

УДК 621.3.078.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭСКАЛАТОРА
МЕТРОПОЛИТЕНА С ФАЗЗИ-УПРАВЛЕНИЕМ****Е. Ф. Банев**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: banev@ukr.net

Обосновывается целесообразность использования системы ТПН–АД с фаззи-регулированием при модернизации электроприводов эскалаторов метрополитенов. Приведен алгоритм работы фаззи-регулятора, обеспечивающий минимизацию потерь энергии. Выполнено моделирование системы электропривода с фаззи-регулятором в статических и динамических режимах, и показана эффективность работы электропривода с предложенным принципом регулирования.

Ключевые слова: электропривод эскалатора, ТПН-АД, фаззи-регулирование.**МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕСКАЛАТОРА
МЕТРОПОЛІТЕНУ З ФАЗЗИ-КЕРУВАННЯМ****Є. Ф. Банєв**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: banev@ukr.net

Обґрунтовується доцільність використання системи ТПН–АД з фаззи-регулюванням при модернізації електроприводів ескалаторів метрополітену. Наведено алгоритм роботи фаззи-регулятора, що забезпечує мінімізацію втрат енергії. Виконано моделювання системи електроприводу з фаззи-регулятором у статичних та динамічних режимах, та показано ефективність роботи електропривода із запропонованим принципом регулювання.

Ключові слова: електропривод ескалатора, ТПН-АД, фаззи-регулювання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В решении важнейшей для Украины проблемы энергоресурсосбережения электропривод (ЭП) играет особо важную роль как потребляющий около 70 % всей вырабатываемой электроэнергии. В [1] показано, что экономия одной единицы электроэнергии при существующем состоянии оборудования теплоэлектростанций (ТЭС) в энергетическом эквиваленте экономит пять единиц энергоресурсов, а ЭП, как средство автоматизации технологических процессов, обладает свойством синергетического умножения экономии энергоресурсов. Приоритетным направлением экономии электроэнергии средствами ЭП является широкая модернизация электропривода заменой нерегулируемого ЭП на регулируемый, о чем свидетельствует опыт промышленно развитых стран.

Большинство существующих электроприводов эскалаторных установок, находящихся в эксплуатации метрополитенов Украины, уже выработали свой ресурс и требуют модернизации [2]. Электропривод эскалаторов метрополитена потребляет примерно половину мощности, подводимой к шинам напряжения 380 В, поэтому создание энергосберегающих электроприводов является актуальной задачей.

Электропривод существующих эскалаторных установок представляет собой разомкнутую систему с асинхронным двигателем (АД). Для станций глубокого заложения с целью обеспечения требуемого пускового момента применяют асинхронный двигатель с фазным ротором, а там, где длина полотна эскалатора относительно невелика, используют асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором [3]. Характерной особенностью работы эскалаторной установки метрополитена является существенное изменение пассажиропотока в течение дня.

Результаты проведенного энергоаудита и исследования пассажиропотока в харьковском метрополитене показали, что среднесуточная загрузка эскалаторных установок не превышает 10–15 % от номинальной и в течение большей части времени электродвигатель работает со значительной недогрузкой, т.е. со сниженным КПД, потребляя существенную реактивную мощность [2]. Улучшить энергетические показатели недогруженного асинхронного двигателя можно за счет снижения питающего напряжения, обеспечивающего уменьшение намагничивающего тока, потерь в меди и стали. Регулирование напряжения статора может быть обеспечено полупроводниковым преобразователем. В [4] показано, что с учетом специфики экономического состояния метрополитена в Украине в настоящий период при модернизации эскалаторов метрополитена целесообразно использовать электропривод, построенный по системе тиристорный преобразователь напряжения–асинхронный двигатель (ТПН–АД). Известно, что близкие к минимуму значения потерь в такой ситуации могут быть обеспечены поддержанием скорости, соответствующей оптимальному скольжению s_{opt} , либо минимизацией тока статора при заданной нагрузке [5–7]. Для поддержания постоянства оптимального скольжения требуется система автоматического регулирования с датчиком скорости, в то время как минимизация тока статора, обеспечивающая близкие к минимуму потери, не требует введения в ЭП вышеуказанного датчика. Достоинством вышеупомянутого способа регулирования, кроме снижения потерь в электродвигателе, является также снижение их в силовых соединительных проводах, согласующих трансформаторах, силовой коммутационной аппаратуре и др.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ.

Целью настоящей работы является проверка методом компьютерного моделирования энергетической эффективности электропривода по системе ТПН–АД с фаззи-регулятором при регулировании по предложенному алгоритму. Асинхронный двигатель представлялся математической моделью в координатах d–q и моделировался с помощью стандартного блока, представленного в Matlab библиотеки SimPowerSystems.

Тиристорный преобразователь напряжения моделировался с учетом нелинейностей тиристоров и системы импульсно-фазового управления. В качестве регулятора в работе предлагается фаззи-регулятор с алгоритмом оптимального управления по двум легко измеряемым величинам: току I и напряжению U фазы статора.

На рис. 1 представлены графические зависимости тока статора I от напряжения U при фиксированных значениях нагрузки M_{c1} и M_{c2} , соответственно, ($M_{c2} > M_{c1}$).

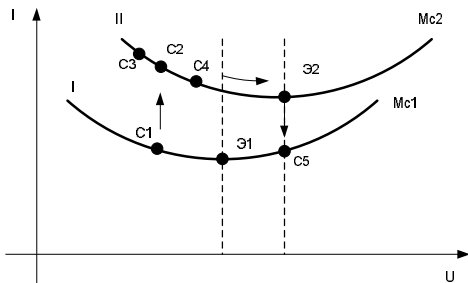


Рисунок 1 – Зависимость тока статора от напряжения АД

Из кривых видно, что минимум тока обеспечивается для разных значений M_c при разных напряжениях U (соответственно точки Э1 и Э2). Изменение тока может быть следствием как изменения нагрузки, так и изменения питающего напряжения.

При реализации фаззи-регулятора для обоих входов были выбраны следующие характеристики входных лингвистических переменных: число термов равно трем, форма термов треугольная, название термов соответственно «Отрицательное изменение» (ОИ), «малые изменения» (МИ), «положительное изменение» (ПИ) (рис. 2). Для выходной переменной было выбрано также три термина треугольной формы, определяемых в соответствии с влиянием на величину угла регулирования $\Delta\alpha$ как «положительное приращение» (+), «малые приращения» (0), «отрицательное приращение» (-).

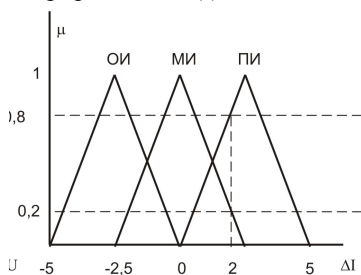


Рисунок 2 – Входные и выходные термы фаззи-регулятора

Поясним алгоритм функционирования фаззи-регулятора, используя зависимости тока статора от напряжения АД (рис. 1) и характеристики переменных (рис. 2). Пусть в исходном положении при моменте сопротивления M_{c1} точка, характеризующая режим работы ЭП, соответствует точке $C1$ на характеристике I . Допустим, вследствие захода пассажиров на эскалатор момент нагрузки увеличился до значения M_{c2} . Данной нагрузке для установившегося режима соответствует характеристика II зависимости тока статора от напряжения. Примем также, что данное изменение нагрузки привело к увеличению тока до значения, определяемого точкой $C2$ на характеристике II при прежнем значении напряжения фазы статора. То есть значение изменение тока ΔI положительно, что соответствует терму «ПИ», а напряжение U не изменилось, т.е. $\Delta U=0$ («МИ»). В соответствии с таблицей правил (табл. 1) фаззи-регулятор выдаст сигнал «-».

Таблица 1 – Таблица правил фаззи-регулятора

$\Delta I \backslash \Delta U$	ОИ	МИ	ПИ
ОИ	+	0	-
МИ	0	0	0
ПИ	-	0	+

Отрицательное изменение угла регулирования вызовет увеличение прикладываемого к фазе статора напряжения и уменьшение тока, рабочая точка сместится в $C4$. Таким образом, для последующего шага входными для фаззи-регулятора будут по ΔI положительное, а по входу ΔU отрицательное приращение. Для всех последующих вычислений приращения напряжения будут положительными, а тока – отрицательными, т.е. рабочая точка будет двигаться по характеристике II по направлению к Э2. По мере приближения к минимуму тока, изменения входных величин фаззи-регулятора ΔU и ΔI , а также выходной $\Delta\alpha$ будут уменьшаться, не изменяя свой знак, стремясь к нулю вблизи экстремальной точки. При достижении минимума тока фаззи-регулятор прекратит изменения угла регулирования до тех пор, пока на вход не поступит сигнал, отличный от нуля.

Проверка функционирования электропривода с вышеописанным регулятором выполнялась методом компьютерного моделирования в пакете Matlab 7.10 в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3.

Моделирование выполнено для электропривода с асинхронным двигателем 4АНК-315-М8, номинальной мощностью $P_n=105$ кВт и скоростью вращения $n_n=730$ об/мин, который установлен на одном из эскалаторов станции метро «Пушкинская» харьковского метрополитена. Входные сигналы фаззи-регулятора, действующие значения тока и напряжения фазы статора преобразовывались в дискретный сигнал с помощью блоков «zero-order hold» с периодом дискретизации $T_0=0,4$ с. Приращения тока и напряжения вычислялись с помощью звеньев «unit delay», позволяющих получить значение сигнала для предыдущего шага.

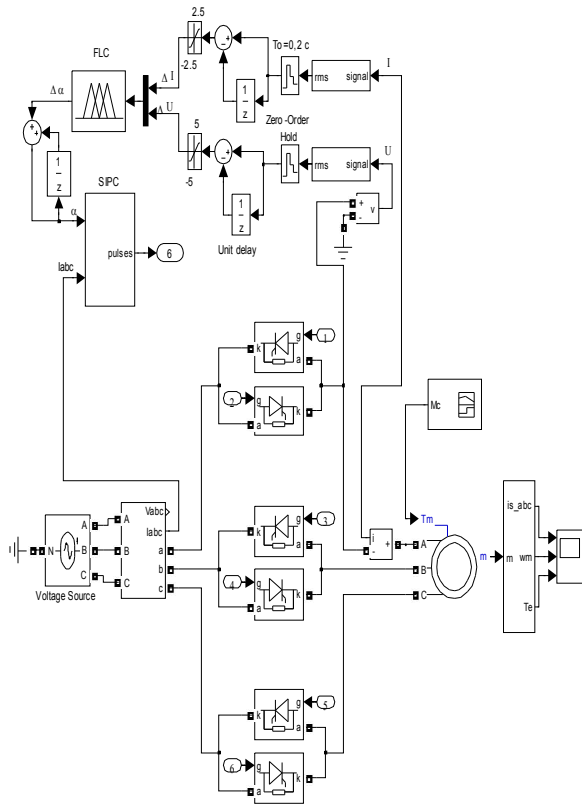


Рисунок 3 – Структурная схема ЭП с фаззи-регулятором в пакете Matlab 7.10.

Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5. В начальный период времени показана работа ЭП под нагрузкой $M_c=0,2$ Мн. Временные диаграммы показывают, что фаззи-регулятор правильно обрабатывает управление ТПН–АД и электропривод работает при сниженном напряжении АД, что проявляется в снижении тока статора. Благодаря этому ток статора, по сравнению с ЭП, работающим с номинальным напряжением, уменьшается в 1,5 раза, при этом, естественно, снижаются как потери в обмотках статора, так и в стали за счет снижения напряжения. Скорость ЭП с фаззи-регулятором при этом отличается от скорости разомкнутой системы всего лишь на 0,5 %, что несущественно и допускается «Правилами устройства и безопасной эксплуатации эскалаторов» (ПУБЭЭ).

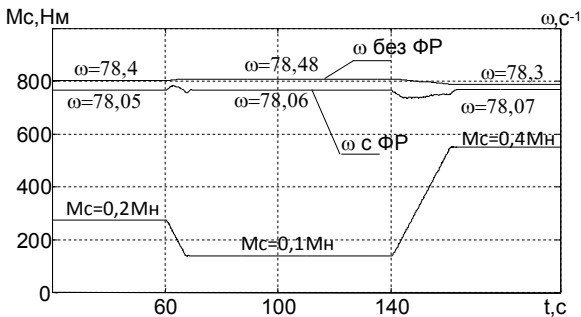


Рисунок 4 – Переходные процессы по скорости и моменту АД

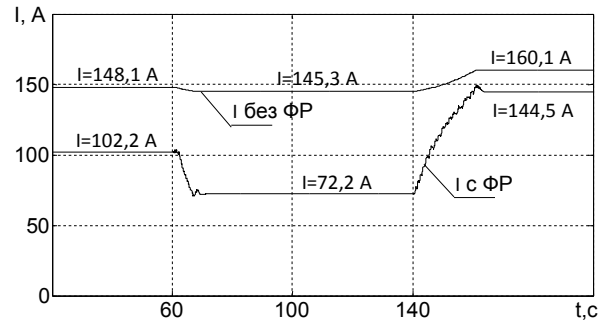


Рисунок 5 – Переходные процессы по току АД

Начиная с 60 секунды, моделировался постепенный сход людей с эскалатора линейно спадающим моментом сопротивления до $M_c=0,1$ Мн. Процесс уменьшения нагрузки в нерегулируемом ЭП сопровождался несущественным снижением тока до 145,3 А. В электроприводе с фаззи-регулятором ток статора уменьшился на 30 %, до 72,2 А. В установившемся режиме, при нагрузке $M_c=0,1$ Мн, ток электропривода с фаззи-регулятором более чем в два раза меньше тока нерегулируемого электропривода. Скорость эскалатора при уменьшении нагрузки с $M_c=0,2$ Мн до $M_c=0,1$ Мн в электроприводе с фаззи-управлением увеличилась всего на 0,01 %.

Начиная со 140 секунды, моделировалось плавное увеличение нагрузки до $M_c=0,4$ Мн, что в реальных условиях соответствует постепенному заполнению эскалатора вышедшими на станции из поезда пассажирами. Величина нагрузки $M_c=0,4$ Мн была выбрана с учетом требований ПУБЭЭ, предусматривающих 2,5-кратный запас по мощности двигателя, и соответствует практически полной загрузке в часы «пик». Процесс загрузки эскалатора сопровождался незначительным снижением скорости ЭП на 0,2 % при увеличении тока до 160,1 А, а при работе ЭП с фаззи-регулятором скорость незначительно увеличилась на 0,01 %, но при этом ток установился на уровне 144,5 А, что на 10 % меньше.

ВЫВОДЫ. Таким образом, результаты моделирования подтверждают эффективность применения предложенного фаззи-управления ЭП эскалатора метрополитена. Разработанная математическая модель электропривода по системе ТПН–АД с фаззи-управлением позволяет исследовать ЭП эскалатора метрополитена с учетом дискретных свойств преобразователя и СИФУ. В наибольшей мере энергосберегающий эффект проявляется при малых нагрузках эскалатора, а, как свидетельствует статистический учет, средняя нагрузка эскалатора не превышает 15 % [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Клепиков В.Б., Розов В.Ю. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 30. – С. 18–21.

2. Энергетический аудит на ГП «Харьковский метрополитен». Отчет по третьему этапу работ. Инв. № 99-УЭ-3.

3. Соколов М.М. Электрооборудование общепромышленных механизмов: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

4. Клепиков В.Б., Колотило В.И., Банев Е.Ф., Филиппович В.П. К выбору типа энергоресурсосберегающего электропривода эскалатора метрополитена // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – С. 486–488.

5. Андрущенко О.А. Требования к асинхронному электродвигателю и тиристорному преобразова-

телю в электроприводе ТПН–АД // Электромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 1998. – Вип. 50. – С. 28–31.

6. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

7. Петров Л.П., Капинос В.И., Халамиренко И.В. Оптимизация коэффициента мощности асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения // Межвуз. сб. тр. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1985. – № 55. – С. 52–60.

MODELING OF ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE ESCALATOR OF METRO WITH FUZZY CONTROL

E. Banev

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
ul. Frunze, 21, Kharkov, 61000, Ukraine. E-mail: banev@ukr.net

In the article is considered simulation of energy-efficient electric drive of metro by the system TVC–IM with fuzzy control in the program Matlab with using blocks of SimPowerSystems. Is justified using fuzzy regulator performed on the basis of microprocessor. The Algorithm is demonstrated optimal fuzzy controller, which provides at least the stator current of IM at different load escalator. Is a block diagram demonstrated of TVC–IM with an optimal fuzzy controller for the simulation in Matlab. The analysis and comparison of the transient electrical drive system for TVC–IM with optimal controller and open-circuited drive.

Key words: electrical drive of escalator, TVC-IM, optimal fuzzy controller.

REFERENCES

1. Klepikov V.B., Rozov V.Y. The role of the actuator in solving the problem of energy saving in Ukraine // *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. – Kharkiv: NTU «KPI», 2008. – № 30. – PP. 18–21. [In Russian]

2. The energy audit on the State Enterprise "Kharkov Metro". Report on the third phase of works. Inv. № 99-УЭ-3. [In Russian]

3. Sokolov M.M. Electrical machinery and industrial society: teaching aids. for students in higher education. – М.: Energiya, 1976. – 488 p. [In Russian]

4. Klepikov V.B., Kolotilo V.I., Banev E.F., Filipovich V.P. By choosing the type of electric Energy Saving subway escalator // *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. – Kharkiv: NTU «KPI», 2008. – № 30. – PP. 486–488. [In Russian]

5. Andrushenko O.A. Requirements for induction motors and thyristor converter in electric TVC-IM // *Electrical machinery and electrical equipment: scientific-technical collection*. – 1998. – Iss. 50. – PP. 28–31. [In Russian]

6. Braslavskiy I.Y., Ishmatov Z.S., Polyakov V.N. *Energy-saving electric drive: teaching aids for students in higher education*. – М.: Publishing Center «Academiya», 2004. – 256 p. [In Russian]

7. Petrov L.P., Kapinos V.I., Khamirenko I.V. Optimization the power factor induction motors with thyristor voltage convertor // *Intercollegiate Proceedings*. – М.: Moscow Power Engineering Institute, 1985. – № 55. – PP. 52–60. [In Russian]

Стаття надійшла 23.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Бештою О.С.