

УДК 622.625.28-83

**О. Н. Синчук**, д-р техн. наук,  
**Э. С. Гузов, О. А. Удовенко**, кандидаты техн. наук,  
**А. В. Омельченко**

## К ВОПРОСУ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В ТОРМОЗНОМ РЕЖИМЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

**Аннотация.** Приведены результаты исследований, касающиеся вопросов подпитки асинхронной машины реактивным током в тормозном режиме работы тягового привода рудничного контактного электровоза, в частности условия устойчивого конденсаторного самовозбуждения. Изложены теоретические выкладки по расчету емкости фильтрового конденсатора, рекомендуемые для использования в практических расчетах.

**Ключевые слова:** асинхронная машина, тяговые электрические двигатели, тяговый асинхронный привод, рудничный контактный электровоз, контактная сеть

**O. Sinchuk**, ScD.,  
**E. Guzov**, PhD., **O. Udovenko**, PhD.,  
**O. Omelchenko**

## TO THE QUESTION OF SELF-EXCITATION ASYNCHRONOUS MACHINE IN BREAKING MODE OF TRACTION DRIVE

**Abstract.** This article presents the results of research relating to feeding the asynchronous machine with reactive current in breaking mode of traction drive of mine contact electric locomotives, in particular the conditions for sustainable capacitor excitation. Also presented theoretical principles for the calculation of capacitance of the filter's capacitor. This theoretical principles is recommended for using in practical calculations.

**Keywords:** asynchronous machine, traction electric engines, asynchronous traction drive, mine contact electric locomotive, a contact network

**O. M. Сінчук**, д-р техн. наук  
**Е. С. Гузов, О. О. Удовенко**, кандидати техн. наук,  
**О. В. Омельченко**

## ДО ПИТАННЯ САМОЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ В ГАЛЬМІВНОМУ РЕЖИМІ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ

**Анотація.** Наведено результати досліджень, що стосуються питань підживлення асинхронної машини реактивним струмом в гальмівному режимі роботи тягового приводу рудничного контактного електровозу, зокрема умови сталого конденсаторного самозбудження. Наведені теоретичні викладки щодо розрахунку ємності фільтрового конденсатора, які рекомендовані для використання в практичних розрахунках.

**Ключові слова:** асинхронна машина, електричні двигуни, тяговий асинхронний привод, рудничний контактний електровоз, контактна мережа

**Введение.** На горных предприятиях с технологиями подземного ведения работ основным видом транспорта является электровозный.

На отечественных шахтах эксплуатируется около четырех тысяч рудничных электровозов, оснащенных не эффективными видами тяговых электроприводов (ТЭП) с двигателями постоянного тока и резисторно-контакторной системой управления. Данные ТЭП не соответствуют современному уровню развития техники, требованиям служб эксплуатации горных предприятий и давно нуждается в замене на современные типы [1].

В последние годы в Украине возобновились исследования по созданию современных энергоэффективных систем ТЭП, в том числе с традиционными видами трехфазных тяговых асинхронных двигателей (ТАД) [2, 3].

Проведенные испытания новых разработок тяговых асинхронных приводов (ТАП) для рудничных электровозов в основном подтвердили ожидаемую эффективность [3], но одновременно высветили и некоторые локальные проблемы, требующие своего разрешения для завершения процесса предварительных исследований в процессе конструкторских разработок. Одной из таких проблем является процесс эффективного торможения ТАД [3].

**Изложение материала и результаты исследований.** Источником необходимого генерирования реактивной мощности для технологии функционирования ТАД в рассматриваемой системе тягового электропривода являются либо контактная сеть (КС), либо обязательно присутствующий в схеме сглаживающий конденсатор [3].

Возможность поддержания реактивного тока  $i_{sp}$  на данной частоте путем подпитки ТАД от КС обеспечивает надежное возбуждение ее в генераторном режиме и, следовательно, устойчивое торможение ТАП, которое осуществляется путем из-

менения отношения между  $\omega_s$  и  $\omega_r$ . Устанавливается  $\omega_s < \omega_r$ , т.е.  $s < 0$ . При этом  $E_s > U_s$  и ТАД генерирует ток в КС или в тормозной резистор  $R_Q$  на участке  $\varphi$ , а на интервале  $[\pi - \varphi]$  машина подпитывается от КС. Изменением скольжения  $s$  и тока подпитки, используя ШИМ, регулируют ЭДС ТАД и, следовательно, мощность торможения на данной скорости:

$$I_{Sp} = I_{Sm} \cdot \sin(\pi - \varphi) = I_{Sm} \cdot \sin \varphi.$$

Однако все это действительно на высоких скоростях движения. По мере снижения скорости вращения ротора в процессе торможения ЭДС ТАД становится меньше напряжения КС. Тормозной резистор, включенный на стороне постоянного тока, в этом случае будет подпитываться от КС, что недопустимо. Для предотвращения подпитки тормозного резистора ТАП отключают от КС, разрывая цепь линейным контактором. При этом источником реактивной мощности в системе может быть только конденсатор  $C_d$ . Возникает проблема конденсаторного самовозбуждения ТАД.

Необходимо определить величину емкости  $C_d$ , при которой возможно самовозбуждение асинхронной машины (АМ) в режиме генератора. Вопросы конденсаторного самовозбуждения и торможения АМ частично рассмотрены в работах [4 – 8].

Исходной посылкой надежного устойчивого самовозбуждения принимается условие, когда вольтамперная характеристика 0А конденсатора  $C_d$  лежит ниже кривой 0В холостого хода АМ, рис. 1.

В конце процесса самовозбуждения, в точке С:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s + \bar{I}_s \cdot R_s + \bar{I}_s \cdot X_s &= \bar{E}_s \\ \bar{U}_s &= \bar{I}_s \cdot X_c \end{aligned} \right\}.$$

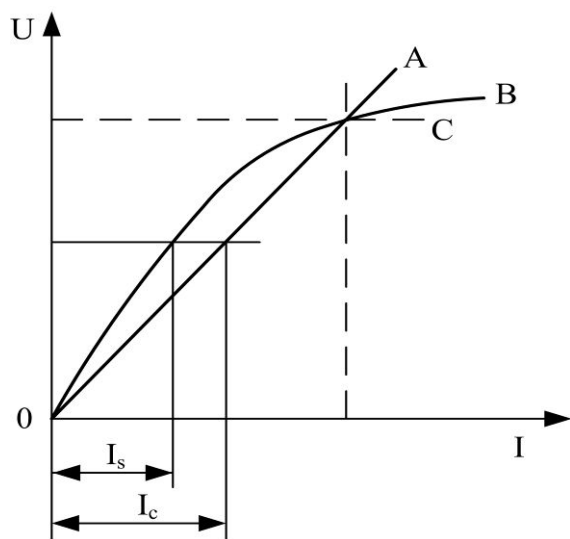


Рис. 1. Условия конденсаторного самовозбуждения асинхронной машины

Таким образом, имеет место самопроизвольное «мягкое» самовозбуждение ТАД, однако, для этого должно быть достаточное значение  $X_c$ , достаточный запас реактивной мощности в конденсаторе  $C_d$ , что

затруднительно реализовать на практике, тем более в транспортной единице с ограниченным объемом для размещения электрооборудования. Поэтому ТАП используют регулируемую инвертором подпитку ТАД реактивным током от конденсатора  $C_d$  посредством ШИМ, за счет чего избыток реактивной мощности конденсатора сводится к нулю и его установленная мощность снижается.

Рекомендуемая величина емкости  $C_d$  рассчитывается по формуле [мкФ].

$$C_d = \frac{10^6}{\sqrt{3}\omega_{SH}} \cdot \frac{I_{\mu H}}{U_H}.$$

Практически на основании многочисленных экспериментов, для ориентировочного определения суммарного значения емкости в микрофарадах на три фазы конденсаторов, необходимой для самовозбуждения в процессе торможения ТАД, рекомендуется следующее правило для ТАД напряжением 380 В: значение мощности в ваттах следует разделить на 10 [9].

Кроме необходимости обеспечивать самовозбуждение ТАД в генераторном режиме при торможении ТАП к конденсатору  $C_d$  предъявляются такие требования:

- ограничение пульсаций напряжения  $U_d$  в стационарном режиме работы ТАП, вызванных коммутационными процессами в преобразователе;
- ограничение выбросов и сбросов напряжения  $U_d$  при резких изменениях нагрузки ТАД в переходных режимах работы ТАП.

Ограничения пульсаций напряжения  $U_d$  обеспечивает величина емкости  $C_d$ , принятая из условий самовозбуждения ТАД.

Большую тревогу может вызывать проблема ограничения выбросов напряжения  $U_d$  при резких изменениях нагрузки ТАД. Например, при аварии все ключи инвертора отключаются и энергия, накопленная в индуктивностях ТАД, разряжается на  $C_d$ , увеличивая его напряжение.

Согласно [10] в обмотках ТАД запасается электромагнитная энергия:

$$W = \frac{3}{2} \cdot \sigma \cdot L_S \cdot I_{Sd}^2 = 0,75 \cdot \sigma \cdot L_S \cdot I_{Sm}^2. \quad (1)$$

Увеличение напряжения  $\Delta U_d = K_d \cdot U_d$  на конденсаторе  $C_d$  при аварии определяется из соотношения

$$\frac{C_d (U_d + \Delta U_d)^2}{2} - \frac{C_d U_d^2}{2} = W. \quad (2)$$

Из (1) и (2) вытекает

$$C_d = \frac{1,5\sigma L_S I_{Sm}^2}{K_d (2 + K_d) U_d^2} \quad (3)$$

где  $C_d$  – здесь емкость конденсатора на стороне постоянного тока;  $I_{Sm}$  – амплитуда фазного тока двигателя;  $K_d = 0,1 \dots 0,15$  – коэффициент перенапряжения.

Однако опасения в необходимости иметь значительную величину емкости  $C_d$  согласно (3) сни-

маются, поскольку практически мгновенно (единицы мкс) после достижения напряжением величины  $(1+K_d)U_d$  срабатывает тормозной чоппер и запасенная в ТАД электромагнитная энергия сбрасывается в резистор  $R_Q$ .

**Выводы.** Для повышения эффективности электрического торможения и упрощения структуры тягового асинхронного привода при переходе тяговых электрических двигателей из двигательного (тягового) в генераторный (тормозной) режим целесообразно принимать специальные меры – достаточно изменить частоту  $\omega_S$  напряжения  $U_S$ , питающего тяговый асинхронный двигатель, чтобы скольжение поменяло знак, ( $s < 0$ ), и регулировать величину тормозного усилия пропорционально величине модуля скольжения  $|s|$ . Но желателен поиск решений по снижению величины емкости фильтрового конденсатора.

#### Список использованной литературы

1. Синчук И. О. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: учебное пособие / И. О., Синчук, А. А. Чернышев, И. И. Кибя. – Кременчуг : ПП Щербатых О. В., 2008. – 88 с.
2. Синчук О. Н. Контактно-аккумуляторный шахтный электровоз с тяговым электротехническим комплексом: IGBT-инвертор-асинхронный электрический двигатель / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа, Ф. И. Караманиц // Научный журнал. Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганск : 2011. – № 4 (158). – С. 172 – 178.
3. Гузов Э. С. Анализ электромагнитных процессов в двухфазной асинхронной машине тягового электропривода рудничного электровоза / Э. С. Гузов, О. Е. Мельник, А. В. Омельченко // Вісник ДВНЗ КНУ. – 2012. – Вып. 30. – С. 151 – 155.
4. Вентильные преобразователи переменной структуры / ред. А. К. Шидловского. – К. : Наукова думка, 1990. – 332 с.
5. Грапонов В. Г. О новом подходе к решению проблем тягового электропривода переменного тока тепловоза / В. Г. Грапонов, М. В. Мажинский, В. С. Марченко // Сб. научных тр. МЭИ «Разработка систем управления электрооборудования и энергоснабжения и автономного транспорта». – М. : 1987. – № 136. – С. 36 – 40.
6. Герман-Галкин С. Г. Широотно-импульсные преобразователи / С. Г. Герман-Галкин. – Л. : Энергия, 1979. – 96 с.
7. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем / Я. З. Цыпкин. – М. : Физматгиз, 1963. – 968 с.
8. Обзор современных систем тягового асинхронного электропривода со статическими преобразователями. «Электротехническая промышленность», серия «Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование». – 1973. – Вып. 7 (22).

9. Петров И. И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И. И. Петров, А. М. Мейстель. – М. : Энергия, 1968. – 264 с.

10. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Получено 04.07.2014

#### References

1. Sinchuk I.O., Chernyshev A.A., and Kiba I.I. Poluprovodnikovye preobrazovateli elektricheskoy energii v strukturah elektroprivodov. Shemotekhnika i printsipy upravleniya [Semiconductors Electric Energy Converters in Electric Drive Structures. Circuit Technology and Principles of Control], (2008), Kremen-chuk, Ukraine, *PP Shcherbatyh O. V.*, 88 p. (In Russian).
2. Sinchuk O.N., Sinchuk I.O., Shokarev D.A., Skapa E.I., and Karamanits F.I. Kontaktno-akkumulyatornyy shahtnyy elektrovoz s tyagovym elektrotehnicheskim kompleksom: IGBT-invertor-asinhronnyy elektricheskyy dvigatel [Contact-Battery Electric Mine with pull Electrotechnical Complex: IGBT-Inverter-Induction Electric Motor], (2011), *Naukoviy Zhurnal. Visnik SNU im. V.Dalya*, Lugansk, Ukraine, Vol. 4 (158), pp. 172 – 178 (In Russian).
3. Guзов E.S., Melnik O.E., Omelchenko A.V. Analiz elektromagnitnyh protsessov v dvuhfaznoy asinhronnoy mashine tyagovogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza [An Analysis of Electromagnetic Processes is in the Diphasic Asynchronous Machine of Hauling Electro Mechanic of Mine Electric Locomotive], (2012), *Visnik DVNZ KNU*, Kriviy Rig, Ukraine, Vol. 30, pp. 151 – 155 (In Russian).
4. Tonkal V.E., and Shidlovskiy A.K. Ventilnye preobrazovateli peremennoy struktury [Circuit Inverters Variable Structure], (1990), Kiev, Ukraine, *Naukova Dumka*, 332 p. (In Russian).
5. Graponov V.G., Mazhinskiy M.V., and Marchenko V.S. O novom podhode k resheniyu problem tyagovogo elektroprivoda peremennogo toka teplovoza [On a new Approach to Problem Solving AC Traction Electric Locomotive], (1987), *Razrabotka Sistem Upravleniya Elektrooborudovaniya i Energosnabzheniya i Avtonomnogo Transporta*, Moscow, Russian Federation, Vol. 136, pp. 36 – 40 (In Russian).
6. German-Galkin S.G. Shirotno-impulsnye preobrazovateli [Pulse-Pulse Converters], (1979), Leningrad, Russian Federation, *Energy*, 96 p. (In Russian).
7. Tsyypkin Ya.Z. Teoriya lineynyh impulsnyh sistem [The theory of Linear Impulsive Systems], (1963), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 96 p. (In Russian).
8. Obzor sovremennyh sistem tyagovogo asinhronnogo elektroprivoda so staticheskimi preobrazovatelyami. “Elektrotehnicheskaya promyshlennost”,

seriya “Tyagovoe i podemno-transportnoe elektrooborudovanie” [An Overview of Modern Systems of Traction Asynchronous Electric Static Converters. “Electrical Industry” series “Push and Handling Electrical Equipment”], (1973), USSR, Vol. 7 (22) (In Russian).

9. Petrov I.I., and Meystel A.M. Spetsialnye rezhimy raboty asinhronnogo elektroprivoda [Special Modes of Asynchronous Electric], (1968), Moscow, Russian Federation, *Energiya*, 264 p. (In Russian).

10. Kovach K.P., and Rats I. Perehodnye protsessy v mashinah peremennogo toka [Transients in AC Machines], (1963), Moscow, Leningrad, Russian Federation, *Gosenergoizdat*, 744 p. (In Russian).

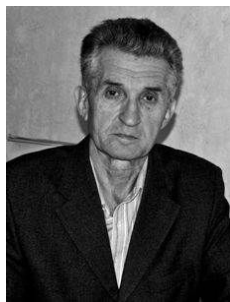


Синчук

Олег Николаевич,  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». г. Кривой Рог, Украина, ул. XXII партсъезда, 11.

Тел. (056) 409-17-30.

E-mail: speet@ukr.net



Гузов

Эдуард Семенович,  
канд. техн. наук, доц. каф. автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». г. Кривой Рог, Украина, ул. XXII партсъезда, 11.

Тел. (056) 409-17-30. .

E-mail: speet@ukr.net



Удовенко

Олег Александрович,  
канд. техн. наук, доц. каф. автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». г. Кривой Рог, Украина, ул. XXII партсъезда, 11.

Тел. (056) 409-17-30



Омельченко

Александр Владимирович,  
ст. преподаватель каф. автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т». г. Кривой Рог, Украина, ул. XXII партсъезда, 11.

Тел. (056) 409-17-30.

E-mail: omelchenko84@ukr.net