

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ С УТОЧНЕНИЕМ ОБЛАСТИ МИНИМУМА ПОТЕРЬ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

О.Б.ШОНИН, д-р техн. наук, профессор, *ninosh_eltech@mail.ru*

В.С.ПРОНЬКО, аспирант, *pronko.vr@gmail.com*

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В настоящее время асинхронный частотно-регулируемый электропривод на базе полупроводниковых преобразователей частоты получил широкое распространение благодаря относительной простоте и надежности конструкции, использования цифровых систем управления, обеспечивающих точность и гибкость управления технологическим процессом, что позволяет добиться значительного повышения качества продукции и рентабельности производства, снижения расхода электроэнергии. Обеспечение энергетической эффективности привода в широком диапазоне режимных параметров остается нерешенной в полной мере задачей и требует дальнейших исследований.

Статья посвящена снижению потерь в асинхронном электроприводе на основе энергосберегающих алгоритмов управления, позволяющих обеспечивать требуемый режим приводного механизма при одновременной минимизации потерь в меди и стали двигателя. На основе модели двигателя с учетом магнитных потерь получены зависимости потерь в меди и стали, а также полных потерь от абсолютного скольжения для различных рабочих точек привода. Установлены зависимости экстремальных значений абсолютного скольжения от частоты вращения ротора для использования в контролерах систем управления по критерию максимального КПД, максимума коэффициента мощности и минимума тока статора. Для минимизации потерь в условиях изменяющихся параметров двигателя предложен энергосберегающий алгоритм, основанный на комбинации метода модели потерь и итерационного метода уточнения минимума потребляемой мощности. Эффективность предложенной системы управления, использующей регулятор на базе нечеткой логики, подтверждена сопоставлением диаграмм мощности потерь и КПД, полученных при использовании традиционного закона скалярного частотного управления и оптимального закона управления.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, энергосбережение, оптимизация, алгоритмы нечеткой логики, компьютерное моделирование.

Методы энергосбережения в электроприводе. В настоящее время работы по снижению потерь в частотно-регулируемом приводе ведутся по двум направлениям [4]. К первому относится разработка новых материалов и конструкций полупроводниковых элементов и самих двигателей [12]. За счет усложнения конструкции и соответствующего повышения стоимости такой подход позволяет увеличить КПД, однако лишь для ограниченного диапазона изменения режимных параметров привода. Второй путь предполагает применение энергосберегающих алгоритмов управления, позволяющих обеспечить требуемый режим привода при минимальных потерях энергии [11]. Наибольший эффект от введения мер по энергосбережению будет наблюдаться для стационарных установок большой мощности, в которых даже незначительное повышение КПД в перспективе длительного срока службы приводит к значительной экономии электроэнергии. Примером таких установок может служить вентилятор главного проветривания подземных выработок с приводом мощностью несколько мегаватт, для которого характерен широкий диапазон регулирования производительностью в соответствии с изменяющейся потребностью шахты в свежем воздухе по мере освоения месторождения [5, 9].

В соответствии с требованиями технологического процесса привод должен обеспечивать заданные значения скорости вращения ω и момента на валу M , которые в стационарном

режиме определяются координатами точки пересечения механической характеристики двигателя и приводного механизма. Предпосылкой к оптимальному управлению является возможность обеспечения требуемого режима приводного механизма различным сочетанием управляющих воздействий – частоты и амплитуды напряжения питания при скалярном управлении и проекций тока статора на координатные оси d , q при векторном. Варьирование управляющих воздействий сопровождается изменением магнитного потока, потерь энергии, КПД и коэффициента мощности. Задача оптимального управления состоит в обеспечении рабочей точки привода при таких значениях управляющих воздействий, когда потери энергии принимают минимальное значение [10].

На практике находят применение весьма простые алгоритмы управления, к которым относятся обеспечивающие рабочий режим привода при минимуме тока статора или максимуме отношения электромагнитного момента к току статора [3]. Использование таких алгоритмов хотя и повышает КПД двигателя, но не обеспечивает оптимальный режим по потерям в приводе. Достичь максимально возможной эффективности электропривода в стационарных режимах работы можно с помощью законов оптимального управления по критерию минимума потерь или максимума КПД. Формулировке таких законов посвящено достаточно много работ [1, 2, 6].

Метод модели потерь отличается быстрым действием, однако требует точного описания потерь при изменяющихся параметрах двигателя вследствие температурной зависимости его параметров, нелинейности цепи намагничивания, влияния высших гармоник и пр. Метод поиска минимума потерь в реальном масштабе времени автоматически учитывает все виды потерь и их изменение в процессе работы привода, однако для итеративного поиска экстремума требуется конечное время. Для объединения преимуществ обоих методов представляется целесообразным использование комбинированного метода, в котором базовое значение координат экстремума задается моделью потерь, а уточнение координат производится методом поиска.

Целью работы является сравнительный анализ энергосберегающих алгоритмов управления приводами по различным критериям и оценка эффективности комбинированного способа минимизации потерь, использующего для уточнения координат экстремума методы нечеткой логики.

Исследование энергетических характеристик асинхронного двигателя. В методе модели потерь основной задачей построения оптимального закона управления двигателем является математическое описание различных составляющих потерь, их включение в модель двигателя, определение текущих значений параметров двигателя с помощью аддитивного наблюдателя и вычисление координат экстремума функции потерь. Потери в двигателе состоят из потерь в меди ΔP_{Cu} и стали ΔP_{Fe} , механических потерь ΔP_{mech} на трение и вентиляцию двигателя, дополнительных потерь ΔP_{add} , обусловленных пространственными гармониками в воздушном зазоре и высшими гармониками напряжения и тока, особенностями работы ШИМ инвертора и зависимостью параметров двигателя от частоты. При частоте синусоидальной ШИМ двухуровневого инвертора порядка десятка килогерц высокочастотные потери малы и их можно учесть вместе с дополнительными потерями на уровне, не превышающими 5 % от общих потерь. Основную долю потерь составляют потери в обмотках статора $\Delta P_s = R_s I_s^2$ и ротора $\Delta P_r = R_r I_r^2$ и потери на гистерезис $\Delta P_h = k_h \omega_s \Psi_m^2$, вихревые токи в магнитной системе двигателя $\Delta P_{ec} = k_{ec} \omega_s^2 \Psi_m^2$ (здесь R_s , R_r – сопротивления статорной и роторной обмоток; I_s , I_r – токи статора и ротора; Ψ_m – амплитуда потокосцепления; ω_s – скорость вращения поля статора). Потери в меди $\Delta P_{Cu} = \Delta P_s + P_r$ и в стали $\Delta P_{Fe} = \Delta P_{ec} + \Delta P_h$ зависят от режимных параметров привода и могут быть минимизированы в каждой рабочей точке путем изменения параметров управляющих воздействий.

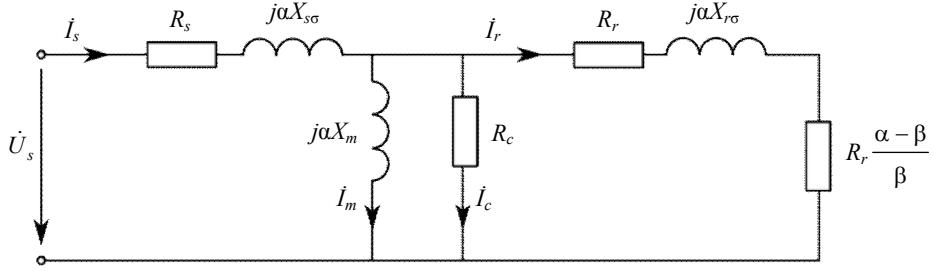


Рис.1. Схема замещения фазы асинхронного двигателя

Для исследования энергетических характеристик асинхронного двигателя и энергосберегающих алгоритмов управления воспользуемся моделью асинхронного двигателя (рис.1), в которой магнитные потери $\Delta P_{Fe} = R_c I_c^2$ учтены сопротивлением R_c , включенным параллельно индуктивности намагничивания X_m .

В схеме замещения использованы значения относительной скорости вращения поля статора $\alpha = \omega_s / \omega_{s0}$ и абсолютного скольжения $\beta = (\omega_s - \omega_r) / \omega_{s0}$, где ω_r – скорость вращения ротора, эл. град; ω_{s0} – номинальная скорость вращения поля статора, эл. град.

Введем обозначения для сопротивлений (проводимостей) участков расчетной схемы: ветви тока статора $Y_s = 1/Z_s$, ветви тока ротора $Y_r = 1/Z_r$, ветви тока намагничивания $Y_m = 1/j\alpha X_m$, ветви активного тока магнитных потерь $Y_c = 1/R_c$, эквивалентной ветви $Y_e = Y_r + Y_m + Y_c$ и входного сопротивления (проводимости) $Y_{dr} = 1/Z_{dr}$,

$$Z_s = R_s + j\alpha X_{s\sigma}; \quad Z_r = R_r(\alpha/\beta) + j\alpha X_{r\sigma}; \quad Z_{dr} = Z_s + 1/Y_e. \quad (1)$$

Токи ветвей вычисляются по формулам

$$\dot{I}_s = \dot{U}_s Y_{dr}; \quad \dot{I}_r = \dot{I}_s Y_r / Y_e; \quad \dot{I}_m = \dot{I}_s Y_m / Y_e; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_s Y_c / Y_e. \quad (2)$$

По найденным токам находятся потери в статоре, роторе и магнитной цепи

$$\Delta P_s = 3R_s I_s^2; \quad \Delta P_r = 3R_r I_r^2; \quad \Delta P_c = 3R_c I_c^2. \quad (3)$$

Входная R_{in} и выходная мощности двигателя R_{out} без учета механических и дополнительных потерь записываются в виде

$$P_{in} = 3U_s^2 \operatorname{Re}(Y_{dr}); \quad P_{out} = 3U_s^2 |Y_{dr}|^2 |H_r^{(i)}|^2 R_r \frac{\alpha - \beta}{\beta}, \quad (4)$$

где $H_r^{(i)} = Y_r / Y_e$ – коэффициент передачи тока статора в ветвь ротора.

Момент двигателя вычисляется по формуле

$$M = \frac{P_{out}}{\omega_r} = z_p \frac{P_{out}}{\alpha - \beta} = 3z_p U_s^2 |Y_{dr}|^2 |H_r^{(i)}|^2 \frac{R_r}{\beta}. \quad (5)$$

Запишем выражения для КПД и коэффициента мощности двигателя $\chi = \cos \varphi$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|Y_{dr}|^2 |H_r^{(i)}|^2 R_r \frac{\alpha - \beta}{\beta}}{\operatorname{Re}(Y_{dr})}, \quad \chi = \frac{\operatorname{Re}(Y_{dr})}{|Y_{dr}|}. \quad (6)$$

Из приведенных формул следует, что в каждой рабочей точке привода ω_r , M токи, потери в меди и стали и полные потери ΔP_{Σ} являются функциями абсолютного

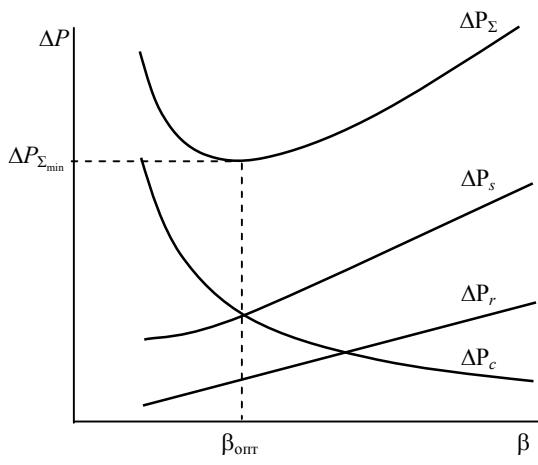


Рис.2. Типичная зависимость отдельных составляющих и полных потерь в двигателе от абсолютного скольжения

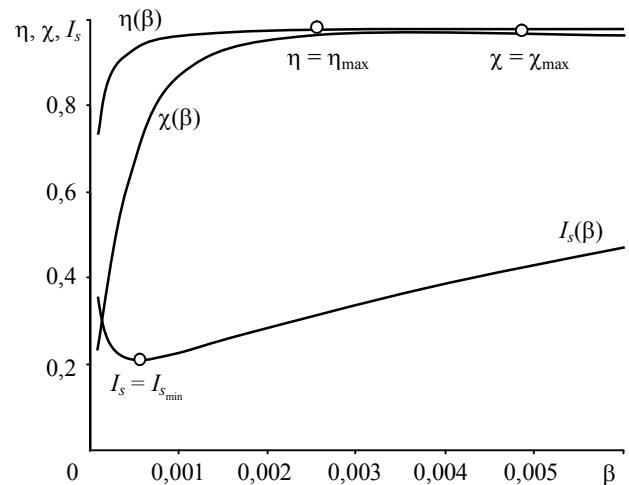


Рис.3. Зависимости КПД, тока статора и коэффициента мощности от абсолютного скольжения

скольжения. Типичные кривые потерь в одной из рабочих точек привода при изменении параметра β показаны на рис.2, из которого видно, что при разной тенденции изменения потерь в стали и меди функция суммарных потерь имеет минимум при некотором оптимальном значении абсолютного скольжения $\beta_{\text{опт}}$.

Основные показатели режима работы двигателя – ток, КПД, коэффициент мощности – также зависят от абсолютного скольжения. На рис.3 показаны зависимости основных показателей работы двигателя 4А335М4 мощностью 315 кВт, полученные при изменении абсолютного скольжения для рабочей точки привода $\bar{\omega}_r = 0,6 \bar{M} = 0,36$. Из графиков следует, что все зависимости имеют экстремальный характер с разными значениями параметра $\beta_{\text{опт}}$ для каждой из кривых.

Сформулируем законы управления по критерию максимального КПД $\eta \rightarrow \text{max}$, максимального значения коэффициента мощности $\chi \rightarrow \text{max}$ и минимума тока статора $I_s \rightarrow \text{min}$ и сравним энергетические показатели двигателя для различных законов управления.

Как следует из формулы (6), КПД и коэффициент мощности являются функциями двух переменных β , $\alpha = \beta + \omega_r$ и не зависят от момента. В этом случае координаты максимума КПД и максимума коэффициента мощности зависят только от скорости вращения ротора: $\beta_{e,\chi \rightarrow \text{max}} = f_\chi(\omega_r)$, $\beta_{e,\eta \rightarrow \text{max}} = f_\eta(\omega_r)$.

Для получения зависимости тока статора от абсолютного скольжения для заданной рабочей точки ω_r , M_{ref} запишем выражение для напряжения статора, которое необходимо для создания заданного момента M_{ref} при известных значениях параметров α, β :

$$U_s = \sqrt{\frac{M_{\text{ref}}}{3z_p |Y_{dr}|^2 |H_r^{(i)}|^2 \frac{R_r}{\beta}}}.$$

Тогда формула для вычисления тока статора примет вид:

$$I_s = U_s |Y_{dr}| = \sqrt{\frac{M_{\text{ref}} \beta}{3z_p R_r |H_r^{(i)}|^2}}. \quad (7)$$

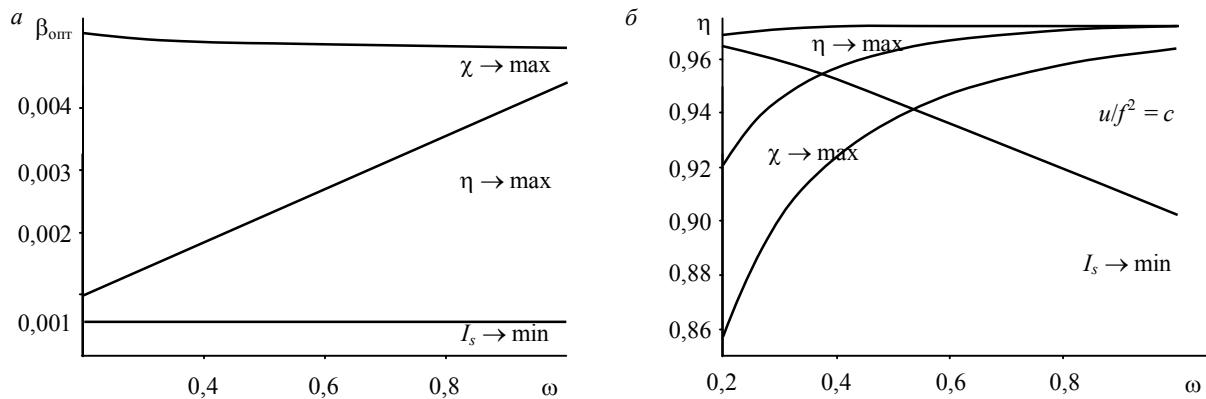


Рис.4. Оптимальные значения абсолютного скольжения (а) и КПД двигателя (б) при различных законах управления

В формуле (7) электромагнитный момент двигателя M_{ref} является коэффициентом и не влияет на положение экстремума. Поэтому координата минимума тока статора не зависит от момента двигателя и является функцией частоты вращения ротора $\beta_{e,I_s \rightarrow \min} = f_{I_s}(\omega_r)$.

Обычно оптимальные значения абсолютных скольжений находятся как корни полиномов 4-й степени, которые получаются из условия существования экстремума функций $\eta(\beta, \omega_r)$, $\chi(\beta, \omega_r)$ и $I_{s \min}(\beta, \omega_r, M)$, либо поиском экстремумов численными методами. Результаты численного расчета оптимальных значений абсолютных скольжений как функций относительной скорости вращения ротора $\bar{\omega}_r = \omega_r / \omega_{r0}$ представлены на рис.4. Из графиков видно, что величины $\beta_{\text{опт}}$ для законов управления по критерию максимального значения коэффициента мощности и критерию минимума тока статора изменяются незначительно, а оптимальное значение абсолютного скольжения по критерию максимального КПД с увеличением скорости ротора растет примерно по линейному закону.

На рис.4, б показано, как изменяется зависимость КПД двигателя от скорости вращения ротора при оптимальных значениях абсолютных скольжений $\beta_{e,\chi \rightarrow \max}$, $\beta_{e,\eta \rightarrow \max}$, $\beta_{e,I_s \rightarrow \min}$, зависимости которых от скорости ротора представлены на рис.4, а.

Из графиков на рис.4, б видно, что рассматриваемые законы управления отличаются по эффективности: выигрыш в КПД от использования оптимального закона регулирования $\eta \rightarrow \max$ по сравнению с законом регулирования по минимуму тока $I_s \rightarrow \min$ и максимуму коэффициента мощности $\chi \rightarrow \max$ составляет до 7-8 % зависимости от режима работы привода. На рис.4, б показана зависимость изменения КПД двигателя от скорости вращения ротора для привода с вентиляторной нагрузкой $\hat{M} = \bar{\omega}_r^2$ при законе регулирования $U/f^2 = \text{const}$, который широко используется в скалярной системе частотного управления электроприводов насосов и вентиляторов. Сравнение графиков показывает, что минимизация потерь в двигателе позволяет повысить его КПД по сравнению с традиционным законом управления до 12 %.

Отличие значений КПД при различных законах управления (рис.4, б) объясняются поведением кривых потерь в меди и стали (рис.5). Из рис.5, б видно, что закон управления по минимуму тока проигрывает закону управления по максимуму КПД из-за превышения магнитных потерь, а эффективность закона управления по максимуму коэффициента мощности ниже соответствующей величины для закона управления по максимуму КПД из-за превышения потерь в меди (рис.5, а). Отметим, что при управлении по критерию $\eta \rightarrow \max$ потери в меди и стали примерно равны между собой.

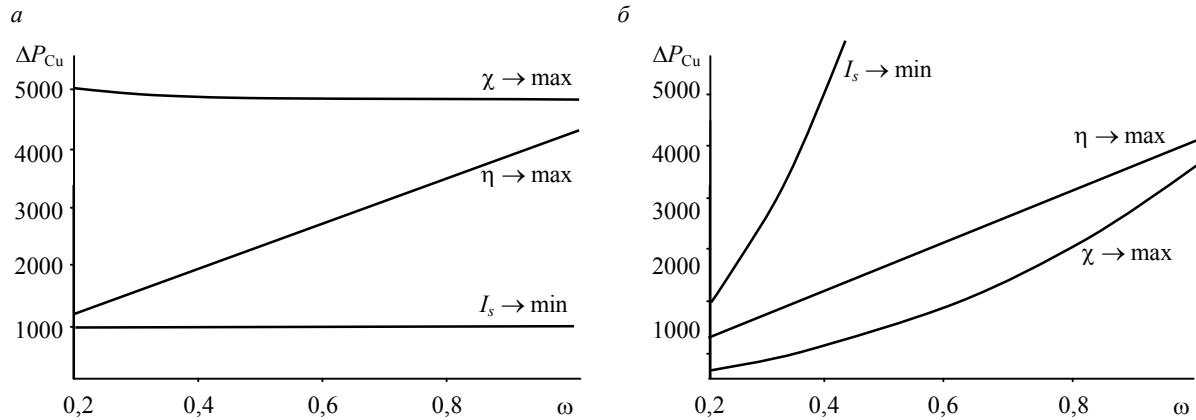


Рис.5. Потери в меди (a) и стали (b) при различных законах управления

Реализация оптимального управления электроприводом на базе комбинированного метода определения минимума потерь. Вывод оптимального закона управления в аналитическом виде, удобном для реализации в контроллерах преобразователей частоты, является весьма сложной задачей ввиду трудностей построения точной модели двигателя, учитывающей все виды потерь, изменение параметров двигателя из-за их температурной зависимости, насыщения магнитной цепи, поверхностного эффекта и пр. Изменение параметров двигателя в рабочем диапазоне температур и под действием других факторов приводит к изменению координат экстремума функции потерь, отклонению от оптимального режима и требует коррекции управляющих воздействий на основе данных о текущих параметрах двигателя, для получения которых требуется введение в систему управления адаптивного наблюдателя [3]. Итеративный метод поиска не требует знания параметров привода – он основан на контроле входной мощности привода и ступенчатом изменении управляющих воздействий до достижения минимума потребляемой мощности, например, по методу золотого сечения, методу Монте-Карло и др. [11]. Основная задача метода поиска состоит в снижении времени достижения оптимального режима на основе современных методов повышения сходимости итерационных методов. Для объединения положительных сторон рассмотренных способов управления рассмотрим комбинированный метод экстремального управления, использующий для уточнения координат экстремума методы нечеткой логики, позволяющие снизить время поиска за счет адаптивного изменения параметров итеративного поиска минимума функции потерь.

Создание и проверка работы энергосберегающего алгоритма управления осуществлялись на основе модели электропривода с системой управления в среде MATLAB/Simulink. Поскольку стандартная модель двигателя из библиотеки SimPowerSystems не учитывает потери в стали, использовалась динамическая модель в виде системы дифференциальных уравнений, которая соответствует расчетной схеме (см. рис.1), в которой сделана замена $j\omega = d/dt$.

Структура скалярной системы частотного управления приводом на основе энергосберегающего алгоритма комбинированного типа показана на рис.6. Система управления содержит два контура: регулирования скорости и энергосберегающий. Контур регулирования скорости включает ПИД-регулятор, который по сигналу ошибки скорости вращения $\Delta\omega_r = \omega_{ref} - \omega_r$ вырабатывает задание по частоте напряжения статора ω_s .

Энергосберегающий контур вычисляет оптимальное значение абсолютного скольжения по измеренной скорости вращения ротора на основании линейной аппроксимации зависимости $\beta_{opt}(\omega_r)$, которая показана на рис.4, a. Оптимальное скольжение является первой составляющей задания по абсолютному скольжению $\beta_{ref} = \beta_{opt} + \Delta\beta_s$. Вторая составляющая

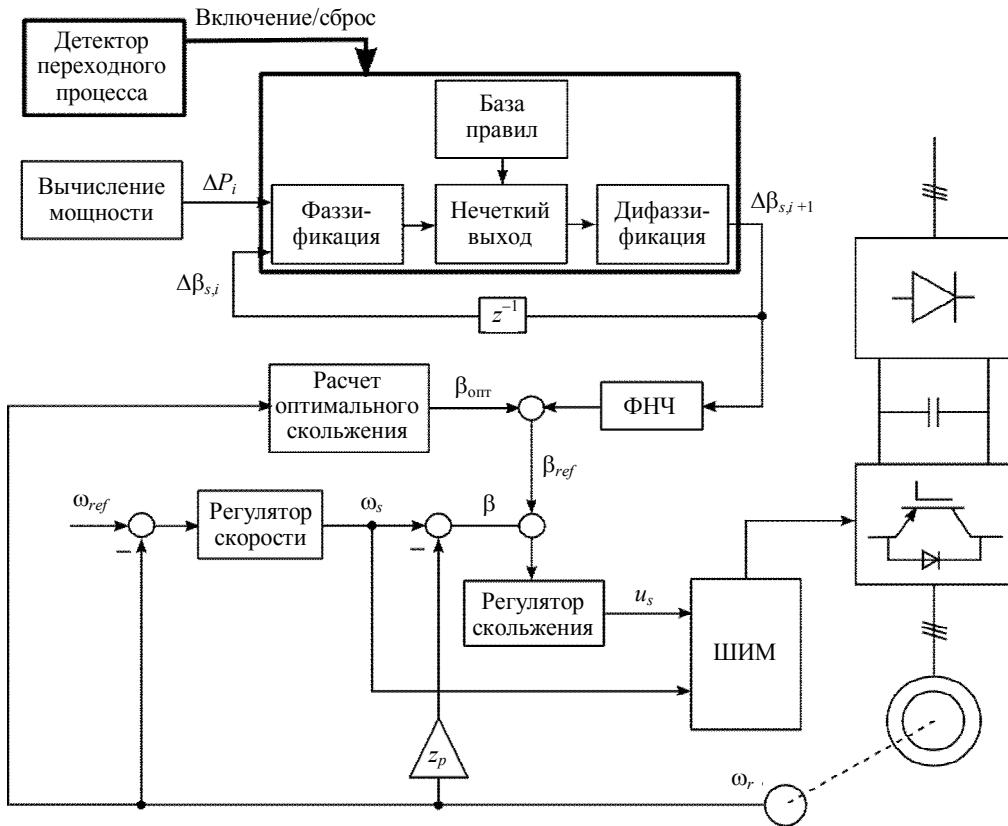


Рис.6. Структура скалярной системы частотного управления привода с энергосберегающим регулятором

$\Delta \beta_s$ формируется поисковым регулятором. Результат сравнения текущего значения абсолютного скольжения с заданием поступает на вход ПИ-регулятора, вырабатывающего задание по амплитуде напряжения и значению коэффициента модуляции, определяющего сигналы управления ШИМ-инвертором.

Вычисление поправки $\Delta \beta_s$ к расчетному значению абсолютного скольжения производится итерационным способом нечетким регулятором путем сравнения значений потребляемой приводом мощности на текущем P_{i+1} и предыдущем P_i шаге. В зависимости от приращения мощности $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$ и абсолютного скольжения $\Delta \beta_{s,i}$ на предыдущем шаге i принимается решение об изменении абсолютного скольжения $\Delta \beta_{s,i+1}$ на текущем шаге $i+1$. При этом значение величины $\Delta \beta_{s,i}$ фиксируется с помощью блока задержки z^{-1} . В результате система управления постепенно переводит привод из условно оптимального режима, рассчитанного по номинальным параметрам двигателя, в оптимальный режим работы, который определяется реальными параметрами двигателя.

Итерационный поиск минимума потребляемой мощности производится в стационарном режиме работы привода. Для активации алгоритма поиска при достижении приводом установленного режима и его отключения в переходных режимах регулятор содержит детектор изменения скорости по ее производной. Сглаживание пульсаций момента достигается за счет использования на выходе регулятора апериодического звена.

Ключевой особенностью работы нечеткого регулятора является адаптивное изменение шага поиска в зависимости от текущего значения мощности относительно экстремального значения. Регулятор выполняет вычисления в три этапа, в пределах которых осуществляется такие преобразования как фазификация, нечеткий вывод и дефазификация [7].

На первом этапе фазификации происходит перевод реальных входных значений регулятора – приращения мощности ΔP_i и приращения скольжения $\Delta \beta_{s,i}$ на предыдущем шаге – во входные лингвистические переменные, являющиеся нечеткими аналогами реальных переменных. Переход происходит путем определения степени принадлежности ξ входной переменной каждой терме соответствующей лингвистической переменной (рис.7). Переменная ΔP_i содержит пять термов: ОБ – отрицательное большое, ОМ – отрицательное малое, Н – ноль, ПМ – положительное малое и ПБ – положительное большое. Переменная $\Delta \beta_i$ содержит две термы: О – отрицательное и П – положительное.

Затем происходит вычисление нечеткого значения выходной лингвистической переменной $\Delta \beta_{i+1}$ на основе «если..., то...» по базе нечетких правил:

Термы ΔP_i	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
Термы $\Delta \beta_i$	ПБ	ПМ	Н	ОБ	ОБ

Степень принадлежности ξ каждой термы определяется по правилу минимума, например, $\xi_{\text{ПБ}}^{\Delta \beta_{i+1}} = \min\{\xi_{\text{ПБ}}^{\Delta P_i}, \xi_{\text{ПБ}}^{\Delta \beta_i}\}$. На последнем этапе происходит расчет выходного значения $\Delta \beta_{s,i+1}$ методом центра тяжести (рис.8).

Результаты моделирования работы привода с энергосберегающим алгоритмом управления. Работа энергосберегающего регулятора комбинированного действия проводилась по частям в соответствии с алгоритмами, основанными на модели потерь и уточнении координат минимума потерь в реальном масштабе времени с помощью фазирегулятора. Рассматривался привод с вентиляторной нагрузкой, для которой момент пропорционален квадрату частоты вращения вала приводного механизма $\bar{M} = \bar{\omega}_r^2$.

На рис.9 показаны переходные процессы, полученные при номинальных параметрах двигателя. Переходные процессы вызваны пошаговыми изменениями задания по скорости от $\omega_{ref1} = \omega_{r0}$ до $\omega_{ref2} = 0,25 \omega_{r0}$, где ω_{r0} – номинальная скорость. В качестве реакций рассматривается изменение во времени КПД и мощности потерь при использовании энергосберегающего алгоритма по критерию $\chi \rightarrow \max$ (кривая 1) и u/f^2 – регулирования (кривая 2).

Из диаграмм на рис.9 видно, что применение энергосберегающего алгоритма позволяет независимо от скорости вращения ротора поддерживать максимальное значение КПД $\eta(\omega_r) = \eta_{\max}$. По сравнению с традиционным законом скалярного управления оптимальный закон обеспечивает повышение КПД на 3-11 %, что соответствует расчетным данным на рис.4, б. Повышение КПД связано со снижением мощности потерь, которое при изменении полезной мощности по кубическому закону $\bar{P} = \bar{\omega}^3$ составляет от 500 до 2300 Вт в зависимости от скорости вращения ротора.

Далее производилось моделирование процесса поиска. Исходный режим соответствовал рабочей точке $\bar{\omega}_r = 0,8$, $\bar{M} = 0,64$. Для этого режима в модели двигателя было искусственно

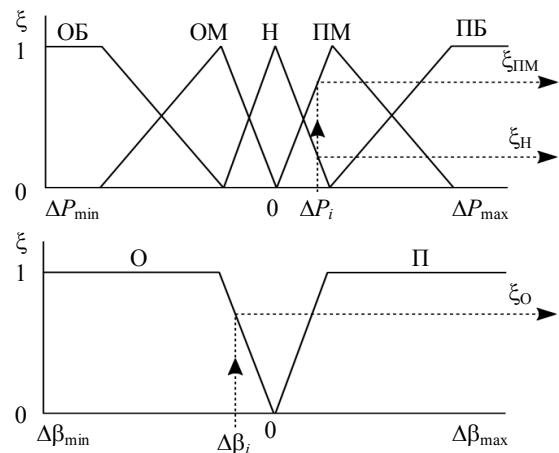


Рис.7. Процесс фазификации в нечетком регуляторе

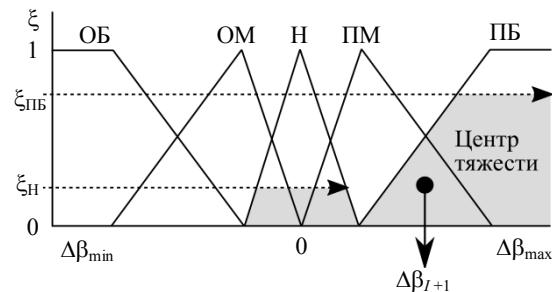


Рис.8. Процесс дефазификации

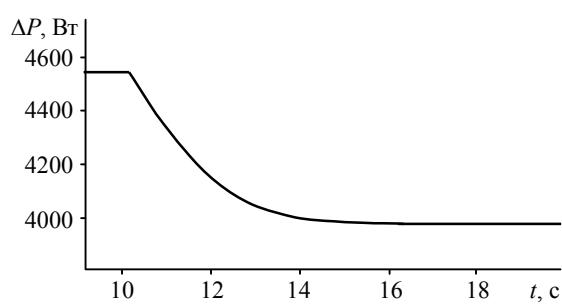
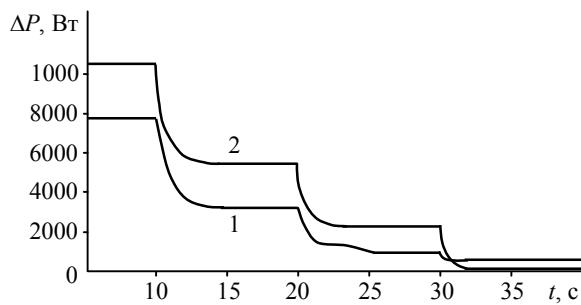
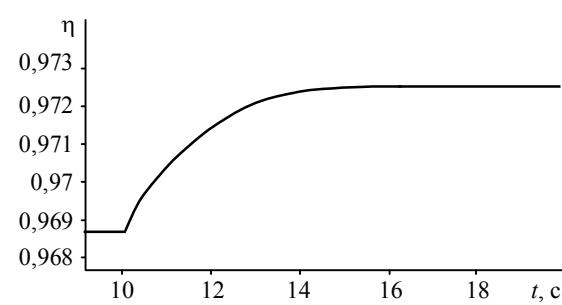
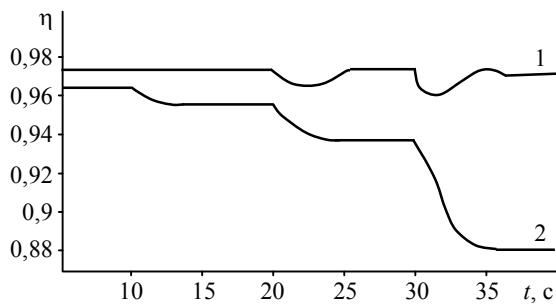
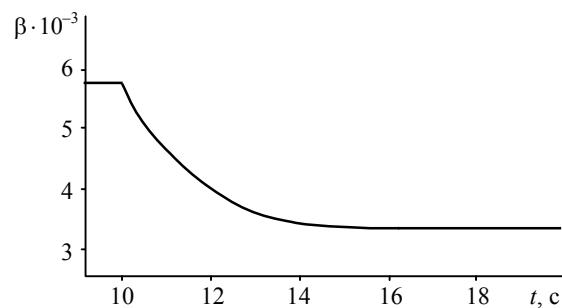
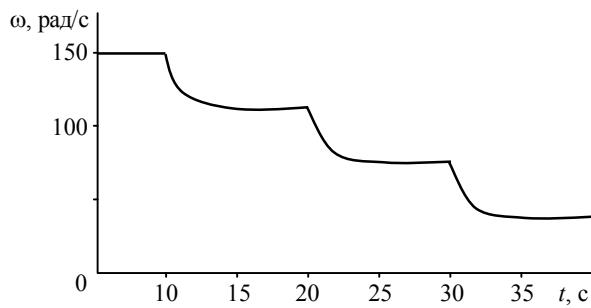


Рис.9. Переходные процессы в системе оптимального управления (1) и u/f^2 -управления (2)

Рис.10. Уточнение экстремума при отклонении параметров двигателя от номинальных значений

задано отклонение сопротивлений обмоток статора и ротора на 20 %. В связи с этим значение скольжения, полученное энергосберегающим блоком, не является оптимальным. Уточнение оптимального значения начинается в момент времени $t_1 = 6$ с (рис.10). В процессе поиска нечеткий регулятор корректирует оптимальное значение абсолютного скольжения. Поиск завершается примерно за 5 с. За счет уточнения оптимального значения абсолютного скольжения удалось добиться снижения потерь на 550 Вт.

Заключение. В работе рассмотрено построение энергосберегающих алгоритмов частотного управления асинхронным электроприводом. Основой для таких алгоритмов являются немонотонные зависимости суммарных потерь мощности в приводе, тока статора, КПД и коэффициента мощности от абсолютного скольжения в каждой рабочей точке привода. На основании полученных зависимостей экстремальных значений абсолютного скольжения от скорости вращения ротора дана сравнительная оценка методов управления по критерию эффективности. Дано объяснение преимущества закона управления по максимуму КПД на уровне до 10 % путем анализа зависимостей потерь в стали и меди от скорости вращения ротора.

Предложена структура энергосберегающего алгоритма для системы скалярного частотного управления приводом на базе модели потерь и итерационного поиска экстремума в реальном масштабе времени. Показано, что применение оптимального алгоритма позволяет повысить КПД на 10-12 % по сравнению с u/f -регулированием. Работа регулятора на базе

нечеткой логики апробировалось при поиске экстремума, координаты которого изменились в результате увеличения сопротивлений обмоток. Время сходимости алгоритма поиска составило 5 с, что существенно меньше, чем при использовании других методов, например градиентного [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Браславский И.Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков. М.: ACADEMA, 2004. 202 с.
2. *Булгаков А.А.* Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
3. *Виноградов А.Б.* Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А.Б.Виноградов, Д.Б.Изосимов, С.Н.Флоренцев // Электротехника. 2010. № 12. С.12-19.
4. *Колпаков А.* Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1. С.46-48.
5. *Лазарев Г.* Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2005. № 2(32). С.15-20.
6. *Поляков В.Н.* Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н.Поляков, Р.Т.Шрейнер. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2006. 420 с.
7. *Чернецкая И.В.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования / И.В.Чернецкая, В.О.Чернецкий // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 14. С.156-159.
8. *Шонин О.Б.* Минимизация потерь в частотно-регулируемом приводе вентиляторов главного проветривания шахт / О.Б.Шонин, В.С.Пронько // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2(195). С.70-77.
9. *Шонин О.Б.* Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом / О.Б.Шонин, В.С.Пронько // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2(195). С.49-57.
10. *Шрейнер Т.Р.* Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Т.Р.Шрейнер, Ю.А.Дмитренко. Кишинев: Штиинца, 1982. 224 с.
11. *Branko Blanusa.* New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. 2010. P.341-358.
12. *David G Dorrell.* A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards // Journal of Power Electronics. Vol.14. N 5. 2014. P.842-851.

REFERENCES

1. *Braslavskij I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N.* E'nergosberegayushhij asinxronnyj e'lektroprivod (Energy saving asynchronous electric drive). Moscow: ACADEMA, 2004, p.202.
2. *Bulgakov A.A.* Chastotnoe upravlenie asinxronny'mi dvigateleyami (Frequency control of induction motors). Moscow: E'nergoizdat, 1982, p.216.
3. *Vinogradov A.B., Izosimov D.B., Florencev S.N.* Optimizaciya KPD sistemy' vektornogo upravleniya asinxronny'm tyagovy'm e'lektroprivodom s identifikatorom parametrov (Optimizing the efficiency of vector control system of traction induction motor drive with the parameter identifier). E'lektrotexnika. 2010. N 12, p.12-19.
4. *Kolpakov A.* Perspektiv' razvitiya e'lektroprivoda (Electric drive development prospects). Silovaya e'lektronika. 2004. N 1, p.46-48.
5. *Lazarev G.* Vy'sokovol'tny'e preobrazovateli dlya chastotno-reguliruemogo e'lektroprivoda. Postroenie razlichny'x system (Medium voltage converters for variable-speed drive. Construction of various systems). Novosti e'lektrotexniki. 2005, N 2(32), p.15-20.
6. *Polyakov V.N., Shrejner R.T.* E'kstremal'noe upravlenie e'lektricheskimi dvigateleyami (Extremal control of electric motors) Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2006, p.420.
7. *Cherneckaya I.V., Cherneckij V.O.* Nechetkie regulatory' v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya (Fuzzy controllers in automatic control systems). Vestnik YuUrGU. 2006. N 14, p.156-159.
8. *Shonin O.B., Pronko V.S.* Minimizaciya poter' v chastotno-reguliruemom privode ventilatorov glavnogo provetrvaniya shaxt (Minimization of energy losses in variable frequency electric drive of main mine fans). Nauchno-texnicheskie vedomosti SPbGPU. 2014. N 2(195), p.70-77.
9. *Shonin O.B., Pronko V.S.* Povy'shenie e'nergeticheskoy effektivnosti glavn'yx ventilatorny'x ustanovok shaxt na osnovе mnogocelevoj sistemy' upravleniya chastotno-reguliruemym privodom (Energy efficiency improvement of mine main fan installations by means of the multipurpose control system for VFD). Nauchno-texnicheskie vedomosti SPbGPU. 2014. N 2(195), p.49-57.
10. *Shrejner T.R., Dmitrenko Yu.A.* Optimal'noe chastotnoe upravlenie asinxronny'mi e'lektroprivodami (The optimum frequency control of asynchronous electric drives) Kishinev: Shtiinca, 1982, p.224.
11. *Branko Blanusa.* New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives. New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. 2010, p.341-358.
12. *David G. Dorrell.* A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards. Journal of Power Electronics. 2014. Vol.14. N 5, p.842-851.

ENERGY- EFFICIENT CONTROL OF ASYNCHRONOUS MOTOR DRIVE WITH CURRENT REFINEMENT OF THE LOSS MINIMUM ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

O.B.SHONIN, Dr. in Engeeniering Sciences, Professor, *ninosh_eltech@mail.ru*

V.S.PRONKO, Postgraduate student, *pronko.vr@gmail.com*

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Currently, asynchronous electric drive on the basis of semiconductor frequency converters is widespread because of the relative simplicity and reliability of the design, the use of digital control systems, providing the accuracy and flexibility of process control, which allows for a significant increase in product quality, reduction in energy consumption and improvement of the enterprise profitability. In spite of these advantages, the problem of ensuring high energy efficiency of the drive in wide range of its operational modes is still not solved in full scale.

The paper is devoted to the reduction of losses in the asynchronous drive on the basis of energy-saving control algorithms that aim to ensure the desired mode of the driven mechanism while minimizing losses in copper and steel of the motor. On the basis of the motor model, taking into account magnetic losses, dependences of losses in the copper and steel, as well as the total loss from the absolute slip have been derived for different operating points of the drive. The optimal values of the absolute slip for different speeds of the rotor have been obtained for use in the controllers ensuring operation of the drive at maximum efficiency, highest power factor and minimum of the stator current. For minimizing the losses in the drive when changing the motor parameters it has been offered the combined method based on the method of loss model and iterative method of searching the minimum of power consumption. The effectiveness of the proposed control system using fuzzy logic is confirmed by comparing the graphs of losses and efficiency, obtained at using a traditional control law and the optimal control law.

Key words: variable-frequency drive, energy saving, optimization, fuzzy logic, computer simulation.