

лирования производительности изменением положения подсилосной задвижки имеет запаздывание, которое может на порядок превосходить инерционность норрии по этому каналу.

Предлагаемая концепция автоматического управления производительностью ПТЛ дает возможность обеспечить ее работу в окрестности максимальной производительности, максимально быстро предотвращая развитие завала норрии зерном, что гарантирует предотвращение аварийного отключения линии.

Литература

1. Новицкий О.А., Сергунов В.С. Автоматизация производственных процессов на элеваторах и зерноперерабатывающих предприятиях // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1981. – 320 с.
2. Хобин В.А., Андриященко Г.В. Математическая имитационная модель норрии, как объекта управления с изменяющимися свойствами // XVI Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика-2009». Тези доповідей. – Чернівці: Книги – XXI, 2009. – С. 229 – 230.
3. Патент на корисну модель № 34335 (UA), B65G 17/00: Спосіб автоматичного керування завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Хобін В.А., Андриященко Г.В. – Заявлено 25.02.2008; Опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15. – 4 с.
4. Конвейерный дозатор: А.с. № 1506288 (СССР), G01 G 11/08 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено 20.10.87; Опубл. 07.09.89, Бюл. № 33. – 5 с.
5. Патент на корисну модель № 57903 (UA), B65G 17/00: Спосіб автоматичного керування завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Аннаев Б.С., Герасимов В.В., Хобин В.А., Кір'язов І.М., Шестопапов С.В. та ін. – Заявлено 29.12.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5. – 22 с.

УДК 004.942:621.313.3.018.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Хобин В.А., д-р техн. наук, проф.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Кирьязов И.Н.

Компания С-инжиниринг, г. Одесса

Рассматривается разработка формальных математических моделей рабочих характеристик приводных асинхронных электродвигателей, ориентированных на решение задач эффективного управления загрузкой оборудования. Параметрическая идентификация таких моделей для конкретных электродвигателей требует задания только простейших паспортных характеристик этих двигателей.

We consider the development of formal mathematical models of working characteristics of induction motors, focused to meet the challenges effective management loading equipment. Parametric identification of such models for specific motor tasks requires only the simplest of their passport characteristics.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, рабочие характеристики, модели, идентификация, управление.

Постановка задачи. Асинхронные электрические машины являются основными приводными электродвигателями (ПЭД) технологического и транспортно-технологического оборудования предприятий. Технологические процессы (ТП), которые реализуются этим оборудованием, как правило, являются объектами управления (ОУ), в общем случае либо «ручного» либо автоматического. Повышение эффективности управления, требует, во-первых, повышения достоверности информации о степени загрузки этого оборудования, во-вторых, разработки и оптимизации алгоритмов управления этими ТП, основа которых – применение математических моделей (ММ) и целенаправленные компьютерные имитационные эксперименты с этими моделями. Поэтому для решения обеих задач нужны ММ асинхронных ПЭД, которые адекватно описывали бы рабочие характеристики ПЭД как функцию нагрузки, приложенной к его валу со стороны оборудования.

На рис. 1 приведены типичные рабочие характеристики асинхронного ПЭД, взятые из [1].

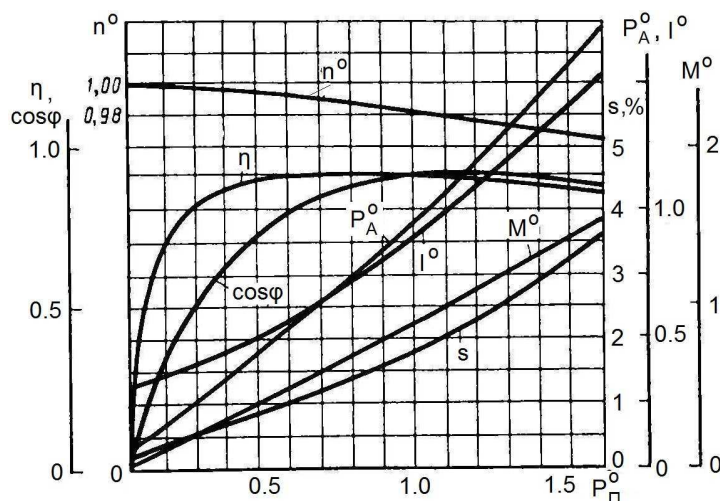


Рис. 1 – Типичные рабочие характеристики асинхронного ПЭД [1]

На рис.1 приняты следующие обозначения переменных: P_{II} , M – полезная механическая мощность и момент вращения на валу ПЭД; P , P_A и I – полная, активная электрические мощности и полный ток, потребляемые ПЭД из сети питания; n , s – круговая частота вращения и скольжение ротора ПЭД; $\cos\varphi$, η – коэффициенты мощности и полезного действия ПЭД. Символ « $^{\circ}$ » в изображении переменных означает, что они рассматриваются как относительные значения, которые получены нормированием переменных относительно своих номинальных значений, например: $P^{\circ} = P / P^H$, где P^H – номинальное значение P .

Рассмотренные переменные взаимосвязаны между собой следующими важными соотношениями. Электрическая мощность, потребляемая ПЭД из сети для совершения полезной работы:

$$P = kUI, \quad (1)$$

где k – константа, зависящая от схемы включения ПЭД;

U – линейное напряжение питающей сети.

Полезная механическая мощность, создаваемая ПЭД, за счет которой оборудованием выполняется работа:

$$P_{II} = M\omega = P\eta\cos\varphi = P_A\eta = kU_{\Delta}I\eta\cos\varphi, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi n / 60$ угловая частота вращения ротора ПЭД.

Отметим, что для достаточно мощных ПЭД величина скольжения s , и, следовательно, снижение скорости ω во всем диапазоне нагрузок, не превышает (1...2) % от ω^H , а в рабочем диапазоне – значительно меньше. Такие изменения, как правило, не влияют сколько-нибудь заметным образом на работу оборудования и, поэтому, изменением ω для решения подобных задач можно пренебречь, и разрабатывать модель по каналу « $P_{II} - \omega$ » нет необходимости. Для этого случая можно принять, что $\omega = \omega^H = \text{const}$, $\omega^{\circ} = 1$. Если, одновременно, напряжение U_{Δ} в сети питания ПЭД изменяется незначительно, и его значение можно принять номинальным, т.е. $U_{\Delta} = U_{\Delta}^f$, то (2) преобразуется в (3):

$$P_{II}^{\circ} = M^{\circ}\omega^{\circ} = M^{\circ} = P^{\circ}\eta^{\circ}\cos\varphi^{\circ} = I^{\circ}\eta^{\circ}\cos\varphi^{\circ}, \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) целесообразно использовать при моделировании технологического и транспортно-технологического оборудования как объектов автоматического управления, в частности для решения задач управления загрузкой этого оборудования и/или минимизации удельных затрат потребляемой энергии. Это станет возможным только при получении для конкретных ПЭД аналитических зависимостей (ММ), описывающих функции $\cos\varphi(P_I^{\circ})$ и $\eta(P_I^{\circ})$, или, что тоже самое, – $\cos\varphi(M^{\circ})$ и $\eta(M^{\circ})$. Пример графиков этих функций приведен на рис. 1. Отметим, что они являются существенно нелинейными и имеющими экстремумы.

Структурная идентификация моделей. Основу структурной идентификации могут составить два альтернативных подхода.

Первый связан с использованием моделей, реализуемых на основе различных вариантов схем замещения асинхронных электродвигателей [1, 2]. Так, например, при упрощенном математическом описании электрических машин переменного тока широко применяют ММ в виде обобщенной двухполюсной двухфазной электрической машины [2, 3]. Трехфазный асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с помощью трехфазно-двухфазного преобразования можно привести к обобщенной электрической

машине. В рамках общепринятых допущений (о симметричности обмоток статора, гладкости поверхностей статора и ротора, линейности кривой намагничивания, отсутствии потерь на гистерезис и вихревые токи и синусоидальности напряжений и токов) система уравнений, описывающих движение асинхронного электродвигателя при частотном управлении [2], выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1X}}{dt} &= U_{1X} - \frac{R_1 L'_2}{\Delta} \psi_{1X} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2X} + \omega_0 \psi_{1Y}, \\ \frac{d\psi_{1Y}}{dt} &= U_{1Y} - \frac{R_1 L'_2}{\Delta} \psi_{1Y} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2Y} - \omega_0 \psi_{1X}, \\ \frac{d\psi_{2X}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{\Delta} \psi_{2X} + \frac{R'_2 L_0}{\Delta} \psi_{1X} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2Y}, \\ \frac{d\psi_{2Y}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{\Delta} \psi_{2Y} + \frac{R'_2 L_0}{\Delta} \psi_{1Y} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2X}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m Z_{II} L_0}{2J\Delta} (\psi_{1Y} \psi_{2X} - \psi_{1X} \psi_{2Y}) - \frac{1}{J} M_c \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где ψ_{1X} и ψ_{1Y} – проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат x – y , вращающейся со скоростью магнитного поля; U_{1X} и U_{1Y} – проекции изображающего вектора напряжения в той же системе координат; ψ_{2X} и ψ_{2Y} – соответствующие проекции вектора потокосцепления ротора; L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление цепи статора; L'_2 и R'_2 – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора; L_0 – взаимная индуктивность; ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля; ω – угловая частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции ротора; m – число фаз электродвигателя; Z_{II} – число пар полюсов; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; $\Delta = L_1 L'_2 - L_1 L_0^2$.

Очевидно, что выбор такого подхода сопряжен с большими сложностями применения модели. Они возникнут сначала на этапе ее параметрической идентификации для конкретного ПЭД, поскольку необходимо знание большого количества специальных параметров, которые не содержатся в его паспортных характеристиках, а затем на этапе решения системы нелинейных уравнений.

Второй подход, который и реализован авторами данной статьи, связан с формальным математическим описанием зависимостей $\cos\varphi(P_i^O)$ и $\eta(P_i^O)$, для проведения параметрической идентификации которых необходимо знание только паспортных характеристик ПЭД. При этом структурная идентификация моделей сводилась к выбору их математической формы (структуры) и проводилась эвристическими методами в ходе интерактивных компьютерных экспериментов. К структуре этих зависимостей предъявлялись специальные требования. Основные из них – физическая непротиворечивость (наличие только одного экстремума, отсутствие точек перегиба на восходящих и нисходящих ветвях функций), минимальное количество параметров, подлежащих идентификации, совпадение модели с рабочими характеристиками в точках, соответствующих паспортным режимам.

Выбранная структура ММ имеет вид:

$$\eta_i(P_i^f) = 1 - aP_i^f - \exp\left\{-\sqrt{P_i^f}/b\right\}, \quad (5)$$

$$\cos\varphi_j(P_j^f) = \cos\varphi^x + 1 + cP_j^f - \exp\left\{-\sqrt{P_j^f}/d\right\}, \quad (6)$$

где a, b, c, d – неизвестные, постоянные для конкретного ПЭД, параметры, значения которых необходимо найти в ходе процедуры параметрической идентификации моделей;

индекс «М» в обозначениях переменных означает «модель».

Параметрическая идентификация моделей. В качестве исходных данных для идентификации используем паспортные данные ПЭД: а) максимальное значение коэффициента полезного действия η^{\max} ; б) относительное значение полезной мощности, при котором достигается η^{\max} , т.е. $P_f^{O*} = \operatorname{argmax}\eta(P_f^O)$; в) максимальное значение коэффициента мощности $\cos\varphi^{\max}$; г) значение коэффициента мощности на холостом ходе ПЭД $\cos\varphi^x$.

Отметим здесь следующее. Максимум $\eta(P_f^O)$ достигается при нагрузках P_f^O , меньших номинальной. Это закладывается на этапе проектирования ПЭД. Так, по [1], $\eta^{\max} = \eta(P_f^f = 0,6...0,85)$, по [4] – $\eta^{\max} = \eta(P_f^f = 0,85...0,9)$. Это различие можно отнести за счет изменения тенденции в проектировании асинх-

ронных двигателей (АД) – современные двигатели имеют максимальное значение η в режимах, более близких к номинальным. Максимум $\cos\varphi$ достигается при номинальной нагрузке на валу АД, т.е. $\cos\varphi^{\max} = \cos\varphi(P_i^O = 1)$. Абсолютные значения η^{\max} и $\cos\varphi^{\max}$ зависят от мощности АД и конструктивных особенностей, в частности его серии. Примеры зависимостей η^{\max} и $\cos\varphi^{\max}$ от мощности P_{II} и серии двигателей приведены по [1], на рис. 2. Конкретные значения этих параметров определены в паспортных характеристиках каждого типа двигателя, см., например, [4]. В режиме холостого хода $\cos\varphi^x = 0,08 \dots 0,15$ [1].

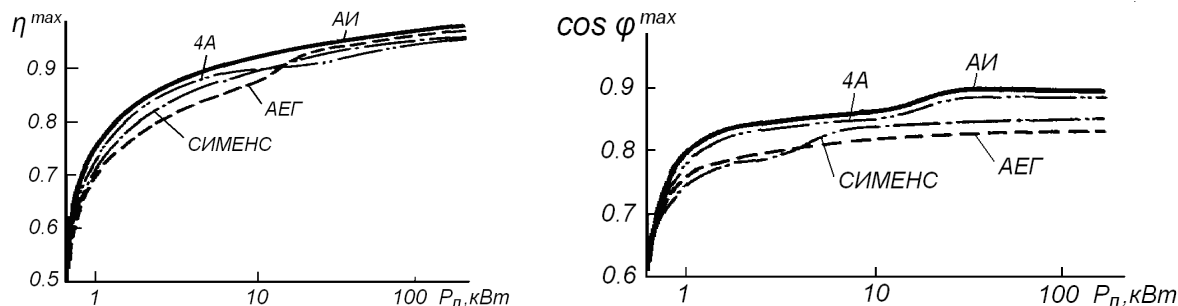


Рис. 2 – Примеры паспортных значений η^{\max} и $\cos\varphi^{\max}$ для асинхронных электродвигателей различных типов и производителей в функции их номинальной мощности [1]

Параметрическая идентификация модели $\eta_M(P_i^O)$. Для определения двух неизвестных параметров «a» и «b» в (5) составим систему двух уравнений с двумя неизвестными. Для первого уравнения используем выражение модели (5), записав его при значении аргумента $P_i^O = P_i^{O*}$:

$$\eta_i(P_i^{O*}) = 1 - aP_i^{O*} - \exp\left\{-\sqrt{P_i^{O*}}/b\right\} = \eta^{\max}. \quad (7)$$

Для второго уравнения получим выражение для первой производной η_M по P_i^O :

$$\frac{d\eta_i}{dP_i^O} = -a + \frac{1}{2b\sqrt{P_i^O}} \exp\left\{-\sqrt{P_i^O}/b\right\}. \quad (8)$$

Значение этой производной при значении аргумента P_i^O , соответствующего экстремуму функции, т.е. $P_i^O = P_i^{O*}$, равно нулю:

$$d\eta_i / dP_i^O \Big|_{P_i^O = P_i^{O*}} = 0. \quad (9)$$

Кроме того, потребуем выполнения следующего условия:

$$\eta_M(P_i^{O*}) = \eta^{\max}. \quad (10)$$

В итоге получим систему двух трансцендентных уравнений с двумя неизвестными a и b:

$$\begin{cases} \eta^{\max} = 1 - aP_i^{O*} - \exp\left\{-\sqrt{P_i^{O*}}/b\right\}, \\ 0 = -a + \frac{\sqrt{P_i^{O*}}}{2b} \exp\left\{-\sqrt{P_i^{O*}}/b\right\} \end{cases}. \quad (11)$$

После ее достаточно очевидных преобразований получим:

$$\begin{cases} b = \frac{1 - \eta^{\max} - aP_i^{O*}}{a}, \\ 1 - \eta^{\max} = \left(1 + \frac{\sqrt{P_i^{O*}}}{2b}\right) \exp\left\{-\sqrt{P_i^{O*}}/b\right\} \end{cases} \quad (12)$$

Второе уравнение системы остается трансцендентным, и значение «b» из этого уравнения в явном виде найдено быть не может, т.е. аналитического решения система не имеет. На рис. 3 приведены графики значений коэффициентов «a» и «b» для диапазонов изменения η^{\max} и P_i^{O*} , наиболее часто встречающихся в промышленности, найденных решением (12) численными методами.

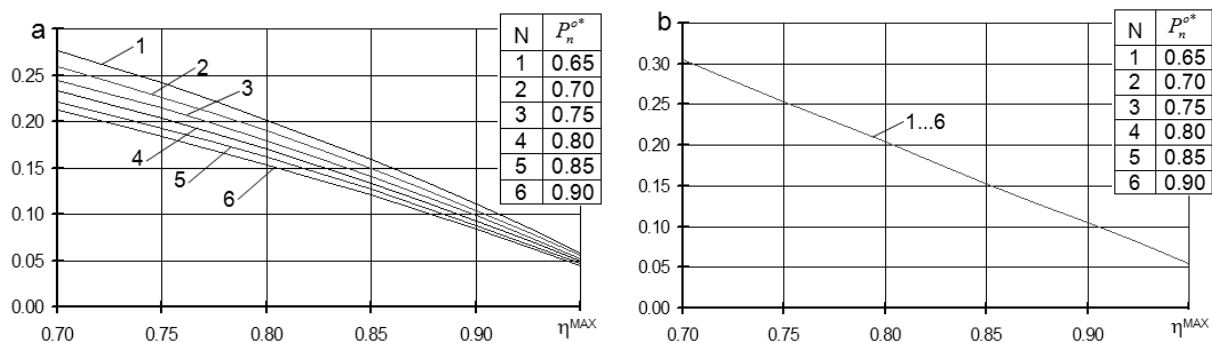


Рис. 3 – Графики значений параметров «a» и «b» для модели (5)

Параметрическая идентификация модели $\cos\varphi_M(P_f^O)$. Для определения двух неизвестных параметров «c» и «d» в (6), также, как и в предыдущем случае, составим систему двух уравнений с двумя неизвестными. Выполнив процедуры преобразований выражения (6), как это было ранее сделано для (5), и, учитывая, что в этом случае $P_f^{O*} = 1$, получим систему трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} d = (1 - \cos\varphi^{\max} + \cos\varphi^x - c)/c, \\ 1 - \cos\varphi^{\max} + \cos\varphi^x = (1 + 1/d)\exp\{-1/d\} \end{cases} \quad (13)$$

Результаты ее численного решения представлены на рис. 4 в форме графиков изменения значений коэффициентов «c» и «d».

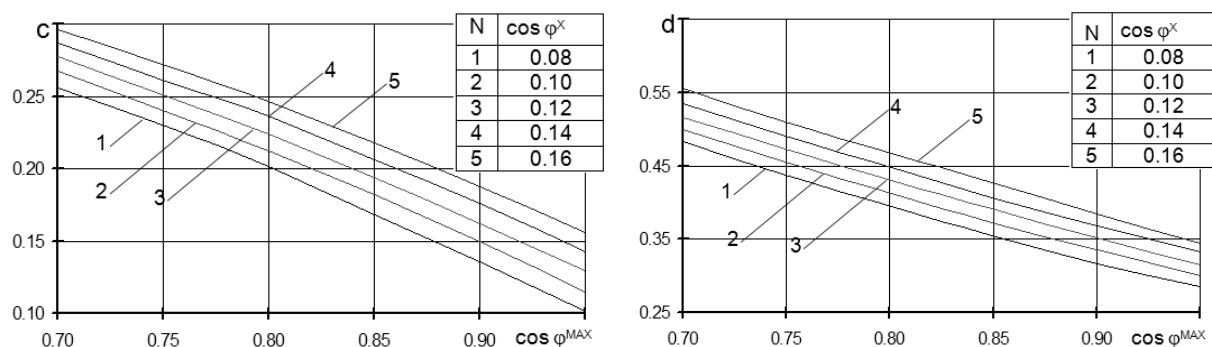


Рис. 4 – Графики для определения параметров «c» и «d» модели (6)

Учет в моделях отклонений напряжения питания ПЭД от номинального значения. Отметим, что величина этих отклонений ограничена и, как правило, не превышает $\pm 20\%$ от номинальных значений напряжения питания, что упрощает задачу. Как уже отмечалось, АД проектируют так, что в окрестности его номинального режима значения η и $\cos\varphi$ близки к максимуму. При этом максимум достигается в том случае, когда постоянные потери (механические и в стали) равны переменным потерям в обмотках АД. Поэтому влияние изменения напряжения является неоднозначным и зависит от нагрузки на валу двигателя. При увеличении напряжения происходит возрастание магнитного потока и, следовательно, увеличение тока холостого хода АД и магнитных потерь в стали. Вследствие этого η и $\cos\varphi$ двигателя уменьшаются. Уменьшение напряжения опасно тем, что, пропорционально квадрату напряжения, уменьшается максимальный вращающий момент двигателя, и при большом моменте нагрузки может произойти нарушение устойчивости работы двигателя. Кроме того, при снижении напряжения снижается η . Опытные данные показывают, что повышение напряжения на 1% увеличивает потребление реактивной мощности на 3...4% [5], т.е. эксплуатация двигателей на повышенном напряжении экономически очень невыгодна (для потребителя энергии). Характер изменений η и $\cos\varphi$ от напряжения сети U , взятый из [1], представлен на рис. 5. Отметим, что величина отклонений U от U^H ограничена и, как правило, не превышает $\pm 20\%$ относительно U^H . Это упрощает задачу адекватного отражения изменения U в моделях рабочих характеристик АД, основу для которого и составила информация, отраженная в графиках рис. 5.

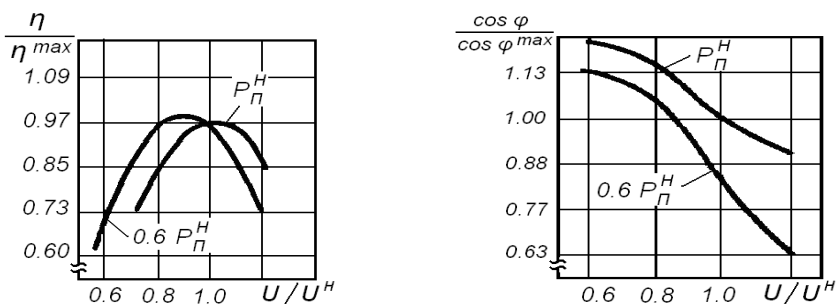


Рис. 5 – Характер изменений η и cosφ от напряжения сети [1]

Этот учет выполнен введением в модель двух множителей k_η и $k_{\cos\phi}$, изменяющих значения η_M и $\cos\phi_M$, соответствующих номинальному напряжению питания:

$$\eta_i(P_i^j, U) = \eta_i(P_i^j, U^j)k_\eta; \quad \cos\phi_i(P_i^j, U) = \cos\phi_i(P_i^j, U^j)k_{\cos\phi}, \quad (14)$$

где $k_\eta = -3,75U^{O2} + 7,5U^O - 2,75$, $k_{\cos\phi} = -0,75U^O + 1,75$.

Реализация моделей рабочих характеристик в форме имитационной модели ПЭД. Для имитационного моделирования рабочих характеристик ПЭД в среде Simulink реализована их имитационная модель. Структурная схема модели с параметрами, соответствующими асинхронному электродвигателю 4A280S4У3 мощностью 110 кВт, по паспортным данным которого $\eta^{\max} = 92,5 \%$; $\cos\phi^{\max} = 0,9$; $P_i^{O*} = 0,85$; $\cos\phi^x = 0,08$ [4], приведена на рис. 6. На рис. 7 приведена иллюстрация работы этой имитационной модели – примеры графиков моделей рабочих характеристик электродвигателя.

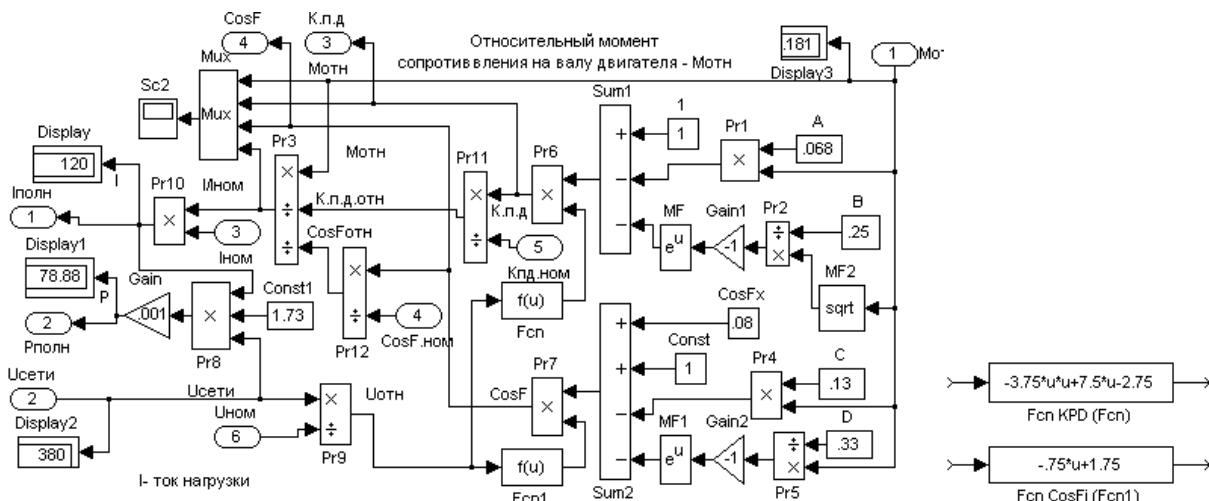


Рис. 6 – Структурная схема имитационного моделирования ПЭД как составляющей ОУ при воспроизведении его рабочих характеристик

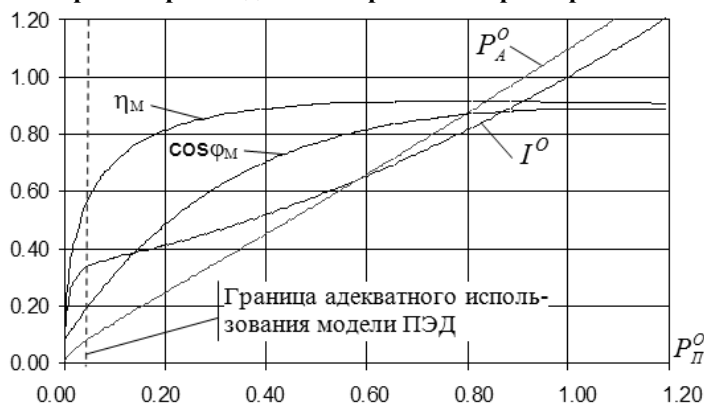


Рис. 7 – Графики моделей $\cos\phi_M(P_i^{O*})$ и $\eta_M(P_i^{O*})$ и рассчитанные на их основе графики рабочих характеристик тока нагрузки $I_i^*(P_i^{O*})$ и активной мощности $P_{Ai}^*(P_i^{O*})$ ПЭД

Заключение. Разработанные ММ коэффициентов полезного действия и мощности асинхронных электродвигателей обеспечивают воспроизведение топологии соответствующих рабочих характеристик и совпадение их значений в точках холостого хода электродвигателя и в точках их экстремумов. Такой подход обеспечивает компромисс между уровнем адекватности этих моделей и простотой их получения и применения. Важно, что две эти модели позволяют получить модели любых рабочих характеристик, описывающих энергопотребление электродвигателей в зависимости от полезной мощности или момента на их валу. На основе этих моделей реализована имитационная модель ПЭД. Она легко интегрируется в имитационные модели оборудования, позволяя адекватно описывать оборудование, приводимое в работу ПЭД, как ОУ. Это дает возможность на основе таких моделей разрабатывать САУ нагрузкой оборудования, решая при этом, в частности, задачи по минимизации энергопотребления ПЭД. Кроме того, такая модель ПЭД может позволить решить важную для управления информационную задачу – для широких диапазонов изменения нагрузки на его валу, основываясь на результатах измерения простейших электрических параметров ПЭД, прежде всего величины потребляемого им тока, восстановить, пусть с определенной степенью приближения, фактическое значение нагрузки ПЭД.

Литература

1. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
2. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 302 с.
3. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 292 с.
4. Справочник по электрическим машинам / Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – Т.1 – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
5. Иванов А.А. Электрооборудование пищевых предприятий. – К.: Техника, 1979. – 455 с.

УДК 681.5.015.3:[66.05:577.11-035]

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ БИОПОЛИМЕРОВ

Егоров В.Б., аспирант,
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Рассматривается решение комплекса задач, связанных с разработкой системы автоматического управления процессом экструдирования биополимеров, которые возникают на этапе обеспечения ее работоспособности и эффективности в условиях неопределенностей свойств объекта и возмущений.

The decision of the tasks complex which is connected with the development of the automatic control system of the biopolymers extrusion process is considered. The tasks appear when the system serviceability and efficiency in the conditions of the object properties uncertainty and disturbance are ensured.

Ключевые слова: экструдирование биополимеров, система управления, синтез, анализ, робастность.

1. Постановка завдання. В рамках разработки концепции построения систем автоматического управления (САУ) процессом экструдирования биополимеров (ЭБП) [1 – 2] была обоснована перспективная функциональная организация САУ и разработаны три, альтернативных варианта структурных схем для ее реализации. Их отличие состояло в режиме использования управляющего воздействия, изменяющего рабочее сечение канала движения материала в экструзионной головке – u_3 . Для реализации, в качестве базового варианта САУ процессом ЭБП, выбран вариант, структурная схема которого представлена на рис. 1.