

О. Н. СИНЧУК, А. Б. СЕМОЧКИН, В. А. ФЕДОТОВ (КНУ), Б. В. ЖЕРЕБКИН (СПБГУ)

Криворожский национальный университет. 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, д. 11, тел. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Введение

Основным видом транспорта железорудных шахт является электровозный, обеспечивающий 100% подземных грузоперевозок [1]. Для этого используются специальные электровозосоставы: электровоз – вагонетки. Специальными для шахт являются и электровозы дуосные, именуемые как рудничные, количество видов которых равно 20-ти [2].

Постановка задачи исследований

Электровозный транспорт является одним из основных потребителей электрической энергии (ЭЭ), потребляя 18 – 20% ЭЭ от всей потребляемой подземными потребителями железорудных шахт [3 – 4]. В связи с этим, вопросы эффективного использования ЭЭ напрямую касаются и внутришахтного транспорта (ВШТ) железорудных шахт. Решая эту проблему в ряде зарубежных стран ведутся, а точнее продолжают вестись, работы по созданию современных и эффективных по технологическим и энергетическим показателям рудничных электровозов и, прежде всего, их тяговых электромеханических систем (ТЭМС) [7 – 12].

Отрадно, что с этой целью в последние годы и в Украине, после более чем 20-летнего периода застоя, возобновлены аналогичные работы по созданию отечественных электроэнергоэффективных видов ТЭМС для рудничных электровозов [5 – 9]. В качестве одного из таких

перспективных направлений используются ТЭМС на базе IGBT-преобразователей и асинхронных тяговых электрических двигателей (АТД) [10].

При этом, как правило, акцент в выборе вида управления делается в сторону так называемого способа векторного управления, поскольку он обладает достаточно высоким качеством регулирования [10].

Однако, для двухдвигательного тягового комплекса, работающего параллельно на общую нагрузку, рудничный электровоз, в отличие от других видов электровозов, в силу ряда причин, главной из которых является состояние путевого хозяйства, присущи различные моменты нагрузок ТЭД, которые механически жестко связаны каждый со своей колесной парой.

Решение задачи исследований

Перераспределение нагрузок между двигателями можно осуществить, корректируя сигнал задания скорости вращения индивидуально для каждого из двух слагаемых ТЭМС рудничного электровоза [6]. Коррекцию сигнала задания можно выполнить с использованием нечеткого регулятора (FUZZY- регулятора) [6]. Вариант структуры тягового двухдвигательного регулируемого электропривода с формированием сигнала задания системы векторного управления представлена на рис. 1.

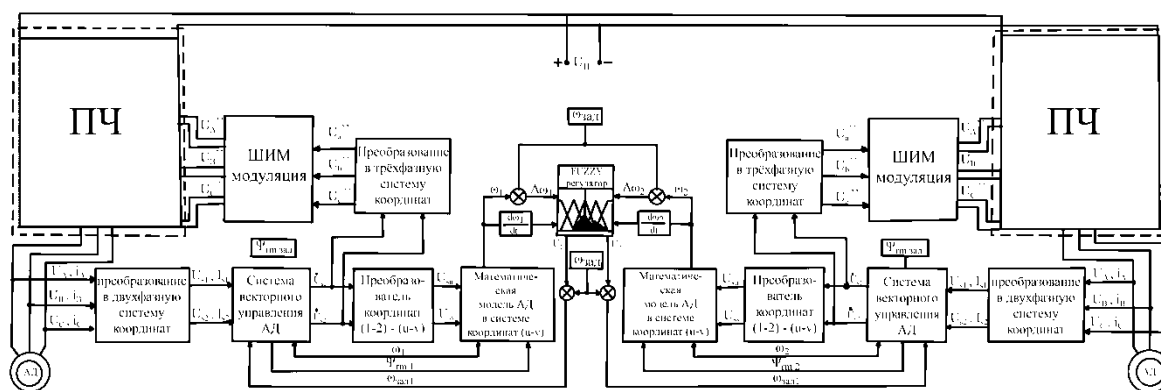


Рис. 1. Структурная схема многодвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода с

формированием сигнала задания системы векторного управления, для варианта безсенсорного управления частотой вращения роторов АД

Система управления многодвигательным электроприводом состоит из двух уровней: нижнего с классической схемой векторного управления ТАД, и верхнего с регулятором нечеткой логики- регулятором сигналов задания скорости вращения роторов ТАД (индивидуально для каждого электропривода). Нижний уровень содержит блоки преобразования трехфазной системы координат (a; b; c) в двухфазную (1-2), блоки с алгоритмом векторного управления, преобразователи системы координат (1-2) в систему координат (u; v), блоки с математической моделью для вычисления потокосцеплений роторов Ψ_m и скоростей вращения роторов ТАД ω_r и блоков обратного

преобразования двухфазной системы координат в трехфазную (a; b; c). Все эти блоки интегрированы совместно с инвертором и образуют единый полупроводниковый преобразовательный модуль с микропроцессорным управлением. Входом этого модуля является сигнал задания скорости вращения ротора ТАД, а выходом трехфазное синусоидальное напряжение, полученное широтно-импульсной модуляцией.

Процесс формирования сигналов задания скорости вращения электроприводов осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом нечеткого управления.

Структура данного алгоритма (рис. 2):



Рис. 2. Структура алгоритма системы нечеткого вывода

На вход Fuzzy-регулятора поступают сигналы рассогласования $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ фактической скорости вращения роторов ТАД $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ с заданным значением $\omega_{зад}$ и производные по скорости вращения электроприводов $\frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$.

Выходом нечеткого регулятора являются корректирующие сигналы u_1 и u_2 , которые будут добавлены к опорному сигналу задания скорости вращения роторов АД.

Представленный алгоритм нечеткого вывода состоит из трех этапов в следующей последовательности:

- преобразование четких значений входных переменных в лингвистические переменные (терм-множества) - этап фаззификации;
- обработка полученной информации в категориях нечеткой логики в соответствии с разработанной на основе экспертных оценок базой логических правил вида ЕСЛИ...ТО;
- переход от категории нечетких множеств к четким значениям выходных переменных - этап дефаззификации.

На этом этапе устанавливается соответствие между конкретным (численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей значения входной лингвистической переменной. Так для четких значений входных переменных соответствуют лингвистические входные переменные x_1 (ошибка по скорости вращения первого электропривода), x_2 (значение производной по скорости вращения первого электропривода), x_3 (ошибка по скорости вращения второго электропривода) и x_4 (значение производной по скорости вращения второго электропривода), которые заданы терм-множествами треугольного, S-образного и Z-образного вида с некоторой степенью принадлежности в диапазоне от нуля до единицы (рис.3).

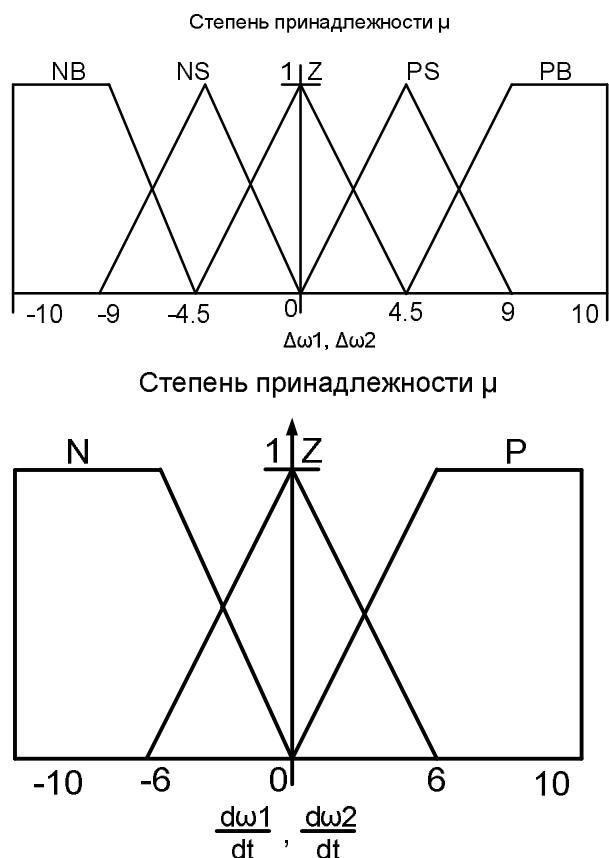


Рис. 3. Фаззификация четких значений входных переменных $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$

Входные лингвистические переменные x_1 и x_3 заданы пятью терм-множествами в области значений (на универсуме) $(-10; +10)$. Входные лингвистические переменные x_2 и x_4 заданы тремя терм-множествами также на универсуме $(-10; +10)$.

Диапазон универсумов соответствует максимальным положительному и отрицательному значениям входных переменных нечеткого регулятора и может быть обеспечен, при необходимости, с помощью блоков ограничения.

Количество терм-множеств, которыми заданы входные лингвистические переменные, было определено экспертным опросом на этапе формирования таблицы логических правил.

Для терм-множеств входных лингвистических переменные x_1 и x_3 были сделаны следующие обозначения:

Z - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ близкое к нулю;

NS - значение входного $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ сигнала отрицательное малое;

NB - значение входного $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ сигнала отрицательное большое;

PS - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ положительное малое;

PB - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ положительное большое.

Все терм-множества входных лингвистических переменных заданы тремя точками.

Терм-множество Z : $(-4,5; 0; 4,5; 0)$;

Терм-множество NS : $(-9; 0; -4,5; 1; 0; 0)$;

Терм-множество NB : $(-10; 1; -9; 1; -4,5; 0)$;

Терм-множество PS : $(0; 0; 4,5; 1; 9; 0)$;

Терм-множество PB : $(4,5; 0; 9; 1; 10; 1)$.

Для терм-множеств, которыми заданы входные лингвистические переменные x_2 и x_4 были сделаны следующие обозначения:

Z - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ близкое к нулю;

близкое к нулю;

P - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ положительное;

положительное;

N - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ отрицательное;

отрицательное;

Терм-множество Z : $(-6; 0; 0; 1; 6; 0)$;

Терм-множество P : $(0; 0; 6; 1; +\infty; 1)$;

Терм-множество N : $(-\infty; 1; -6; 1; 0; 0)$.

Все множество комбинаций терм-множеств входных лингвистических переменных образует множество подусловий, которые образуют множество условий состояния объекта регулирования. Для каждого условия состояния объекта существует свое заключение также представленное лингвистической переменной y_1 либо y_2 соответствующей четкому значению выходной переменной u_1 или u_2 . Выбор конкретного терм-множества заключения выходной лингвистической переменной определяется в соответствии с разработанной таблицей логических правил.

Таблица логических правил содержит эмпирические знания экспертов в области управления тяговыми электроприводами рудничных электровозов, представленные в формальном виде — в виде высказываний (таблица 1). Экспертами в этой области могут быть, например, проектировщики, наладчики систем управления тяговыми электроприводами, машинисты рудничных электровозов.

Таблица логических правил системы нечеткого вывода

№	ЕСЛИ (связка &)				ТО		№	ЕСЛИ (связка &)				ТО		№	ЕСЛИ (связка &)				ТО	
	x ₁	NB	x ₂	N	y ₁	PB		x ₁	NB	x ₂	P	y ₁	PS		x ₃	NB	x ₄	Z	y ₂	PB
1	x ₁	NB	x ₂	N	y ₁	PB	11	x ₁	NB	x ₂	P	y ₁	PS	21	x ₃	NB	x ₄	Z	y ₂	PB
2	x ₁	NS	x ₂	N	y ₁	PB	12	x ₁	NS	x ₂	P	y ₁	Z	22	x ₃	NS	x ₄	Z	y ₂	PS
3	x ₁	Z	x ₂	N	y ₁	PS	13	x ₁	Z	x ₂	P	y ₁	NS	23	x ₃	Z	x ₄	Z	y ₂	Z
4	x ₁	PS	x ₂	N	y ₁	Z	14	x ₁	PS	x ₂	P	y ₁	NB	24	x ₃	PS	x ₄	Z	y ₂	NS
5	x ₁	PB	x ₂	N	y ₁	NS	15	x ₁	PB	x ₂	P	y ₁	NB	25	x ₃	PB	x ₄	Z	y ₂	NB
6	x ₁	NB	x ₂	Z	y ₁	PB	16	x ₃	NB	x ₄	N	y ₂	PB	26	x ₃	NB	x ₄	P	y ₂	PS
7	x ₁	NS	x ₂	Z	y ₁	PS	17	x ₃	NS	x ₄	N	y ₂	PB	27	x ₃	NS	x ₄	P	y ₂	Z
8	x ₁	Z	x ₂	Z	y ₁	Z	18	x ₃	Z	x ₄	N	y ₂	PS	28	x ₃	Z	x ₄	P	y ₂	NS
9	x ₁	PS	x ₂	Z	y ₁	NS	19	x ₃	PS	x ₄	N	y ₂	Z	29	x ₃	PS	x ₄	P	y ₂	NB
10	x ₁	PB	x ₂	Z	y ₁	NB	20	x ₃	PB	x ₄	N	y ₂	NS	30	x ₃	PB	x ₄	P	y ₂	NB

Каждое правило данной таблицы содержит одно условие и одно заключение соответствующее этому условию. Каждое условие представлено двумя подусловиями т.е. является сложным высказыванием. Определение степени истинности сложного высказывания на основе известных значений истинности подусловий, полученных на этапе фаззификации, выполняется с использованием любого из известных выражений для логической конъюнкции.

В данном алгоритме использована формула min-конъюнкции:

$$T(x_1 \wedge x_2) = \min \{ \mu(x_1), \mu(x_2) \},$$

где $\mu(x_1)$ - степень принадлежности лингвистической переменной x_1 к некоторому множеству;

$\mu(x_2)$ - степень принадлежности лингвистической переменной x_2 к некоторому множеству;

$T(x_1 \wedge x_2)$ - степень истинности сложного высказывания (конкретного условия) базы логических правил.

Для условий состояния объекта представленного лингвистическими переменными x_3 и x_4 выполняется аналогичная процедура.

После нахождения степени истинности всех условий рассматриваемой базы логических правил, определяются значения степени истинности всех заключений базы логических правил, которые равны значениям степени истинности соответствующих им условий.

Для нахождения функции степени принадлежности каждой из выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 производится логическое объединение всех функций степени принадлежности заключений, соответствующей лингвистической переменной. Процедура задания терм-множеств заключений и их обозначения выполнены аналогично входным лингвистическим переменным x_1 и x_3 (рис.4). В данном алгоритме для нахождения функций принадлежности выходных лингвистических переменных использовано следующее выражение max-объединения:

$$\mu(y_{1(2)}) = \max \{ \mu(1), \mu(2), \dots, \mu(30) \},$$

где $\mu(y_{1(2)})$ - функция степени принадлежности выходной лингвистической переменной y_1 или y_2 ;

$\mu(1), \mu(2), \dots, \mu(30)$ - функции степени принадлежности заключений (30 - число заключений в таблице логических правил).

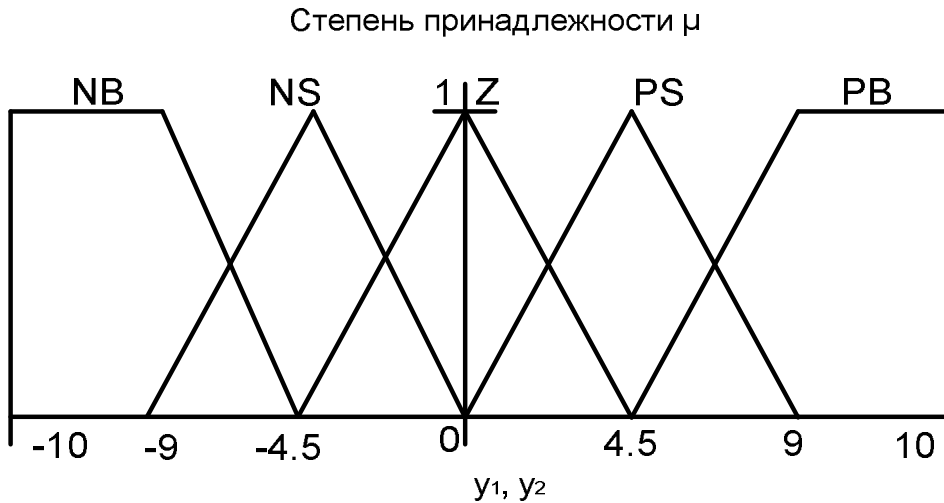


Рис. 4. Функции степени принадлежности заключений

После определения функции принадлежности каждой лингвистической переменной, выполняется процедура обратная фаззификации - дефаззификация.

В данном алгоритме переход от категории нечетких значений корректирующих сигналов выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 к обычным (четким) значениям Fuzzy-регулятора u_1 и u_2 производится наиболее распространенным методом - методом центра тяжести плоских фигур функций степени принадлежности выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 (рис. 5), образованных на этапе аккумуляции заключений, по формуле:

$$u_{1,2} = \frac{\int_{y_{1,2min}}^{y_{1,2max}} y_{1,2} \cdot \mu(y_{1,2}) dy_{1,2}}{\int_{y_{1,2min}}^{y_{1,2max}} \mu(y_{1,2}) dy_{1,2}}$$

где $u_{1,2}$ - результат дефаззификации - четкие значения корректирующих сигналов на выходе нечеткого регулятора;

$y_{1,2}$ - выходные лингвистические переменные, представленные некоторыми терм-множествами (заключениями);

$\mu(y_{1,2})$ - степени принадлежности нечетких множеств заключений, соответствующих выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 после этапа аккумуляции;

$y_{1,2min}$ и $y_{1,2max}$ - левая и правая точки интервала носителя нечетких множеств выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 .

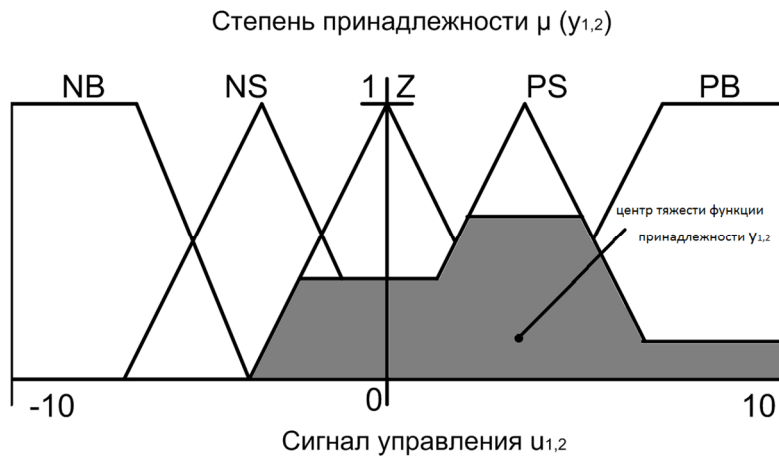


Рис. 5. Нахождение центра тяжести плоской фигуры функции степени принадлежности выходных лингвистических переменных y_1 и y_2

Полученные на выходе нечеткого регулятора четкие значения корректирующих сигналов u_1 и u_2 , добавляются к последним значениям сигналов задания скорости вращения тяговых электроприводов $\omega_{зад1}$ и $\omega_{зад2}$ и поступают на вход системы управления многодвигательным асинхронным тяговым электроприводом.

Графическое представление работы FUZZY-регулятора, изображенное на рис. 6, есть поверхность в пространстве состояний объекта регулирования.

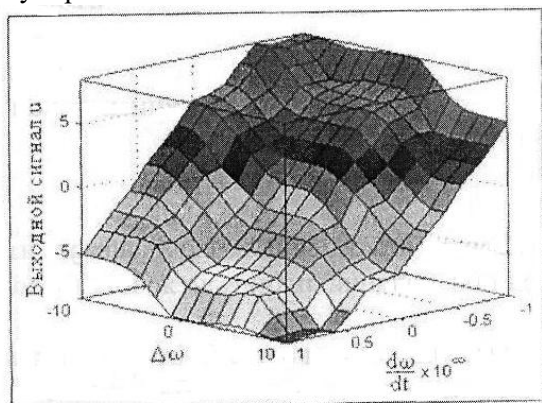


Рис. 6. Графическое представление работы FUZZY-регулятора

Для предварительной оценки результатов исследований разработанный макетный вариант автоматизированной тяговой системы рудничного электровоза прошел испытания на специально созданном для этого лабораторном стенде [6].

На рис. 7 представлены осциллограммы при исследовании влияния на многодвигательный асинхронный электропривод скачкообразного изменения сигнала задания скорости вращения роторов АД при неодинаковых нагрузках на валах АД и отличающихся электромеханических характеристиках АД двухмашинного агрегата при векторном законе управления асинхронным электроприводом и FUZZY-регулятором сигналов задания скорости вращения электроприводов на верхнем уровне.

В ходе эксперимента на выходе лабораторного источника к опорному сигналу задания скорости вращения роторов АД скачком добавлялся и убирался сигнал напряжения амплитудой 1В.

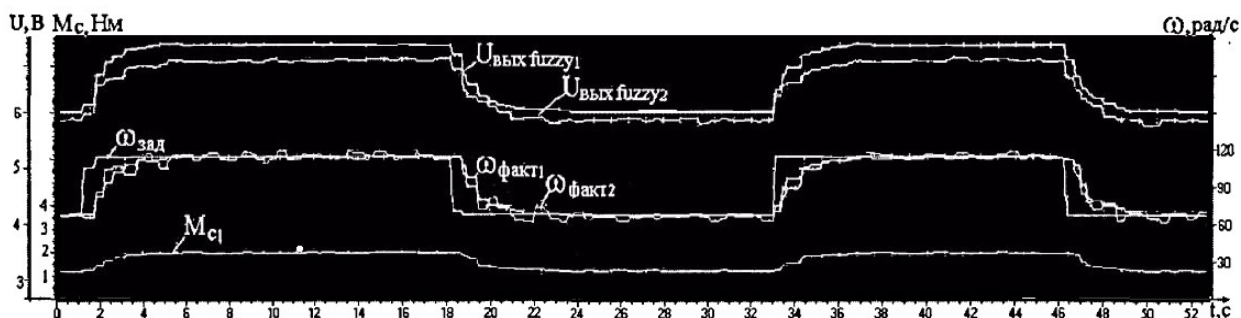


Рис. 7. Экспериментальные электромеханические характеристики двухдвигательного асинхронного электропривода с векторным алгоритмом управления и FUZZY-регулятором верхнего уровня

Выводы

Анализ результатов исследований показывает, что векторный алгоритм управления с системой формирования сигналов задания с использованием аппарата нечеткой логики дает хорошие результаты. В итоге для повышения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 – 329 с.
2. Шахтный подземный транспорт: справочное

технико-экономических показателей к применению на двухдвигательных тяговых электромеханических комплексах с ТАД рекомендуется «гибридная» система векторного управления с нечетким регулятором верхнего уровня.

REFERENCES

1. Babets E.K., Shtan'ko L.A., Salganik V.A. *Sbornik tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley gornodobyvayushchikh predpriyatiy Ukrainy v 2009 – 2010 gg. Analiz mirovoy kon'yunktury rynka ZhRS 2004 – 2011 gg.* [Collection of technical and economic parameters of mining enterprises in Ukraine in 2009 – 2010 years. An analysis of the global iron ore market

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.

3. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, О.В. Ершов // Под ред. д. т. н., проф. О.Н. Синчука – К.: АДЕФ – Украина. – 278 с.

4. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.

5. Шокарев Д.А. Асинхронный тяговый электротехнический комплекс двухсистемного рудничного электровоза / Скапа Е.И. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). С.45–48.

6. Жеребкин Б.В. Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двухосных электровозов / Б.В. Жеребкин, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). – С.17–21.

7. Кордаков В.Н., Коржев А.А. Методика определения рациональной величины силы тяги дополнительного линейного электропривода рудничного электровоза // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. – Вып. 29. – СПб.: СЗТУ, 2003. – С. 120 – 125.

8. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P. 212.

9. S.Florentsev, A. Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13 – 14, 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-0-2296.

10. Dankmeyer Hugo. Kopalniana lokomotiwa przewodowa o podwyzszonej zdolnosci przewozowej. – Pns. gorn. – 1979, 35, N 10. – с. 432 – 438. LIV.

11. S.Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybrid buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6 – 8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.

12. Shultz L. An inverter and induction motor traction drive underground mining's Locomotives / Shultz L., Van Wyk D., Dunford W.S., Pzest R.B., Landy C.F. // Elek. Bahnen. – 2000. – 88. - №3. – p. 145-148.

Поступила в печать 01.12.2012.

conditions 2004 - 2011 years]. Krivoy Rog, Vidavnichiy dim Publ., 2011. 329 p.

2. Butt Yu.F., Gryadushchiy V.B., Debelyy V.L., Koval' A.N., Furman A.L., Shchuka V.M., Yatsenko V.A. *Shakhtnyy podzemnyy transport: spravochnoe izdanie. Shakhtnyy lokomotivnyy i rel'sovyy transport* [Mine underground transport: a reference book. Mine locomotive and rail transport]. Donetsk, «VIK» Publ., 2009. 481 p.

3. Sinchuk O.N., Chumak V.V., Erzhov O.V. *Impul'snye sistemy upravleniya i zashchity na rudnichnom elektrovoznom transporte* [Impulse control and protection system for mine locomotive transport]. Kiev, ADEF Publ. 278 p.

4. Debelyy V.L., Debelyy L.L., Mel'nikov S.A. *Osnovnye napravleniya razvitiya shakhtnogo lokomotivnogo transporta* [The main directions of development of the mine locomotive transport]. *Ugol' Ukrainy - Coal of Ukraine*, no. 6, 2006, pp. 30-31.

5. Shokarev D.A., Skapa E.I. *Asinkhronnyy tyagovyy elektrotekhnicheskyy kompleks dvukhsistemnogo rudnichnogo elektrovoza* [Asynchronous traction electrical mine complex dual-system electric locomotive]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy - Electromechanical and saving system*, issue 4 (16), 2011, pp. 45-48.

6. Zherebkin B.V., Shokarev D.A., Skapa E.I. *Sintez struktury sistemy vektornogo upravleniya tyagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov dvuosnykh elektrovozov* [The synthesis of the structure of the vector control traction electrical systems biaxial locomotives]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy: shchokvartal'nyy naukovo-vyrobnychyy zhurnal - Electromechanical and saving system: quarterly scientific journal production*, issue 4 (16), 2011, pp. 17-21.

7. Kordakov V.N., Korzhev A.A. *Metodika opredeleniya ratsional'noy velichiny sily tyagi dopolnitel'nogo lineynogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza* [Methods of determining the value of a rational traction additional linear electric mine locomotive]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya - Problems of Mechanical Engineering, and Mechanical Engineering*, issue 29, 2003, pp. 120-125.

8. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P. 212.

9. S.Florentsev, A. Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13 – 14, 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-0-2296.

10. Dankmeyer Hugo. Kopalniana lokomotiwa przewodowa o podwyzszonej zdolnosci przewozowej. – Pns. gorn. – 1979, 35, N 10. – с. 432 – 438. LIV.

11. S.Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybrid buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6 – 8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.

12. Shultz L. An inverter and induction motor traction drive underground mining's Locomotives / Shultz L., Van Wyk D., Dunford W.S., Pzest R.B., Landy C.F. // Elek. Bahnen. – 2000. – 88. - №3. – p. 145-148.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

Основным видом транспорта железорудных шахт является электровозный, обеспечивающий 100% подземных грузоперевозок. Электровозный транспорт является одним из основных потребителей электрической энергии (ЭЭ), потребляя 18 – 20% ЭЭ от всей потребляемой подземными потребителями железорудных шахт. Для решения этой проблемы в Украине возобновлены работы по созданию отечественных электроэнергоэффективных видов ТЭМС на базе IGBT-преобразователей и асинхронных тяговых электрических двигателей (АТД).

При этом, предпочтение отдается векторному управлению, поскольку оно обладает достаточно высоким качеством регулирования.

Однако, для двухдвигательного тягового комплекса, работающего параллельно на общую нагрузку, в силу ряда причин присущи различные моменты нагрузок ТЭД, которые механически жестко связаны каждый со своей колесной парой. Выравнивание нагрузок между двигателями можно осуществить с помощью нечеткого регулятора (FUZZY- регулятора). Система управления многодвигательным электроприводом состоит из двух уровней: нижнего с классической схемой векторного управления ТАД, и верхнего с регулятором нечеткой логики- регулятором сигналов задания скорости вращения роторов ТАД (индивидуально для каждого электропривода).

На вход Fuzzy-регулятора поступают сигналы рассогласования $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ фактической скорости вращения роторов ТАД $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ с заданным значением $\omega_{зад}$ и производные по скорости вращения электроприводов $\frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$. Полученные на выходе нечеткого регулятора четкие значения корректирующих сигналов u_1 и u_2 , добавляются к последним значениям сигналов задания скорости вращения тяговых электроприводов $\omega_{зад1}$ и $\omega_{зад2}$ и поступают на вход системы управления многодвигательным асинхронным тяговым электроприводом.

Для проверки работы автоматической системы управления многодвигательными тяговыми комплексами на ТАД были реализованы натурные испытания на лабораторном стенде. Результаты испытаний показывают, что векторный алгоритм управления с системой формирования сигналов задания с использованием аппарата нечеткой логики дает хорошие результаты. Для повышения технико-экономических показателей к применению на двухдвигательных тяговых электромеханических комплексах с ТАД рекомендуется «гибридная» система векторного управления с нечетким регулятором верхнего уровня.

Ключевые слова: автоматизация, электровоз, тяговая электромеханическая система, шахты, нечеткий регулятор, векторное управление.

УДК 629.423.1

О. Н. СІНЧУК, А. Б. СЬОМОЧКІН, В. А. ФЕДОТОВ (КНУ), Б. В. ЖЕРЕБКІН (СПБДУ)

Криворізький національний університет. 50027, м.Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., Вул. XXII партз'їзду, б. 11, тел. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДВОДВИГУННИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ РУДНИЧНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Основним видом транспорту залізорудних шахт є електровозний, що забезпечує 100% підземних вантажоперевезень. Електровозний транспорт є одним з основних споживачів електричної енергії (ЕЕ), споживаючи 18 - 20% ЕЕ від всієї споживаної підземними споживачами залізорудних шахт. Для вирішення цієї проблеми в Україні відновлені роботи по створенню вітчизняних електроенергоефективних видів ТЕМС на базі IGBT-перетворювачів і асинхронних тягових електричних двигунів (АТД).

При цьому, перевага віддається векторному управлінню, оскільки воно має досить високу якість регулювання. Однак, для двохдвигунного тягового комплексу, який працює паралельно на загальне навантаження, в силу ряду причин притаманні різні моменти навантажень ТЭД, які механічно жорстко пов'язані кожен зі своєю колісною парою. Вирівнювання навантажень між двигунами можна здійснити за допомогою нечіткого регулятора (FUZZY- регулятора). Система управління багатодвигунним електроприводом складається з двох рівнів: нижнього з класичною схемою векторного управління ТАД, і верхнього з регулятором нечіткої логіки- регулятором сигналів задания швидкості обертання роторів ТАД (індивідуально для кожного електроприводу).

© Синчук О. Н. та ін., 2015

На вхід Fuzzy-регулятора надходять сигнали неузгодженості $\Delta\omega_1$ і $\Delta\omega_2$ фактичної швидкості обертання роторів ТАД $\Delta\omega_1$ і $\Delta\omega_2$ із заданим значенням $\omega_{зад}$ і похідні за швидкістю обертання електроприводів $\frac{d\omega_1}{dt}$ і $\frac{d\omega_2}{dt}$. Отримані на виході нечіткого регулятора чіткі значення коригувальних сигналів u_1 і u_2 , додаються до останніх значень сигналів задання швидкості обертання тягових електроприводів $\omega_{зад1}$ і $\omega_{зад2}$ і надходять на вхід системи управління багатодвигунним асинхронним тяговим електроприводом.

Для перевірки роботи автоматичної системи управління багатодвигунними тяговими комплексами на ТАД були реалізовані натурні випробування на лабораторному стенді. Результати випробувань показують, що векторний алгоритм управління з системою формування сигналів задання з використанням апарату нечіткої логіки дає хороші результати. Для підвищення техніко-економічних показників до застосування на дводвигунних тягових електромеханічних комплексах з ТАД рекомендується «гібридна» система векторно-керування з нечітким регулятором верхнього рівня

Ключові слова: автоматизація, електровоз, тягова електромеханічна система, шахти, нечіткий регулятор, векторне управління.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андриєнко П. Д.*

UDC 629.423.1

O. N. SINCHUK, A. B. SYOMOCHKIN, V. A. FEDOTOV (KNU), B. V. ZHEREBKIN (SPNU)

Kryvyi Rih National University. 50027, Krivoy Rig, Dnipropetrovsk region. Str. XXII Party Congress, 11, tel. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

AUTOMATIC CONTROL OF ELECTROMECHANICAL DOUBLE-ENGINE TRACTION COMPLEX OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

Electric locomotive train is the main mode of transport in iron ore mines, which facilitates almost 100% of all underground freight. Electric locomotive transport uses up to 18 – 20% of total electric energy (EE) required for mine operations and is the main consumer of EE within the typical iron ore mine. A renewed initiative was sought to resolve the problem of excessive energy consumption involving the development of locally (Ukrainian) built energy efficient thermo-electric material (TEM) based IGBT – converters and asynchronous electric traction motors (electric induction motors).

Torque Vector Algorithm is the preferred method of current control within electric induction motors because of its greatly enhanced performance capabilities. However the twin induction motor traction system which operates in parallel on a common load experiences various torques and momentum forces due to a number of factors which are mechanically linked to specific axles. Equilibration of loads between the twin motors can be achieved with an aid of FUZZY controller/regulator. The controls for multiple - electric induction motor system consists of two stages – the lower stage which includes classic scheme Vector Algorithm control system, and the upper stage which includes FUZZY controller/regulator for input signals setting the rotor speed within motors (individually for each motor).

FUZZY-regulator receives mismatched input signals $\Delta\omega_1$ and $\Delta\omega_2$ representative of the actual rotor speed in induction motors $\Delta\omega_1$ and $\Delta\omega_2$ with a predetermined value of $\omega_{зад}$ and derivatives based on the motors' rotation speed.

The precise correction signal values u_1 and u_2 generated on the output from FUZZY-regulator are added to the last values of input signals (i.e. $\omega_{зад1}$ and $\omega_{зад2}$) which predetermined the rotation speed within induction motors and are also an input to the controls of the multiple electric induction motor traction system.

Induction motors were subject to full scale laboratory testing to verify the workings and efficiency of automatic control systems within multiple electric induction motor traction setup. Test results show that torque Vector Algorithm method of current control along with the input signal generating system using FUZZY-regulator shows good, promising results.

The use of a "hybrid" system of torque Vector Algorithm method of current control along with upper level FUZZY-regulator is advisable in order to improve physical performance and economic indicators related to the operations of twin induction motor traction systems.

Keywords: automation, electric, electromechanical traction system, mines, fuzzy controller, vector control.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*