

УДК 621.314

О. Н. Синчук, д-р техн. наук,
А. Б. Сёмочкин, канд. техн. наук,
В. А. Федотов

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ ЕГО ПИТАНИИ ОТ РЕАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Разработана структурная схема модели электромеханической системы тележки электро-воза, учитывающая упругие связи с зазорами от двигателя до редуктора, а также от редуктора до обоих колес. Система привода АИН-АД при этом получает питание от источника бесконечной мощности через сосредоточенные индуктивность и активное сопротивление контактной сети, с учетом накопления энергии на емкостном фильтре инвертора. Предложенная модель позволяет исследовать влияние разных законов управления АИН-АД на динамику системы и обеспечить наиболее рациональный характер протекания переходных процессов пуска-торможения электровоза.

Ключевые слова: автономный источник напряжения – асинхронный двигатель, шахтный электровоз, переходные процессы, упругие связи, система электропитания

O. Sinchuk, ScD.,
A. Syomochkin, PhD.,
V. Fedotov

TRANSIENTS OF SYSTEM OF VOLTAGE SOURCE INVERTER INDUCTION MACHINE OF THE MINE LOCOMOTIVE WHEN POWERED FROM REAL SYSTEM OF POWER SUPPLY

Abstract. There have been developed a structural scheme of the electromechanical system of electric locomotive bogie model K14 in Matlab, which takes into account the elastic connection with gaps of locomotive engine to gearbox and from the gear to both wheels. Drive system voltage source inverter induction machine gets power from a source of infinite power through concentrated inductance and active resistance of the contact network, taking into account the accumulation of energy in capacitive filter of inverter. The proposed model allows to examine the effects of different laws control voltage source inverter induction machine on the dynamics of the system and to ensure the most rational character of transient processes starting-stopping electric locomotive.

Keywords: voltage source inverter induction machine, mine locomotive, transients, elastic connection, power supply system

О. М. Сінчук, д-р техн. наук,
А. Б. Сьомочкин, канд. техн. наук,
В. О. Федотов

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АИН-АД ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ ПРИ ЙОГО ЖИВЛЕННІ ВІД РЕАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Анотація. Розроблено структурну схему моделі електромеханічної системи візка електровоза, що враховує пружні зв'язки з зазорами від двигуна електровоза до редуктора, а також від редуктора до обох коліс. Система приво-ду АИН-АД при цьому отримує живлення від джерела нескінченної потужності через зосере-джені індуктивність і активний опір контактної мережі, з урахуванням накопичення енергії на ємнісному фільтрі інвертора. Запропонована модель дозволяє дослідити вплив різних законів управління АИН-АД на дина-міку системи і забезпечити найбільш раціональний характер протікання перехідних процесів пуску-гальмування електровоза.

Ключові слова: автономне джерело напруги - асинхронний двигун, шахтний електровоз, перехідні проце-си, пружні зв'язки, система електропостачання

Введение. В шахтах Украины и подземных рудниках эксплуатируются около четырех тысяч электровозов двадцати типов [1]. Как известно, технологические показатели транспортировки электро-возами во многом определяются соответствующими показателями их тяговых электромеханиче-ских систем (ТЭМС).

К сожалению эксплуатируемые на отечествен-ных шахтных электровозах контакторно-резисторные ТЭМС далеки от совершенства по критериям надеж-

ности, энерговооруженности и возможности автома-тизации управления [2]. Вместе с тем от радно, что в последние годы созданы и успешно прошли испыта-ния в промышленных условиях новые образцы ТЭМС, в том числе IGBT-преобразователи, питающие тяговые асинхронные двигатели (ТАД) [2].

Однако несмотря на все общеизвестные пре-имущества от внедрения новой техники, в настоя-щее время возникает ряд вопросов к использованию преобразователей частоты в электроприводе раз-личных механизмов [3]. С одной стороны, в литера-туре (и производителями ПЧ) не до конца прояснен

© Синчук О.Н., Сёмочкин А.Б., Федотов В. А., 2014

вопрос энергетических показателей при использовании систем ПЧ-АД в разных механизмах, то есть при разных условиях. С другой стороны, не до конца известны особенности использования систем ПЧ-АД в шахтных электровозах. Так, в [4] были проведены подробные исследования динамики асинхронных электродвигателей горных машин в групповом варианте от общей системы электропитания, однако отсутствуют результаты исследования динамики систем частотного электропривода при его питании от системы электроснабжения. С другой стороны, учитывая, что контактная сеть электровоза К14 – постоянного тока, то имеет смысл говорить не о системе ПЧ-АД (который имеет выпрямитель в своем составе), а о системе АИН-АД. В любом случае возникает вопрос – как поведет система АИН-АД с упругими связями в механизме тележки электровоза при работе от реальной сети электроснабжения (которая к тому же вместе с двигателем осуществляет обмен энергией через конденсатор фильтра).

Материалы исследований. Основой для построения модели на *Matlab* являются стандартные уравнения АД в синхронной системе координат $x, y, 0$ [5]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{x1}}{dt} &= u_{x1} - \alpha'_s \psi_{x1} + \alpha'_s k_r \psi_{x2} + \Omega_0 \psi_{y1}; \\ \frac{d\psi_{y1}}{dt} &= u_{y1} - \alpha'_s \psi_{y1} + \alpha'_s k_r \psi_{y2} + \Omega_0 \psi_{x1}; \\ \frac{d\psi_{x2}}{dt} &= -\alpha'_s \psi_{x2} + \alpha'_r k_s \psi_{x1} + (\Omega_0 - \Omega) \psi_{y2}; \\ \frac{d\psi_{y2}}{dt} &= -\alpha'_s \psi_{y2} + \alpha'_r k_s \psi_{y1} - (\Omega_0 - \Omega) \psi_{x2}; \\ \frac{d\psi_{x2}}{dt} &= \frac{3}{2} p \frac{k_r}{\sigma L_s} (\psi_{x2} \psi_{y1} - \psi_{x1} \psi_{y2}); \\ M - M_c(\Omega) &= \frac{J}{p} \frac{d\Omega}{dt}; \end{aligned}$$

уравнения выпрямителя и фильтра:

$$\begin{aligned} \frac{dU_m}{dt} &= \frac{1}{k_U C} \left(I_L - I_{II} - \frac{1}{k_U R_{II}} U_m \right); \\ \frac{dI_L}{dt} &= \frac{1}{L} \left(E_{II} - I_L R - \frac{1}{k_U} U_m \right). \end{aligned}$$

Эквивалентная схема преобразователя частоты с сетью приведена на рис 1:

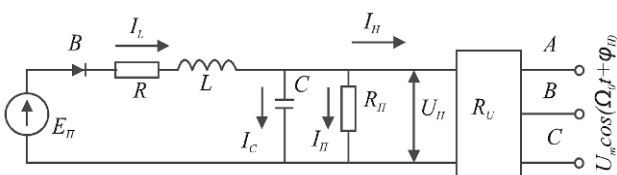


Рис. 1. Эквивалентная схема ПЧ с сетью

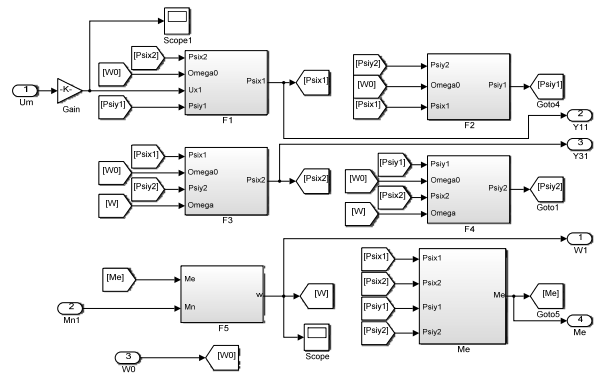


Рис.2. Структурная схема модели АД на *Matlab*

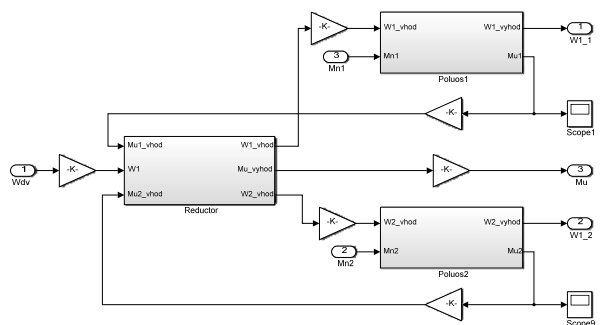


Рис. 3. Структурная схема модели механической части тележки электровоза (редуктора и полуосей) на *Matlab*

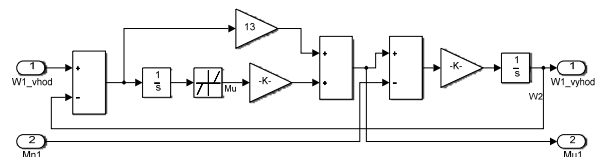


Рис. 4. Структурная схема модели полуоси на *Matlab*

На полученной программной модели были проведены исследования пуска системы АИН-АД при следующих условиях:

- а) при законе управления АИН $U/f = const$ (рис. 5);
- б) при законе управления АИН $U/\sqrt{f} = const$ (рис. 6).

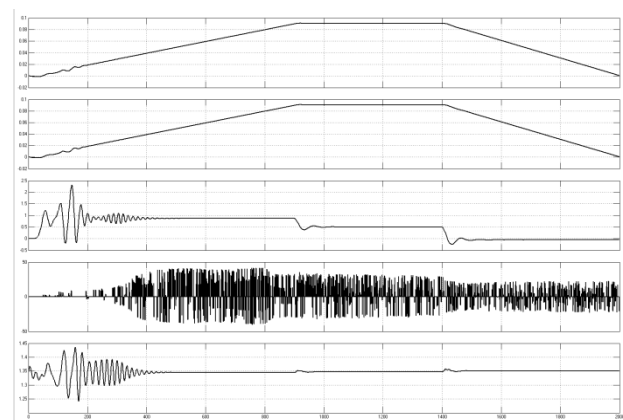


Рис. 5. Графики скоростей колес, электромагнитного и упругого моментов, напряжения в линии электроснабжения

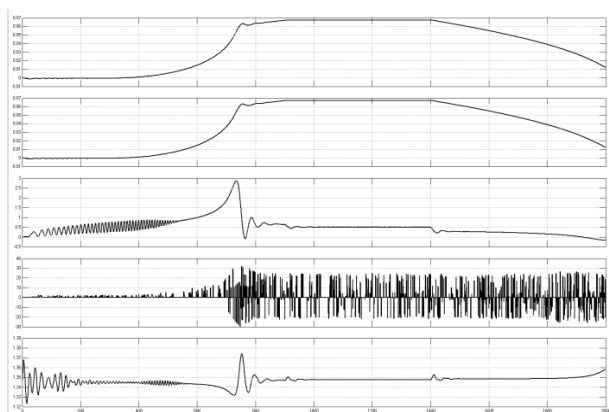


Рис. 6. Графики скоростей колес, электромагнитного и упругого моментов, напряжения в линии электроснабжения

Из графиков на рис. 5 и рис. 6 видно, что закон управления $U/\sqrt{f} = const$ более благоприятен, потому что амплитуда пульсаций скорости (электромагнитного и упругого момента, а также напряжения сети) меньше, чем при законе $U/f = const$. Однако, следует отметить, что упругие моменты в полуосях, наоборот, при пропорциональном управлении достигают меньших значений при пуске-торможении (12 о.е. против 22 о.е.), то есть при управлении $U/\sqrt{f} = const$ указанные упругие моменты возрастают почти в два раза.

Для сравнения ниже приведены графики при пуске-торможении АИН-АД от системы бесконечной мощности:

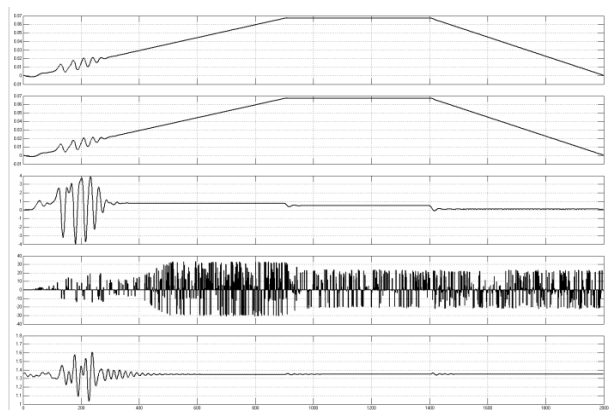


Рис. 7. Графики пуско-тормозного режима от системы электроснабжения бесконечной мощности

Из графиков на рис. 7 следует, что система электроснабжения значительно смягчает пульсации скорости и электромагнитного момента, практически не влияя на упругие моменты.

Выводы

1. Наиболее рациональной из систем скалярного управления скоростью движения шахтных электровозов по большинству показателей является электропривод с поддержанием закона $U/\sqrt{f} = const$.

2. Использование закона $U/f = const$ приведет к увеличению пульсаций момента, скорости, и в конечном итоге к увеличению отклонений напряжения питающей сети.

Список использованной литературы

1. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание: в 2 т. / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый и др; под общ. ред. Б. А. Грядущего // Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. – Донецк : ВИК, 2011. – Т. 1 – 2011. – 481 с.
2. Синчук О. Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Н. Н. Юрченко, А. А. Чернышов, О. А. Удовенко, О. В. Пасько, Э. С. Гузов // Научное издание. – К. : ІЕДНАНУ, 2006. – 252с.
3. Гаврилов П. Д. Автоматизированный частотноуправляемый электропривод – основа энерго- и ресурсосбережения / П. Д. Гаврилов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energsovet.ru/stat65p1.html>. – Дата доступа (20.05.2014).
4. Ещин Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление / Е. К. Ещин. – Кемерово : Кузбасский гос. техн.ун-т, 2003. – 247 с.
5. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 378 с.
6. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 256 с., ил.
7. Буряковский С. Г. Динамические процессы и энергетические показатели электропривода рудничного электровоза в процессе буксования [Текст] / С.Г. Буряковский, А. А. Рафальский // Сборник научных трудов "Вестник НТУ «ХПИ» : Проблемы автоматизованого электроприводу. Теорія і практика. Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 28. – С. 396 – 397. ISSN 2079-8024.
8. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Днепропетровск : Новая идеология, 2002. – 240 с. ISBN 966-8050-04-05.
9. Синчук О. Н. Системы управления рудничным электровозным транспортом / О. Н. Синчук, Т. М Беридзе, Э. С Гузов. – М. : Недра, 1993. – 255 с. .
10. Кривицкий С. О., Эпштейн И. И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами / С. О. Кривицкий, И. И. Эпштейн. М. : Энергия, 1970. – 152 с.

Получено 04.07.2014

References:

1. Gryadushchiy V.A., Butt Yu.F., Gryadushchiy V.B., and Debelyy V.L. Shakhtnyy podzemnyy transport : spravochnoye izdaniye [Mine Underground Transport] (2011), *VIK Publ*, Donetsk, Ukraine, 481 p. (In Russian).
2. Sinchuk O.N., Sinchuk I.O., Yurchenko N.N., Chernyshev A.A., Udovenko, O.A., Pasko O.V., and Guzov E.S. Kombinatorika preobrazovateley napryagheniya sovremennyh tyagovyh elektroprivodov rudnichnyh elektrovozov [Combinatorics of Converters of Tension of Modern Traction Electric Drives of Mine Electric Locomotives], (2006), *IEDNANU Publ*, Kiev, Ukraine, 252 p. (In Russian).

3. Gavrilo P.D. (2006), *Avtomatizirovanny chastotnoup - ravlyayemyy elektroprivod - osnova energo - i resursosbe - rezheniya* [Automated Chastotnoup-ravlyayemy Electric – the Basis of Energy and Resources], (In Russian), available at: <http://www.energosoвет.ru/stat65p1.html> (accessed 20.05.2014)

4. Yeshchin E.K. *Elektromekhanicheskiye sistemy mnogod - vigatel'nykh elektroprivodov . Modelirovaniye i upravleniye* [Electromechanical Systems Multiengine Drives. Modeling and control], (2003), *Kuzbasskiy Gos.Tekhn.un Publ*, Kemerovo, Russian Federation, 247 p. (In Russian).

5. Sandler A.S., and Sarbatov R.S. *Avtomaticeskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Automatic Frequency Control of Asynchronous Motors], (1974), *Energiya Publ*, Moscow, Russian Federation, 378 p. (In Russian).

6. Vazhnov A.I. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC Machines], (1980), *Energiya Publ*, St. Petersburg, Russian Federation 256 p. (In Russian).

7. Buryakovskiy S.G. *Dinamicheskiye protsessy i energeticheskiye pokazateli elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza v protsesse buksovaniya* [Dynamic Processes and Energy Indicators Mine Electric Locomotive in the Process of Slipping], (2010), *“Vestnik NTU “HPI”*, Kharkov, Ukraine, pp. 396 – 397 (In Russian).

8. Myamlin S.V. *Modelirovanie dinamiki relsovykh ekipazhej* [Simulation of Railway Vehicle Dynamics], (2002), *Novaya Ideologiya Publ*, Dnepropetrovsk, Ukraine, 240 p (in Russian).

9. Sinchuk O.N., Beridze T.M., and Guzov E.S. *Sistemy upravleniya rudnichnym elektrovoznym transportom* [Control Systems for Electric Vehicles Firedamp], (1993), *Nedra Publ*, Moscow, Russian Federation, 255 p (in Russian).

10. Krivitskiy S.O., Epshteyn I.I. *Dinamika chastotno - reguliruyemykh elektroprivodov s avtonomnymi invertorami* [The Dynamics of Variable Frequency Drives with Standalone Inverters], (1970), *Energija Publ*, Moscow, Russian Federation, 152 p. (In Russian).



Синчук
Олег Николаевич,
д-р техн. наук, проф., зав. каф.
автоматизированных электро-
механических систем в промыш-
ленности и транспорте ГВУЗ
«Криворожский нац. ун-т»,
Украина, г. Кривой Рог
ул. XXII партсъезда, 11.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: speet@ukr.net



Сёмочкин
Альберт Борисович,
канд. техн. наук, доц. каф. ав-
томатизированных электроме-
ханических систем в промыш-
ленности и транспорте ГВУЗ
«Криворожский нац. ун-т»,
Украина, г. Кривой Рог,
ул. XXII партсъезда, 11.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: SHORG@mail.ru



Федотов
Владислав Александрович,
ст. преподаватель каф. автома-
тизированных электромехани-
ческих систем в промышлен-
ности и транспорте ГВУЗ
«Криворожский нац. ун-т»,
Украина, г. Кривой Рог
ул. XXII партсъезда, 11.
Тел. (056) 409-17-30.
E-mail: speet@ukr.net