

Д.А. ШОКАРЕВ, ст. преп. КрНУ имени Михаила Остроградского
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преп. ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РУДНИЧНОГО КОНТАКТНО-АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Введение. Создание нового типа рудничного электровоза – контактно-аккумуляторного, соответствующего по требованиям производителей по комплексу параметров и эффективной по структуре, базируется, прежде всего, на типе и структуре того или иного вида тягового электрического привода (ТАП) [1 – 3]. Научными коллективами Криворожского национального университета и Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского разработан макетный образец нового синергетического электропривода переменного тока: IGBT-инвертор – тяговый асинхронный электрический двигатель (ТАД), для 14-ти тонного вида контактно-аккумуляторного рудничного электровоза [4 – 5]. Данный вид электровоза и его энергоэффективный тяговый электропривод позволяет повысить эффективность работы всего комплекса внутришахтного транспорта (ВШТ) и одновременно повысить безопасность работы горнорабочих при транспортировании железорудного сырья по подземным выработкам шахт [6 – 9]. Поэтому разработка и испытание макетного образца тягового асинхронного привода для вновь создаваемого вида электровозов для отечественных шахт является задачей важной на этапе подготовки к конструированию опытного образца.

Материалы исследования. Лабораторные испытания макетного образца ТАП проводились на специализированном испытательном стенде ДВНЗ «Криворожский национальный университет», а отдельные узлы и блоки – в лаборатории кафедры систем энергопотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского

Главной задачей исследований было:

- оценка адекватности результатов, полученных в ходе теоретических исследований;
- выявление технических и технологических особенностей и их влияние на режимы функционирования ТАП, что не поддавалось оценке в ходе теоретических исследований;
- установление реальности и возможности функционирования разработанного ТАП в экспериментальных (лабораторных), а в дальнейшем и промышленных условиях.

Тактика проведения испытаний строилась в соответствии с разработанной и утвержденной руководителями заказчика и исполнителя (соисполнителей) методикой с согласованием её с рядом заинтересованных организаций и учреждений.

На стендовые испытания был представлен изготовленный макетный образец ТАП в составе двух тяговых асинхронных трехфазных электродвигателей типа АД-50 (разработчик ПАО «Электромашина», г. Харьков) с параметрами: г. $U_{ном} = 250В$, $f = 60Гц$, $P = 50кВт$, а также транзисторного инвертора напряжения, пульта управления, тиристорного блока защитных и тормозных резисторов.

Электрическая схема лабораторного испытательного стенда представлена на рис. 1.

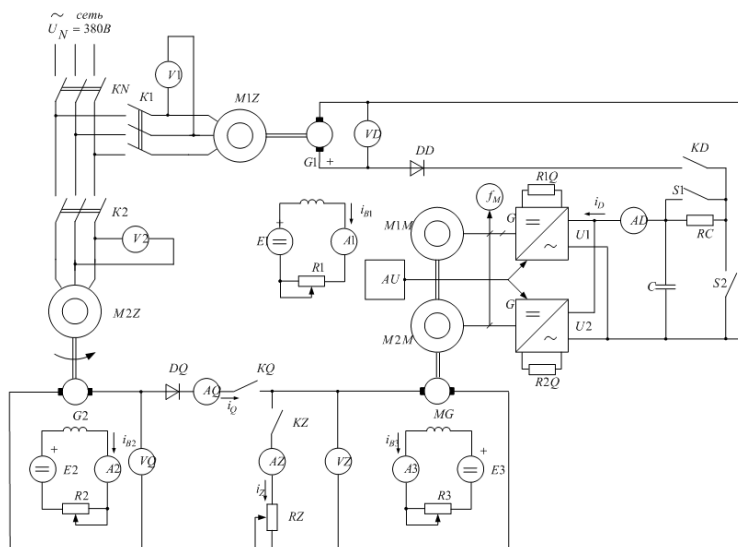


Рис. 1 – Электрическая схема испытательного стенда

$A1, A2, A3$ – амперметры токов возбуждения i_B ;

AD – амперметр тока i_D в цепи питания инверторов;

AQ – амперметр тормозного тока i_Q ;

AZ – амперметр нагрузочного тока i_Z ;

AU – система управления инверторами и регулирования ТЭП;

C – фильтровый конденсатор (емкость добавлена с учетом индуктивности GI);

DQ, DZ – разделительные диоды;

E – источники возбуждения;

f_M – частота напряжения U_M двигателя;

G – генераторы;

KN – автомат;

$K1, K2$ – пускатели;

KD, KQ, KZ – контакторы;

MM – тяговые двигатели;

MG – мотор – генератор;

MZ – приводные двигатели;

$R1, R2, R3$ – резисторы регулирования токов возбуждения;

Датчики тока и напряжения, необходимые для системы управления, на схеме не показаны, (они устанавливаются по указаниям разработчика преобразователя).

Испытательный стенд позволял имитировать реальные процессы, происходящие в системе тягового привода с асинхронными двигателями при работе рудничного электровоза сцепной массой 14 кН, с целью полной реализации программы и методики испытаний экспериментального образца ТАП.

На рис 2а, 2б показаны осциллограммы трехфазного тока ТАД, в режимах холостого тока и работы под нагрузкой при ШИМ напряжения питания.

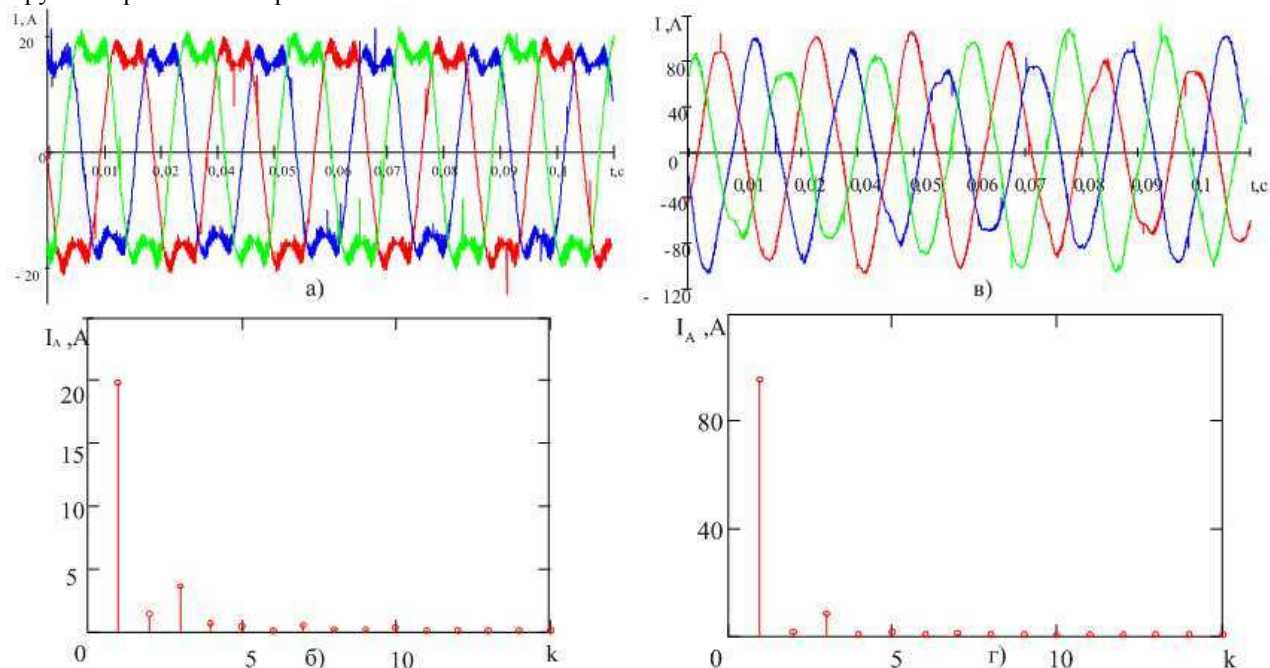


Рис. 2 – Осциллограммы трехфазных токов ТАД: а) в режиме работы без нагрузки при ШИМ напряжения ; б) в установившемся режиме с нагрузкой на валу двигателя при ШИМ напряжения; в) гармонический состав тягового тока в режиме работы без нагрузки; г) гармонический состав тягового тока в установившемся режиме.

Работа датчика движения полностью соответствовала установившейся частоте вращения ротора тягового двигателя (двигателей).

При моделировании режима «ТОРМОЗ» производился анализ форм кривых выходного тока и напряжения IGBT - инвертора по трем фазам двигателя.

Для оценки уровня синусоидальности формы тока на выходе от преобразователя был приведен гармонический анализ (рис. 2в, рис. 2г) (уровень задатчика интенсивности равен «2-й ступени режима «ТЯГА» в установившемся режиме работы). Величина питающего напряжения задавалась в диапазоне 230–80 В. В ходе испытаний было установлено, что форма тока содержит первую гармонику частоты (97 %), что соответствует расчетным данным [4].

На рис. 3а, 3б приведены осциллограммы переходных процессов в ТАД электропривода рудничного контактно-аккумуляторного электровоза при несанкционированном допустимом исчезновении напряжения питания на входе контура преобразователя электрической энергии, возникающей в момент исчезновения питания ТАП с нагрузкой равной 0,25 номинальной (установившийся режим «ТЯГА», ротор двигателя вращается на стабильной частоте).

Как следует из осциллограмм, протекание электрических переходных процессов в тяговых асинхронных двигателях ТАП при различных системах питания – КС и ТАБ практически идентичны.

Канал 1 (рис. 3а) показывает амплитудное значение фазного напряжения на двигателе, а канал № 2 (рис. 3б) – переходной процесс.

Имитация по процессам в ТАП при обрыве пантографа от контактного провода проводилась при временном интервале 0,15 с.

Исследования показали, что спад напряжения с уровня 230 В до уровня ниже 80 В происходит за время менее 150 мс.

В то же время, «подхват» напряжения (переход в режим питания от тяговой аккумуляторной батареи) осуществляется через 0,15 с после установившегося режима.

На рис. 4 представлена осциллограмма переходных процессов в тяговом двигателе ТАП при отключении питания электровоза от контактной сети под номинальной нагрузкой на валу тягового двигателя электропривода электровоза и переключением на питание от ТАБ.

В ходе эксперимента также осуществлялись (моделировались на физической модели -стенде) пуски ТАП под полной нагрузкой, при $U = 250\text{В}$ и $U = 80\text{В}$ резкий сброс и резкий наброс нагрузки, переключения источника питания: КС-ТАБ в функции нагрузки на ТАД.

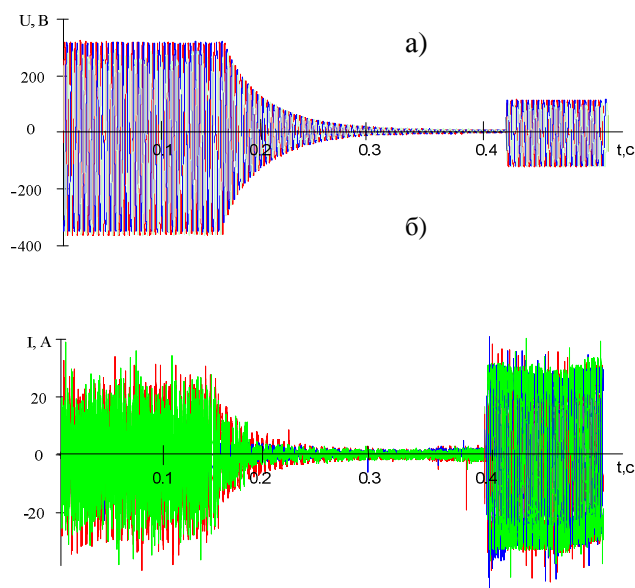
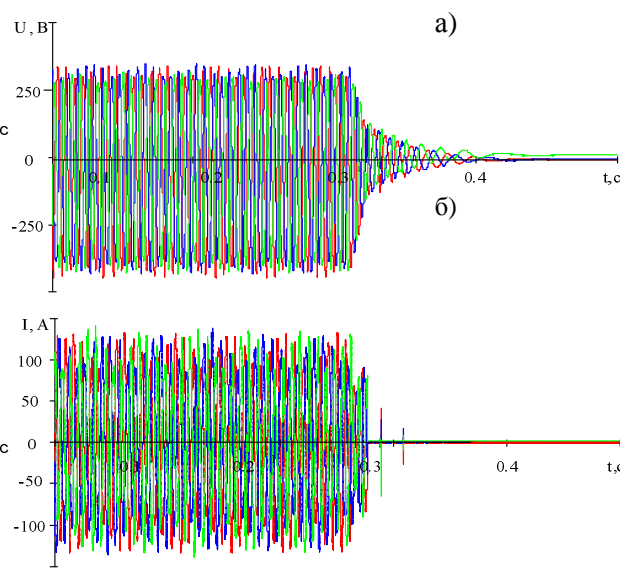


Рис. 3 – Осциллограммы переходного процесса а) напряжения; б) токов на выходе ТАД в момент кратковременного исчезновения питания на входе преобразователя с переходом на питание от другого источника



Рисю 4 – Осциллограммы переходных процессов а) трехфазного напряжения и б) токов на фазах (ТАД) в момент исчезновения напряжения на входе преобразователя с максимальной нагрузкой на валу

Должное внимание уделялось также анализу гармонического состава тока и напряжения в функции метода ШИМ – трапецидальная или синусоидальная [9]. На рис. 5 (а, б) представлены осциллограммы напряжения на двигателе при синусоидальном и трапецидальном законе управления при ШИМ напряжения.

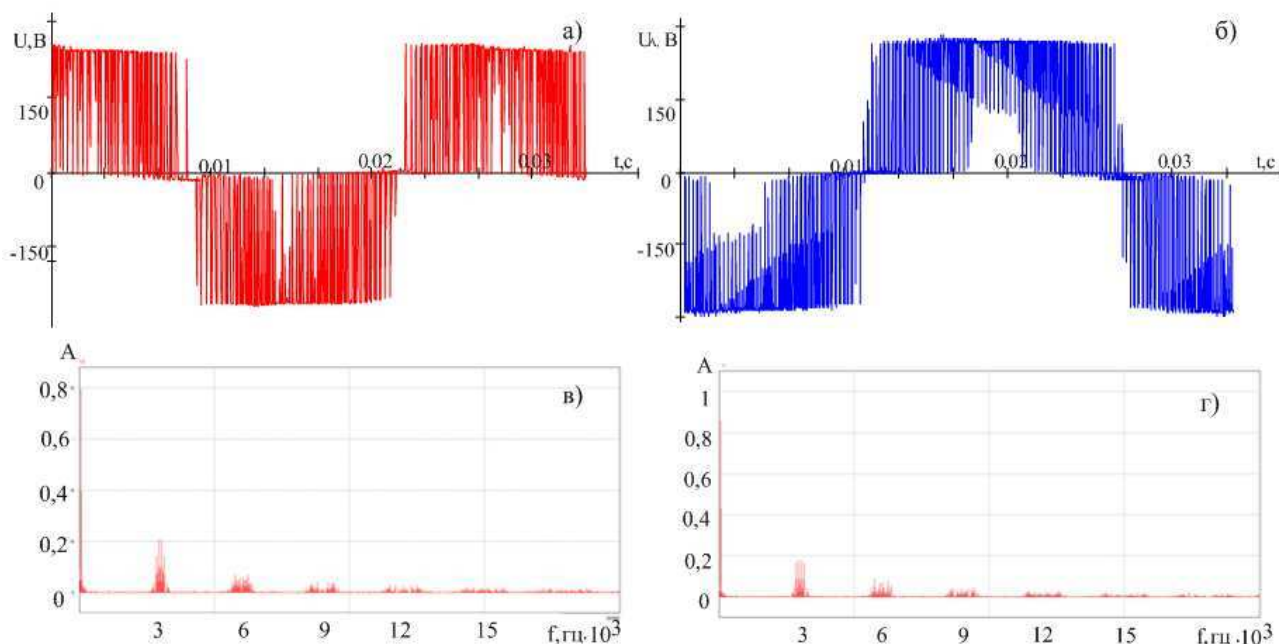


Рис. 5 – Графики фазного напряжения, полученные :а) на выходе инвертора напряжения с ШИМ при синусоидальном законе управления; б) на выходе инвертора напряжения с ШИМ при трапецидальном законе управления в) гармонический состав фазного напряжения на при синусоидальном законе управления г) гармонический состав фазного напряжения на при трапецидальном законе управления

Оценивался также гармонический состав тягового тока и напряжения в функции способов управления и режимов функционирования ТАП (рис. 5в, рис. 5г). Как свидетельствуют результаты анализа, гармонический состав тягового тока изменяется в соответствии с режимом и способом управления ШИМ. Так, при применении трапецидального закона управления в тяговом токе амплитуда 5-й и 13-й гармоники почти в два раза меньше, чем при синусоидальном способе, а коэффициент искажения равен $K_u = 0,9858$ против $K_u = 0,9723$ при применении синусоидального закона управления. Остальные амплитуды гармоник отличаются незначительно.

В ходе экспериментов была также оценена точно адекватность математической модели и реальных данных – лабораторного стенда. Расхождения вполне допустимые – не превышали 5,7–8,3 %.

Вместе с тем испытания выявили определенную неудовлетворенность отдельными составляющими ТАП, в частности параметрами разработанных ОАО «Электромашина» (г. Харьков) первыми экспериментальными образцами тяговых электрических асинхронных двигателей АД-50.

Вместе с тем, обобщая результаты исследований можно сделать вывод, что экспериментальный образец ТАП на базе тяговых асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором и IGB-транзисторных преобразователей с микропроцессорной системой управления подтвердил в основном свою эффективность его применения для рудничных электровозов с двухуровневым режимом питания КС-ТАБ.

Выводы. 1. Разработаны авторские теоретические выкладки по структуре, параметрам и компоновке синергетического тягового электропривода с асинхронными двигателями и IGB-транзисторными преобразователями позволяют перейти к конструированию опытного образца рудничных контактно-аккумуляторных электровозов с двухуровневым режимом питания ТАД.

2. Результаты исследований рекомендуются к дальнейшему внедрению на рудничных и промышленных электровозах соответствующих видов и типов.

Список литературы: 1. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт / 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. – Т.1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с. 2. Степаненко В.П. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов/ В.П. Степаненко, Ванцлафф В., Дайнека Р.// Уголь. – 1986. - №12. – С.32 – 33. 3. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P.212 4. Шокарев, Д. А. Система управления тяговым асинхронным электроприводом рудничного контактно-аккумуляторного электровоза / Д. А. Шокарев : Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : науково-технічна конференція : матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, –2013. – С. 118–119. 5. Коржев А.А. Повышение тяговых свойств рудничных электровозов за счет применения комбинированного привода. Автореферат диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Санкт-Петербург, 2005, 19с. 6. Бинус М.С. Повышение надёжности и электробезопасности работы электровозной откатки шахт. Безопасность и надёжность электроснабжения горнорудных предприятий /М.С.Бинус, В.И. Кунин, В.Н. Кобевник// Тезисы докладов. – Днепропетровск: 2002. – С. 32 – 33. 7. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАНУ, 2006. – 252с. 8. Синчук О.Н. К вопросу о повышении безопасности эксплуатации электровозного транспорта шахт и рудников// Тезисы докладов. – Днепропетровск: 2002. – С. 32 – 33. 9. Бунько В.А. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки / Бунько В.А., Волотковский С.А., Пивняк Г.Г. - М.: Недра, 1964, - 200 с. 10. Випробування асинхронного тягового електропривода рудникового контактно-аккумуляторного електровоза / О. М. Сінчук, Д. А. Шокар'ов, Є. І. Скапа, І. О. Сінчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – Випуск 6(99). – С. 49–52.

Bibliography (transliterated): 1. Shahtnyj podzemnyj transport: spravocnoe izdanie. Shahtnyj lokomotivnyj i rel'sovyj transport / Ju.F. Butt, V.B. Grjadushhij, V.L. Debelyj, A.N. Koval', A.L. Furman, V.M. Shhuka, V.A. Jacenko // Pod obshh. red. B.A.Grjadushhego. – T.1. – Doneck: «VIK», 2009. – 481 s. 2. Stepanenko V.P. Razrabotka i ispytanie shahtnyh kontaktno-akкумуляторных jelektrovozov/ V.P. Stepanenko, Vanclaff V., Dajneka R.// Ugol'. – 1986. - №12. – S.32 – 33. 3. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P.212 4. Shokarev, D. A. Sistema upravleniya tyagovym asinhronnym e'lektroprivodom rudnichnogo kontaktno-akкумуляторного e'lektrovoza / D. A. SHokarev : E'lektromehanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizacii : naukovo-tehnichna konferenciya : materialy konferencii. – Kremenchuk: KrNU, –2013. – S. 118–119. 5. Korzhev A.A. Povyshenie tjagovyh svojstv rudnichnyh jelektrovozov za set primenenija kombinirovannogo privoda. Avtoreferat dissertacionnoj raboty na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk. Sanki-Peterburg, 2005, 19s. 6. Binus M.S. Povyshenie nadjozhnosti i jelektrobezopasnosti raboty jelektrovoznogo otkatki shaht. Bezopasnost' i nadezhnost' jelektrosnabzhenija gornorudnyh predpriyatij /M.S.Binus, V.I. Kunin, V.N. Kobevnik// Tezisy dokladov. – Dnepropetrovsk: 2002. – S. 32 – 33. 7. Sinchuk O.N. Kombinatorika preobrazovatelej naprjazhenija sovremennyh tjagovyh jelektroprivodov rudnichnyh jelektrovozov / O.N. Sinchuk, I.O. Sinchuk, N.N. Jurchenko, A.A. Chernyshov, O.A. Udovenko, O.V. Pas'ko, Je.S. Guzov. Nauchnoe izdanie. – Київ: ІЕДНАНУ, 2006. – 252s. 8. Sinchuk O.N. K voprosu o povyshenii bezopasnosti jekspluatacii jelektrovoznogo transporta shaht i rudnikov// Tezisy dokladov. – Dnepropetrovsk: 2002. – S. 32 – 33 9. Bun'ko V.A. Povyshenie bezopasnosti rudnichnoj jelektrovoznogo otkatki / Bun'ko V.A., Volotkovskij S.A., Pivnjak G.G. - M.: Nedra, 1964, - 200 s. 10. Viprobuvannya asinhronnogo tyagovogo електропривода рудникового контактно-аккумуляторного електровоза / О. М. Сінчук, Д. А. Шокар'ов, Є. І. Скапа, І. О. Сінчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – Випуск 6(99). – С. 49–52.

Поступила (received) 21.08.2015