

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ FUZZY УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЭСКАЛАТОРА МЕТРОПОЛИТЕНА СИСТЕМЫ ТПН-АД

В решении важнейшей для Украины проблемы энергоресурсосбережения электропривод (ЭП) играет особо важную роль как потребляющий более 70 % всей вырабатываемой электроэнергии. В [1] показано, что экономия одной единицы электроэнергии при существующем состоянии оборудования ТЭС в энергетическом эквиваленте экономит пять единиц энергоресурсов, а ЭП, как средство автоматизации технологических процессов, обладает свойством лавинообразного 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 эскалаторов 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 нагрузка эскалаторных установок не превышает 5 – 10 % от номинальной и в течение большей части времени электродвигатель работает со значительной недогрузкой, то есть со сниженным КПД, потребляя 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 могут быть обеспечены поддержанием скорости соответствующей оптимальному скольжению  $s_{opt}$ , а также минимизацией тока статора при заданной нагрузке [5,6,7]. 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.

Целью настоящей работы является проверка возможности использования интеллектуального метода управления электроприводом по системе ТПН-АД на основе fuzzy регулятора, обеспечивающего минимум тока статора при заданной нагрузке  $M_c$ . Выбор fuzzy регулятора обусловлен возможностью современной микропроцессорной техники, кроме функций регулирования, решать другие требуемые и целесообразные задачи управления технологическим процессом, например, обеспечения плавного пуска и останова эскалаторной установки, режима рекуперативного торможения, защиту в аварийных режимах, мониторинг состояния ЭП и самонастройку.

В работе предлагается алгоритм экстремального управления fuzzy регулятора по двум легко измеряемым величинам: току  $I$  и напряжению  $U$  фазы статора.

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

Структурная схема fuzzy регулятора представлена на рисунке 2. На входы fuzzy регулятора (FLC) через сумматоры подается разность текущего и предыдущего значений входных величин.

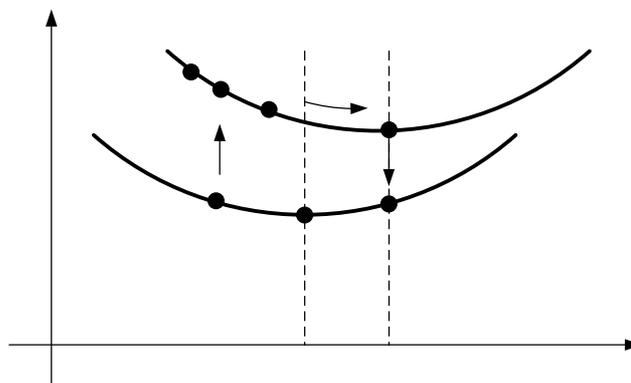


Рисунок 1 – Зависимость тока статора от напряжения АД.

При реализации fuzzy 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. 3 а,б). Для выходной переменной было выбрано пять термов

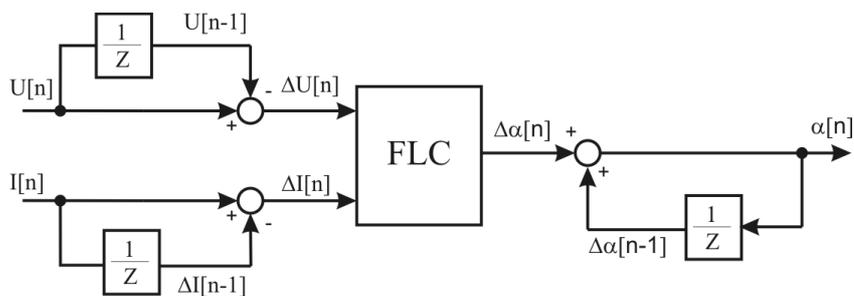


Рисунок 2 – Структурная схема fuzzy поискового регулятора.

треугольной формы определяемых в соответствии с влиянием на величину угла регулирования  $\alpha$  как: «большое положительное приращение» (+ +), «среднее положительное приращение» (+), «малые приращения» (0), «среднее отрицательное приращение» (-) и «большое отрицательное приращение» (- -) (рис. 3 в.).

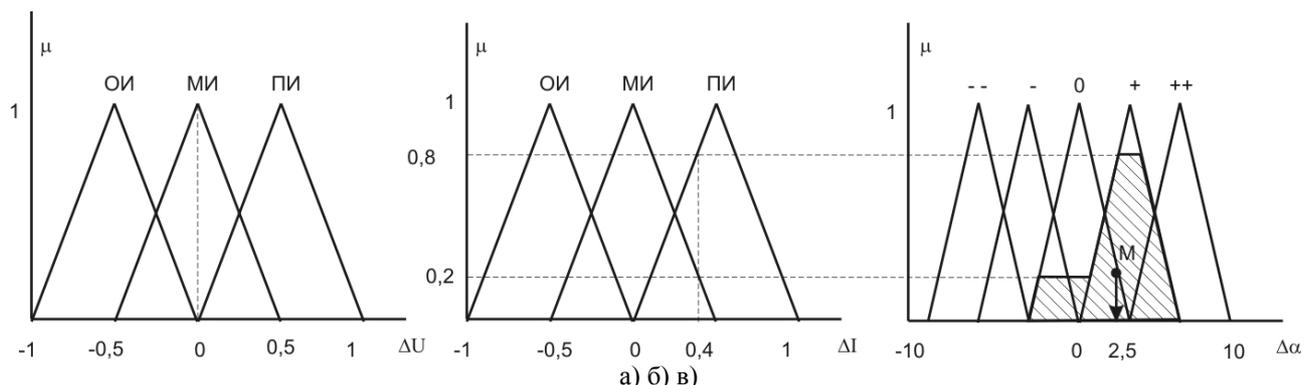


Рисунок 3 – Входные и выходные термы fuzzy регулятора.

Поясним алгоритм функционирования fuzzy регулятора, используя зависимости тока статора от напряжения АД (рис.1) и характеристики переменных (рис.3). 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 так же, что данное изменение нагрузки привело к увеличению тока до значения определяемое точкой  $C2$  на характеристике  $II$  при прежнем значении напряжения фазы статора, то есть значение изменения напряжения  $\Delta U$  соответствует степени принадлежности  $\mu=1$  для термина МИ (рис.3а). Изменение тока  $\Delta I$  допустим равно 0,4, то есть со степенью принадлежности  $\mu=0,2$  принадлежит терму МИ и со степенью принадлежности  $\mu=0,8$  терму ПИ (рис.3 б). В соответствии с алгоритмом Мамдани (табл. 1) активируются следующие выходные термы: на уровне 0,2 терм «0» и на уровне 0,8 терм «+». Выходное значение  $\Delta\alpha$  определялось на основе метода центроида (рис. 3 в). Точка  $M$  представляет собой центр тяжести заштрихованной фигуры, а проекция ее на ось  $\Delta\alpha$  определит приращение угла регулирования, которое в рассматриваемом случае имеет значение  $\Delta\alpha=2,5$ . Положительное изменение угла регулирования вызовет уменьшение прикладываемого к фазе статора напряжения и увеличения тока, рабочая точка сместится в  $C3$ . Таким образом, для последующего шага входными для fuzzy регулятора будут по  $\Delta I$  положительное, а по входу  $\Delta U$  отрицательное приращения. На данном этапе процедура определения степеней принадлежности соответствующих входных термов повторится, а также повторится процедура активации выходных термов в соответствии с алгоритмом Мамдани по таблице. 1. Приращение  $\Delta\alpha$  на этом шаге будет отрицательным, что приведет к уменьшению угла регулирования, то есть увеличению напряжения и перемещения рабочей точки в  $C4$ . Для всех последующих вычислений приращения напряжения будут положительными, а тока отрицательными, то есть рабочая точка будет двигаться по характеристике  $II$  по направлению к Э2. По мере приближения к минимуму тока, изменения входных величин fuzzy регулятора  $\Delta U$  и  $\Delta I$ , а также выходной  $\Delta\alpha$  будут уменьшаться, не изменяя свой знак, стремясь к нулю вблизи экстремальной точки. При достижении минимума тока fuzzy регулятор прекратит изменения угла регулирования до тех пор, пока на вход не поступит сигнал отличный от нуля.

При уменьшении нагрузки эскалатора, к примеру до значения  $M_{c1}$ , рабочая точка, в установившемся режиме, переместится на характеристику  $I$  в  $C5$  и на входы fuzzy регулятора по-

Таблица 1. – Таблица правил поискового fuzzy регулятора.

$\Delta I \backslash \Delta U$	Отрицательное изменение	Малые изменения	Положительные изменения
Отрицательное изменение	++	-	--
Малые изменения	0	0	0
Положительные изменения	--	+	++

ступит отрицательный сигнал изменения тока  $\Delta I < 0$  и  $\Delta U = 0$ , что в соответствии с таблицей правил приведет к отрицательному приращению угла регулирования то есть увеличению напряжения. Для следующего шага, приращения тока  $\Delta I$  и напряжения  $\Delta U$  будут положительными, и fuzzy регулятор выдаст сигнал на увеличение угла регулирования, что приведет к уменьшению напряжения и приближению рабочей точки к экстремуму. Все последующие изменения входных величин будут отрицательными, а рабочая точка будет двигаться по характеристике  $I$  в сторону экстремума  $EI$ . Таким образом, несмотря на то, что первый шаг после изменения нагрузки выполняется в сторону противоположную от экстремума, алгоритм Мамдани обеспечивает на всех последующих шагах изменение сигнала регулирования вызывающего перемещение рабочей точки в точку минимума тока.

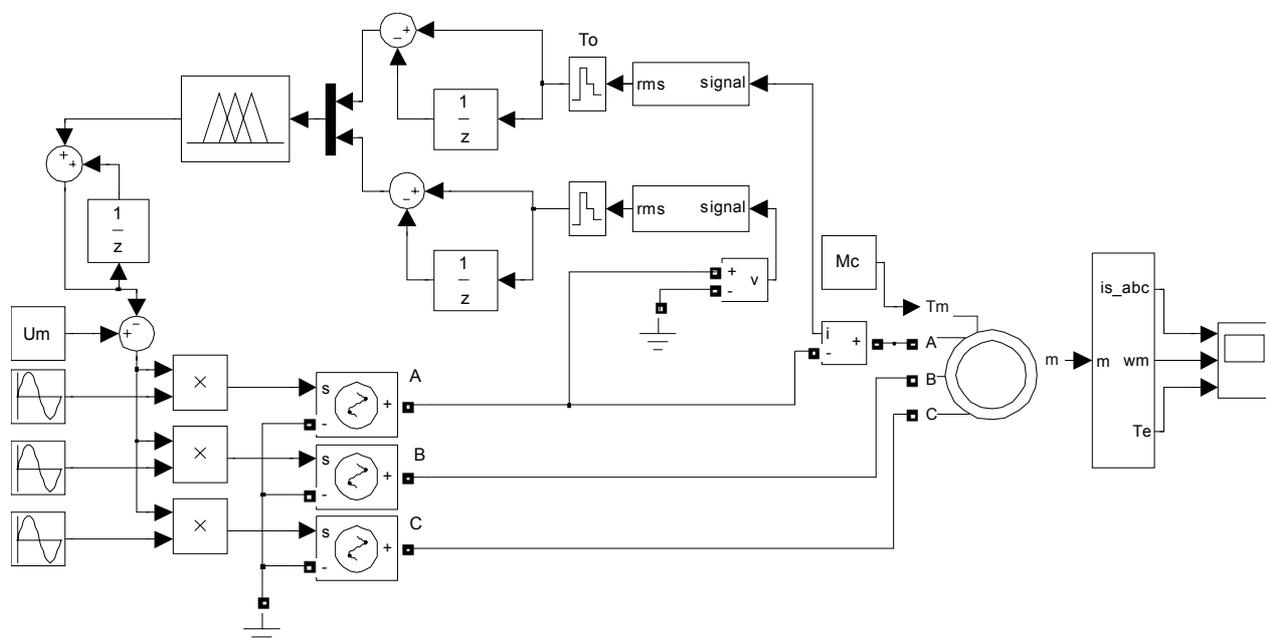


Рисунок 4 – Структурная схема ЭП с fuzzy регулятором в пакете Matlab 7.4.

Проверка функционирования ЭП с вышеописанным регулятором выполнялась методом компьютерного моделирования в пакете Matlab 7.4 в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 4. Моделирование было выполнено для ЭП с АД 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 fuzzy регулятора, действующие значения тока и напряжения фазы статора, преобразовывались в дискретный сигнал с помощью блоков «zero-order hold» с периодом дискретизации  $T_0 = 0,2$  с. Приращения тока и напряжения вычислялись с помощью звеньев «unit delay», позволяющие получить значение сигнала для предыдущего шага. Тиристорный преобразователь представлялся, как источник синусоидального сигнала с частотой 50 Гц, регулирующий амплитуду без учета искажения формы кривой напряжения. Результаты моделирования представлены на рисунках 5, 6. В начальный период времени показана работа ЭП под нагрузкой  $M_c = 0,2 M_n$ . Временные диаграммы показывают, что fuzzy регулятор правильно обрабатывает управление ТПН-АД и ЭП 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 за счет снижения напряжения в стали. Скорость ЭП с fuzzy регулятором при этом отличается от скорости разомкнутой системы на 0,5 %, что несущественно и допускается ПУБЭЭ. Начиная с 60 секунды моделировался постепенный сход людей с эскалатора линейно спадающим моментом сопротивления до  $M_c = 0,1 M_n$ . Процесс уменьшения нагрузки в нерегулируемом ЭП сопровождался несущественным снижением тока до 145,3 А при том, как в ЭП с fuzzy регулятором ток статора уменьшился на 30% до 72,2 А. В установившемся режиме при нагрузке  $M_c = 0,1 M_n$  ток ЭП с fuzzy регулятором более чем в 2 раза меньше тока нерегулируемого ЭП. Скорость эскалатора при уменьшении нагрузки с  $M_c = 0,2 M_n$  до  $M_c = 0,1 M_n$  в ЭП с fuzzy управлением увеличилась всего на 0,01 %. Начиная с 140 секунды моделировалось плавное увеличение нагрузки до  $M_c = 0,4 M_n$ , что в реальных условиях соответствует постепенному заполнению эскалатора вышедшими на станции пассажирами. Величина нагрузки  $M_c = 0,4 M_n$  была выбрана с учетом требований ПУБЭЭ, предусматривающих 2,5 кратный запас по мощности двигателя. Процесс загрузки эскалатора сопровождался незначительным снижением скорости ЭП на 0,2 % при увеличении тока до 160,1 А, а при работе ЭП с fuzzy регулятором скорость незначительно увеличилась на 0,01 %, но при этом ток установился на уровне 144,5 А, что на 10 % меньше. Таким образом, результаты моделирования подтверждают эффективность применения предложенного fuzzy управления ЭП эскалатора метрополитена работающего со сниженной нагрузкой.

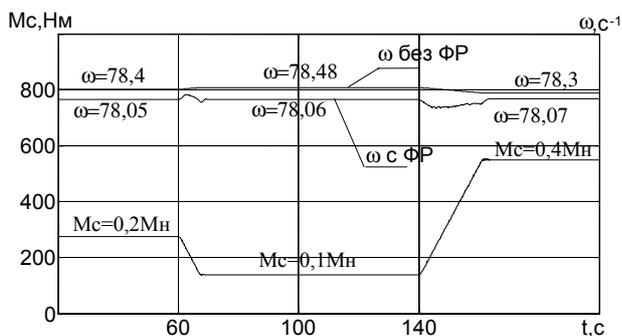


Рисунок 5 – Временные диаграммы скорости и момента

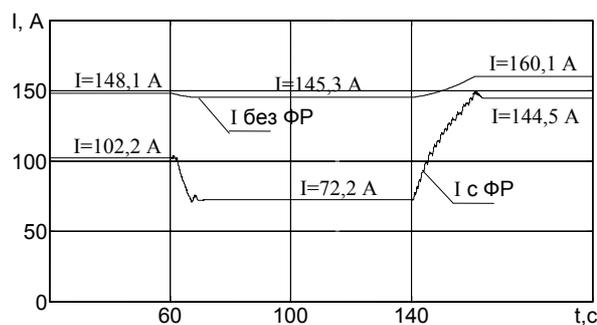


Рисунок 6 – Временные диаграммы тока

**Вывод:** управление ЭП системы ТПН-АД эскалатора метрополитена с помощью fuzzy регулятора может обеспечить уменьшение потерь при сниженных нагрузках за счет минимизации тока статора. При этом fuzzy регулятор выполняется с двумя входами по легкоизмеряемым величинам тока и напряжения фазы статора с тремя термами по каждому входу с обработкой входных сигналов по алгоритму Мамдани и деффагификацией методом центраида.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клепиков В.Б., Розов В.Ю. «О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине». Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» - Харків: 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. – 3-е изд., перераб и доп.. – М.: «Энергия», 1976 – 488 с., ил.
4. Клепиков В.Б., Колотило В.И., Банев Е.Ф., Филиппович В.П. «К выбору типа энергоресурсосберегающего электропривода эскалатора метрополитена». Вестник НТУ «ХПИ», 2008 г с. 486 - 488.
5. Андрищенко О.А. Требования к асинхронному электродвигателю и тиристорному преобразователю в электроприводе ТПН-АД.//Електромашинобудування та електрообладнання:Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 1998. Вип. 50. – С.
6. Энергосберегающий асинхронный электропривод. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/И.Я. Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – 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» - В кн.: Межвуз.сб.тр. №55. М.: Моск.энерг.ин-т, 1985, с. 52-60.