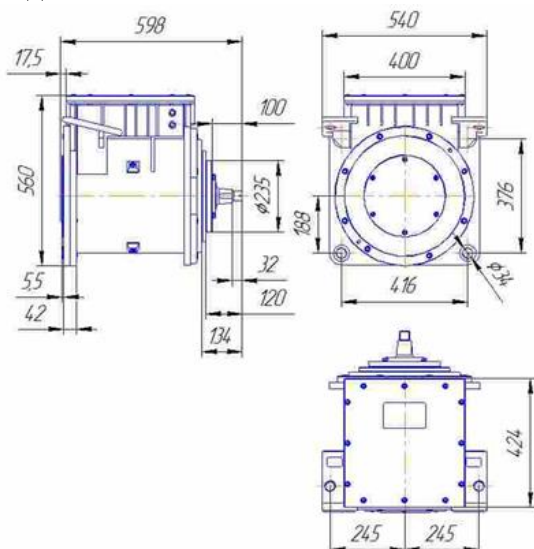


Рис. 1. Габаритные и присоединительные размеры ВЭП

На явнополюсном статоре ВДПМ располагается трехфазная катушечная обмотка с минимально возможным вылетом лобовых частей. Ротор выполнен с внутренними ПМ, что обеспечивает механическую защиту магнитов от повреждений.

В силовом инверторе ВЭП реализован принцип векторного управления, что позволяет сформировать синусоидальные токи фаз и, как следствие, получить электромагнитный момент на валу двигателя практически без пульсаций.

Силовой инвертор ВЭП обеспечивает:

- защиту от выхода напряжения батареи за пределы допустимых значений при ее разряде;

- контроль тока двигателя, температуры силовых ключей инвертора и температуры обмотки статора ВДПМ с соответствующими защитами;

- рекуперацию энергии при торможении электровоза;

- ограничение тока ВЭП при его перегрузке;

- реализацию антиблокировочной системы колес электровоза.

Регулирование частоты вращения вниз от основной осуществляется с применением векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Векторное управление позволяет реализовать ослабление магнитного поля двигателя и, таким образом, увеличить его частоту вращения вверх от основной.

Разработка и создание ВЭП осуществлено ООО "Электротехника - Новые технологии" (г. Одесса) по заказу НПП "Энергия" (г. Донецк) в 2012 году. Изготовлено два опытных образца ВЭП, один из которых представлен на рис. 2.

Испытания ВЭП проводились на стенде НПП "Энергия" и на кольцевом полигоне с установкой двух ВЭП на рудничный аккумуляторный электровоз типа ЭРА-П8. Цель испытаний - сравнение эффективности работы двух типов электроприводов: "ДРТ-13+ "Curtis" и ВЭП.

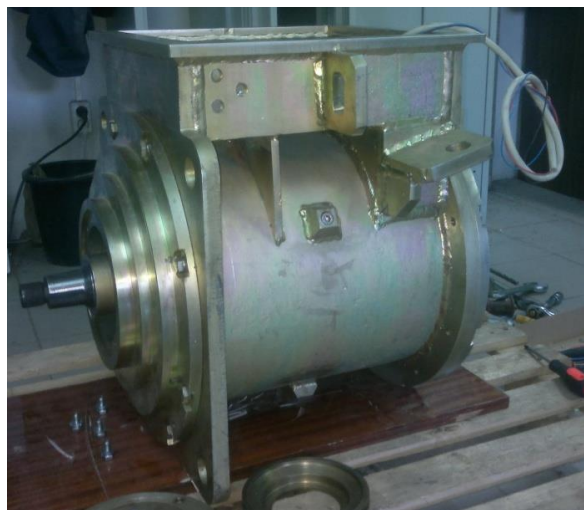
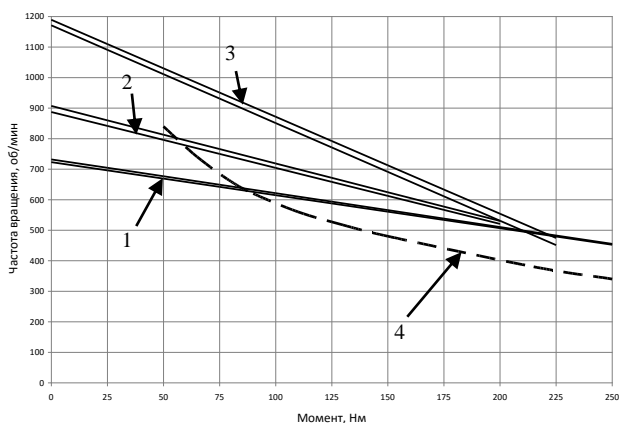


Рис. 2. Опытный образец ВЭП



1 – Основные механические характеристики ВЭП;  
 2 и 3 – Механические характеристики ВЭП с увеличением частоты вращения за счет ослабления магнитного поля двигателя;  
 4 – Механическая характеристика двигателя ДРТ-13 с преобразователем "Curtis".

Рис. 3. Механические характеристики электроприводов

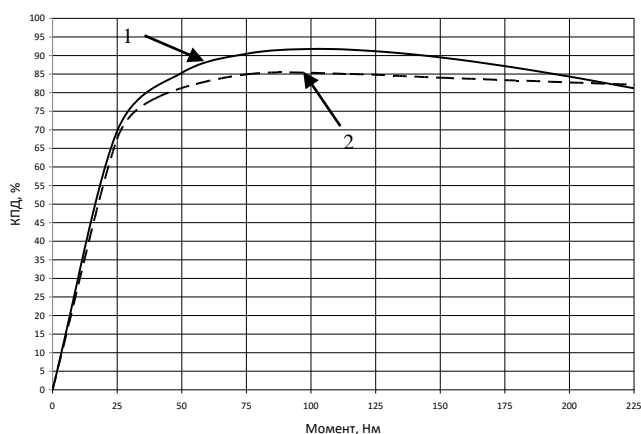


Рис. 4. Зависимости КПД ВЭП (1) и двигателя ДРТ-13 (2) от момента на валу

**Результаты испытаний на стенде и полигоне.** В результате испытаний на стенде получены механические (рис. 3) и рабочие (рис. 4) характеристики указанных выше электроприводов. Из рисунка 3 видно, что ослабление магнитного поля в ВЭП позволило получить регулирование скорости вверх от основной для достижения необходимой транспортной скорости при снижении нагрузки.

На рис. 4 представлены зависимости КПД от нагрузки для ВЭП (характеристика 1) и для собственно электродвигателя ДРТ-13 (характеристика 2 взята из ТУ 16-514.252-87). Из представленных графиков видно, что во всем диапазоне нагрузок до 200 Нм КПД ВЭП выше, чем у двигателя ДРТ-13. Кроме того, следует отметить, что КПД в системе «ДРТ-13+«Curtis»» будет проходить ниже, чем характеристика 2 на рис. 4 за счет потерь в преобразователе "Curtis".

При проведении испытаний на полигоне на электровоз с аккумуляторной батареей с номинальным напряжением 120 В установлены два ВЭП. Снаряженная масса электровоза 10 тонн. К электровозу присоединены 11 вагонеток с грузом, массой по 5,5 тонны каждая. Общая масса состава - 70,5 тонн.

В программу испытаний входило:

1. Сравнение энергопотребления, необходимого для выполнения одной и той же транспортной работы составом с ВЭП и с электроприводом «ДРТ-13 + "Curtis"».
2. Сравнение токов, потребляемых двумя ВЭП, при движении состава.
3. Сравнение потребляемого тока электроприводами при обеспечении максимального тягового усилия электровоза.

При проведении испытаний токи регистрировались с помощью аналогово-цифрового преобразователя Е14-140, а максимальное тяговое усилие, развиваемое электровозом, определялось с помощью динамометрической системы, состоящей из динамометра и троса, закрепленного с одной стороны к электровозу, а с другой стороны к неподвижному упору.

На рис. 5 представлены зависимости тока электроприводов от времени при прохождении составом двух кругов испытательного

полигона. График 1 на рис.5 принадлежит ВЭП, а график 2 - «ДРТ-13+»Curtis».

Из рис. 5 видно, что максимальное значение тока электропривода «ДРТ-13+»Curtis» достигает 200А, в то время как это значение для ВЭП не превышает 140 А.

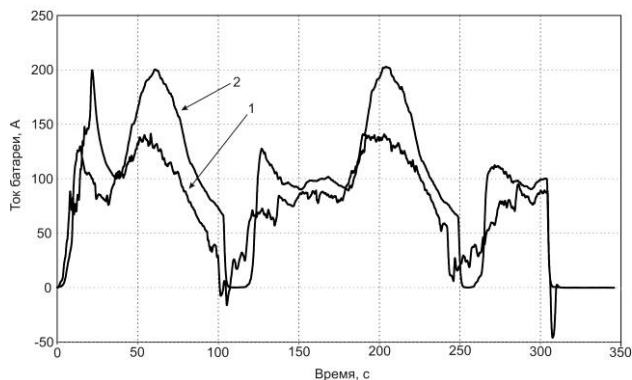


Рис. 5. Зависимости тока электроприводов от времени движения: 1- ВЭП; 2- ДРТ-13+»Curtis»

Среднее значение тока при выполнении одной и той же транспортной работы при прохождении составом двух кругов испытательного полигона с электроприводом «ДРТ-13+»Curtis» составило 103,2 А, в то время как для ВЭП – 78,9 А. Как видно из полученных данных, при выполнении одной и той же транспортной работы ВЭП требуется почти на четверть меньше затрат электроэнергии в сравнении с электроприводом «ДРТ-13+»Curtis».

На рис. 6 приведены зависимости токов, потребляемых каждым из двух ВЭП, от времени при прохождении составом двух кругов испытательного полигона.

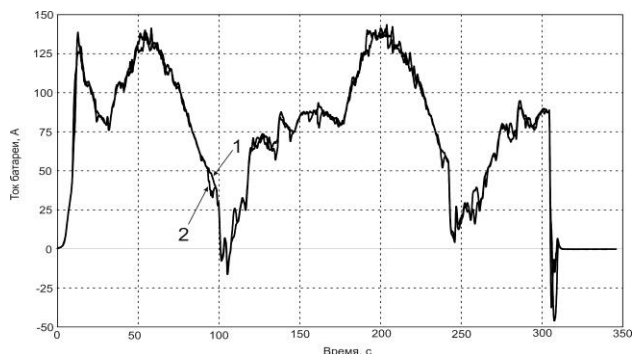


Рис. 6. Зависимости тока ВЭП от времени движения

Из графиков на рис. 6 видно, что токи двух электроприводов (зависимости 1 и 2) практически совпадают, т.е. двигатели при движении состава нагружены одинаково.

На рис. 7 приведены зависимости токов аккумуляторной батареи от времени для первого (1) и второго (2) ВЭП, а на рис. 8 - аналогичные зависимости для электропривода «ДРТ-13+»Curtis» при определении максимальной силы тяги электровоза.

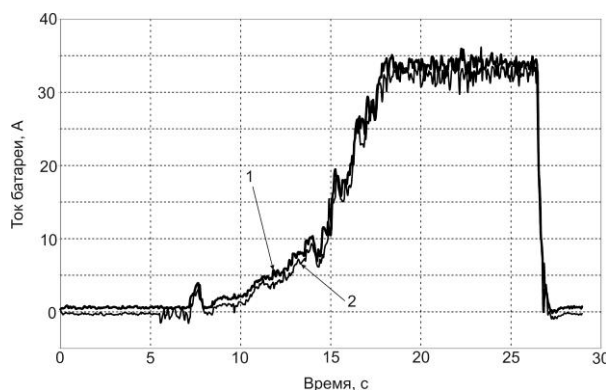


Рис. 7. Зависимости тока потребления ВЭП от времени при определении максимальной силы тяги электровоза

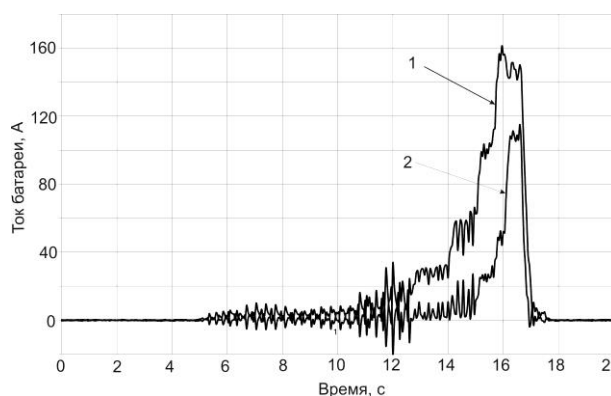


Рис. 8. Зависимости тока потребления электроприводов ДРТ-13+»Curtis» от времени при определении максимальной силы тяги электровоза

При испытаниях максимальная сила тяги электровоза как с ВЭП, так и с «ДРТ-13+»Curtis» составила около 27-28 кН. При этом токи двух ВЭП, потребляемые от аккумуляторной батареи (рис. 7), практически совпадали и не превышали значения 35-36 А, в то время как токи двух электроприводов «ДРТ-13+»Curtis» существенно отличались друг от друга (рис. 8) и составили 100-160 А. Меньшие значения тока ВЭП в этом случае объясняются наличием векторной ШИМ.

## Выводы.

1. Разработан и изготовлен комплект ВЭП на базе ВДПМ для рудничного аккумуляторного электровоза типа ЭРА-П8. Проведены испытания ВЭП на стенде и кольцевом полигоне при установке двух ВЭП на электровоз с целью оценки рабочих свойств разработанного электропривода и его эффективности.

2. Энергопотребление разработанного ВЭП примерно на 25% меньше, чем используемого в настоящее время электропривода «ДРТ-13 + "Curtis" при выполнении одной и той же транспортной работы, т.е. применение ВЭП позволяет увеличить время работы шахтного электровоза с одной зарядкой батареи.

3. В отличие от применяемого в настоящее время электропривода «ДРТ-13 + "Curtis" разработанный ВЭП обеспечивает практически одинаковую нагрузку работающих параллельно двух электроприводов, установленных на электровозе.

4. В пусковых режимах токопотребление ВЭП существенно меньше, чем у электропривода «ДРТ-13 + "Curtis"».

## Список использованной литературы

1. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. Т. 1 [Текст] / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Щука, В. А. Яценко; под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.

2. Yudong L., Xiaobang Y. and Tianyu Z. Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors in Mine Electric Locomotive Drive // *IFSA Sensors & Transducers*, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 9-17.

3. Curtis Instruments, Inc. (2011). 1209B/1221B/1221C/1231C Manual p/n 98827, Available from: <http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=Datasheets.downloadmanual&prodid=522> (accessed 10.05.2016).

Получено 11.05.2016

## References

1. Butt J. F, Grjadushhij V.B., Debeli V.L., Koval A., Furman A.L., Schuka V.M., Yatsenko V.A. *Shahtnyj podzemnyj transport: spravocnoe izdanie. Shahtnyj lokomotivnyj i rel'sovyj transport.* [Mine underground transport: a reference book. Mine locomotive and rail transport.], (2009), *VIK Publ*, Donetsk, Ukraine. 481 p. (In Russian).

2. Yudong L., Xiaobang Y. and Tianyu Z. Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors in Mine Electric Locomotive Drive, (2014), *IFSA Sensors & Transducers*, Vol. 169, №4, pp. 9-17. (In English).

3. Curtis Instruments, Inc. (2011). 1209B/1221B/1221C/1231C Manual p/n 98827, Available from: <http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=Datasheets.downloadmanual&prodid=522> (accessed 10.05.2016). (In English).



**Рымша Виталий Викторович,**

Д.т.н., проф. каф. электрических машин Одесского нац. политехнического ун-та. 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, тел. +38(050) 316-68-11 [www.ukrainemotors.com.ua](http://www.ukrainemotors.com.ua) e-mail: rimsha61@gmail.com

**Радимов Игорь Николаевич,**

К.т.н., доцент, соучредитель ООО "Электротехника - Новые технологии" 65005, Одесса, ул. Мельницкая, 26/2



**Гулый Михаил Викторович,**

К.т.н., главный инженер-электроник ООО "Электротехника - Новые технологии" 65005, Одесса, ул. Мельницкая, 26/2



**Матюшенко Александр Владимирович,**

Аспирант каф. электрических машин Одесского нац. политехнического ун-та. 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1

