

в системе охлаждения МНЛЗ. При скорости разливки $v \approx 0,5$ м/мин. эти величины примерно равны. На современных МНЛЗ применяются скорости разливки 1,2÷1,4 м/мин. Так, при средней скорости 1,2 м/мин. в системе охлаждения отводится около $q_{\text{охл}} \approx 37$ % теплоты жидкой стали, из них на кристаллизатор приходится $q_{\text{кр}} \approx 5$ %, на ролики – $q_{\text{рол}} \approx 11$ %, на ПВС – $q_{\text{ПВС}} \approx 17$ %, на неиспарившуюся воду – $q_{\text{сл}} \approx 4$ %; с физической теплотой сляба, включающей потери тепла рассеянием, отводится $q_{\text{сляб}} \approx 63$ %.

В настоящее время вся теплота жидкой стали теряется: величина $q_{\text{сляб}}$ – при охлаждении разлитых слябов на складе; величина $q_{\text{охл}}$ – в системе охлаждения МНЛЗ. Физическую теплоту слябов $q_{\text{сляб}}$ наиболее целесообразно использовать в нагревательных печах прокатного производства, где можно получить большую экономию природного газа, а часть величины $q_{\text{охл}}$ можно утилизировать в системе теплоснабжения предприятия [3].

УДК 62-83:621.313.3

Выводы.

Разработан метод исследования теплового баланса криволинейной слябовой ролико-форсуночной МНЛЗ с водовоздушным охлаждением. Получены зависимости отдельных статей теплового баланса от скорости разливки.

Литература

1. Емельянов, В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / В. А. Емельянов. – М., 1988.
2. Кибардин, А. Н. Комплексное использование теплоты жидкой стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок / А. Н. Кибардин, С. В. Лукин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы IX Межд. науч.-техн. конф. – Вологда, 2014. – С. 105–107.
3. Лукин, С. В. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия / С. В. Лукин, Д. В. Поселужный, А. Н. Кибардин // Промышленная энергетика. – 2013. – №5. – С. 7–9.

А. А. Пугачев

Брянский государственный технический университет

МИНИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ СО СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, научный проект № 14-08-31274

Синтезирована система управления асинхронным двигателем, обеспечивающая работу электропривода в режиме минимума мощности потерь. Проведено моделирование в среде MatLab с учетом типовых нелинейностей и потерь в стали статора асинхронного двигателя. Результаты моделирования показывают, что применение предлагаемой системы управления приводит к уменьшению потерь до 25 % по сравнению с классическим вариантом системы скалярного управления.

Асинхронный двигатель, система скалярного управления, минимизация мощности потерь, экстремальное управление.

The control system of an induction motor maintaining electric drive operating mode with minimum power losses is synthesized. The MatLab simulation taking typical non-linearities and stator steel power losses of induction motor into account is carried out. The simulation results show that the suggested system leads to the power losses reduction up to 25 % relatively to classical scalar control.

Induction motor, scalar control system, power losses minimization, optimization mode.

Введение.

Постановка задачи. Анализ использования электроприводов, выполненных по схеме «полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель», выявил, что как в традиционных, так и в современных электроприводах существуют пока еще недоиспользованные резервы повышения энергетической эффективности электромеханического преобразования энергии. Это связано с тем, что по ряду практических соображений в них реализуются в большинстве случаев режимы работы двигателей с постоянством магнитного потока, отсутствует учет теплового состояния обмоток двигателей и др. [5]. Наиболее полно возможности повышения эффектив-

ности электромеханического преобразования энергии можно обеспечить путем оптимизации режимов работы двигателей при регулировании потока как в функции скорости, так и электромагнитного момента (при этом следует сохранять электромеханические статические и динамические характеристики электропривода, необходимые для решения основной технологической задачи).

Исторически первый способ, основанный на одновременном изменении амплитуды U_s и частоты ω_0 напряжения статора и получивший название скалярного управления, до сих пор является широко распространенным и находит свое применение в различных отраслях промышленности и транспорта.

Основная часть.

В системах скалярного управления при одновременном регулировании магнитного потока и частоты его вращения относительно ротора возможно выявление рационального (оптимального) режима управления по минимуму тока статора, минимуму электрической мощности и др., которое необходимо для обеспечения ограничения нагрева двигателя и расширения области допустимых по нагреву моментов нагрузки.

В теории электропривода показано, что одну и ту же механическую мощность, развиваемую асинхронным двигателем, можно реализовать неограниченным количеством соотношений U_s / ω_0 .

За последние полтора-два десятка лет вышло достаточно большое количество разнообразных научных работ, посвященных проблеме минимизации мощности потерь энергии в электроприводе с асинхронным двигателем [2]–[5], [8], [9] и др. Несмотря на то, что в ряде из них получены приемлемые для практической реализации результаты, все еще нет единого общепризнанного подхода для решения проблемы. В этой связи вопрос синтеза скалярных систем управления (как принятых в качестве стандартных систем при производстве современных преобразователей частоты), обеспечивающих минимальное значение того или иного критерия, энергоэффективности является актуальным.

В качестве одного из возможных вариантов реализации системы оптимального управления по критерию энергоэффективности синтезируем так называемую «поисковую» систему. Особенностью такого рода оптимальных систем является то, что она базируется на расчете оптимального значения заданного критерия качества в режиме реального времени. Оптимизируемая переменная дискретно с малым приращением уменьшается или увеличивается до тех пор, пока не наступит оптимальный режим работы. Данный способ является менее быстродействующим, чем аналитический способ расчета, но обладает важным преимуществом: его работа не зависит от изменения параметров объекта управления [7].

Математическая модель асинхронного двигателя. Стандартные математические модели, описывающие динамические процессы в асинхронных машинах, основанные на уравнениях Парка-Горева и записанные в двухфазной системе координат, не учитывают ни явление насыщения главного магнитного потока, ни существующие потери в стали. При разработке современных систем управления, регулирующих выходную координату с поддержанием экстремального значения какого-либо энергетического показателя, необходимо применение моделей, в полной степени учитывающих и отражающих динамику изменения указанных факторов. В противном случае окажутся неработоспособными ни идентификаторы параметров и переменных состояния асинхронной машины [6], [10], ни алгоритмы оптимизации по энергетическим критериям [5].

Одним из вариантов моделирования потерь в стали является включение сопротивления, пропорционального потерям в стали, параллельно взаимоин-

дуктивности. Картина распределения потерь в меди обмоток статора и ротора и стали статора получается наиболее близкой к реальной. Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, соответствующая этому случаю, приведена на рис. 1.

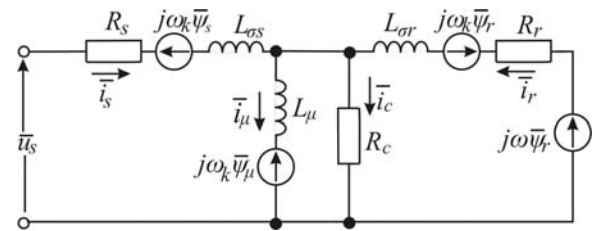


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_s , R_r , R_c – сопротивления обмотки статора, ротора (приведенное к обмотке статора) и сопротивление, эквивалентное потерям в стали, соответственно; $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$, L_{μ} – индуктивности рассеяния обмотки статора, ротора (приведенная к обмотке статора) и взаимоиндуктивность соответственно; ψ_s , ψ_r , ψ_{μ} – потокосцепления обмотки статора, ротора и взаимоиндукции соответственно; ω , ω_k – частота вращения магнитного поля и координатных осей соответственно; u_s , i_s , i_r , i_{μ} , i_c – напряжение и токи в соответствующих ветвях схемы.

Для количественного уточнения процессов возможно включение параллельно резистору R_c индуктивности, отражающей характер изменения вихревых токов. Однако, как показано в работе [10], пренебрежение этой индуктивностью существенных погрешностей в расчет не вносит.

Математическое описание переходных процессов асинхронного двигателя в системе координат, вращающихся с произвольной частотой ω_k , осуществляется на базе уравнений, записанных на основании законов Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + L_{\sigma s} \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \frac{d\bar{\psi}_{\mu}}{dt} + j\omega_k(\bar{\psi}_s + \bar{\psi}_{\mu}), \\ 0 &= R_r \bar{i}_r + L_{\sigma r} \frac{d\bar{i}_r}{dt} + \frac{d\bar{\psi}_{\mu}}{dt} + j(\omega_k - \omega)(\bar{\psi}_r + \bar{\psi}_{\mu}), \\ R_c \bar{i}_c &= j\omega_k \bar{\psi}_{\mu} + \frac{d\bar{\psi}_{\mu}}{dt}, \\ \bar{i}_c + \bar{i}_{\mu} &= \bar{i}_s + \bar{i}_r. \end{aligned}$$

Данные уравнения необходимо дополнить уравнением электромагнитного момента и механического движения:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3p_n}{2L_{\sigma r}} [(L_{\sigma r} i_{ru} + \psi_{\mu u}) \psi_{\mu v} + (L_{\sigma r} i_{rv} + \psi_{\mu v}) \psi_{\mu u}], \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned}$$

Здесь индексами u , v обозначены проекции различных величин на соответствующие оси, J – момент инерции механической части электропривода, M_c – момент сопротивления.

Явление насыщения по главному магнитному пути учитывается следующей характеристикой:

$$L_{\mu^*} = -0,002I_{\mu^*}^6 + 0,037I_{\mu^*}^5 - 0,261I_{\mu^*}^4 + 0,087I_{\mu^*}^3 - 1,278I_{\mu^*}^2 + 0,214I_{\mu^*} + 1,413, \quad (1)$$

индекс «*» указывает на относительное значение параметра.

Нелинейная зависимость потерь в стали от частоты учитывается зависимостью:

$$R_c = \begin{cases} 88,3135 + 5,646f_s + 0,0534f_s^2, & f_s \leq 50 \text{ Гц}, \\ 1261,3 - 37868/f_s, & f_s > 50 \text{ Гц}. \end{cases} \quad (2)$$

Для получения корректной картины электромеханических и энергетических процессов сопротивление обмотки ротора необходимо определять с учетом эффекта вытеснения тока, так как он оказывает влияние при работе на низких частотах. Выражения для активного и индуктивного сопротивлений имеют вид:

$$R_r = K_R R_{rп} + R_{rл}, \quad X_r = K_X X_{rп} + X_{rл}, \quad (3)$$

где $R_{rп}$ и $X_{rп}$ – сопротивления пазовой части обмотки, $R_{rл}$ и $X_{rл}$ – сопротивления участков короткозамыкающих колец между соседними стержнями, K_R и K_X – коэффициенты, учитывающие изменения активного и индуктивного сопротивлений стержня под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = \xi \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi},$$

$$K_X = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{sh2\xi - \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi},$$

где $\xi = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \sqrt{\frac{s \cdot f_1 \cdot b}{10 \cdot \rho \cdot b_n}}$ – приведенная высота

стержня, h – высота стержня, ρ – удельное сопротивление материала стержня, b – ширина стержня, b_n – ширина паза.

Для оценки энергетических процессов используем следующие выражения.

Механическая мощность на валу двигателя:

$$P_{\text{мех}} = M\omega.$$

Активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_{sa} = \frac{3}{2}(i_{su}u_{su} + i_{sv}u_{sv}).$$

Реактивная мощность, потребляемая из сети:

$$P_{sp} = \frac{3}{2}(i_{sv}u_{su} - i_{su}u_{sv}).$$

Баланс мощностей с учетом потерь в меди статора и ротора, а также в стали статора:

$$P_{sa} = P_{\text{мех}} + \Delta P_{sm} + \Delta P_{rm} + \Delta P_c.$$

Общие потери:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{3}{2}(R_s i_{su}^2 + R_s i_{sv}^2) + \frac{3}{2}(R_r i_{ru}^2 + R_r i_{rv}^2) + \frac{3}{2}(R_c i_{cu}^2 + R_c i_{cv}^2), \quad (4)$$

где первое слагаемое – потери в меди статорной обмотки, второе – потери в меди роторной обмотки, третье – потери в стали статора.

Расчет основных энергетических характеристик асинхронного двигателя приведем на примере электродвигателя МЗВР 160 МЛ 4 (производство концерна «АВВ»).

Параметры электродвигателя МЗВР 160 МЛ 4: $u_{\text{ном}} = 380$ В; $I_{\text{ном}} = 27$ А; $P_{\text{ном}} = 11$ кВт; $2p = 4$; $n_{\text{ном}} = 1460$ об/мин; $f_{s, \text{ном}} = 50$ Гц; $X_{\text{ос}} = 0,73$ Ом; $R_s = 0,34$ Ом; $X_{\text{л, ном}} = 31$ Ом; $R_c = 504$ Ом; $X_{\text{сг, пуск}} = 0,73$ Ом; $X_{\text{сг, ном}} = 1,68$ Ом; $R_{r, \text{пуск}} = 0,41$ Ом; $R_{r, \text{ном}} = 0,29$ Ом, где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электродвигателя, $2p$ – число полюсов обмотки статора.

Синтез системы управления. Предлагаемую систему управления асинхронным двигателем (рис. 2) можно разделить на две части: классическая система скалярного управления, замкнутая по частоте вращения вала ротора, и система, выполняющая поиск и обеспечивающая работу электропривода в режиме минимальной мощности потерь.

Силовой канал полупроводникового преобразователя частоты ПЧ представлен инерционным звеном первого порядка с коэффициентом передачи $k_{\text{пр}}$ и постоянной времени $T_{\text{пр}}$.

В качестве регулятора частоты вращения вала ротора применяется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-РС), формирующий напряжение управления U_y по следующему закону:

$$U_y(p) = K_n \Delta \omega(p) + \frac{\Delta \omega(p)}{T_u p},$$

где K_n , T_u – коэффициент передачи и постоянная интегрирования регулятора, p – оператор Лапласа.

При реализации закона управления при постоянстве потокосцепления напряжение статора корректируется путем введения IR -компенсации:

$$U_s = U_{s, \text{ном}} \omega_0 + I_s R_s (1 - \omega_0).$$

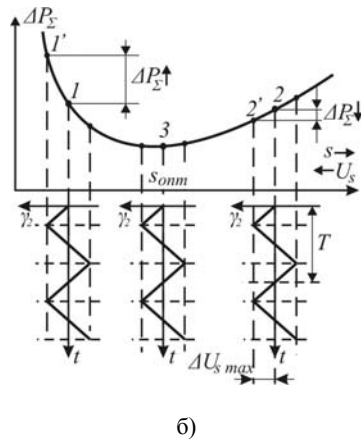
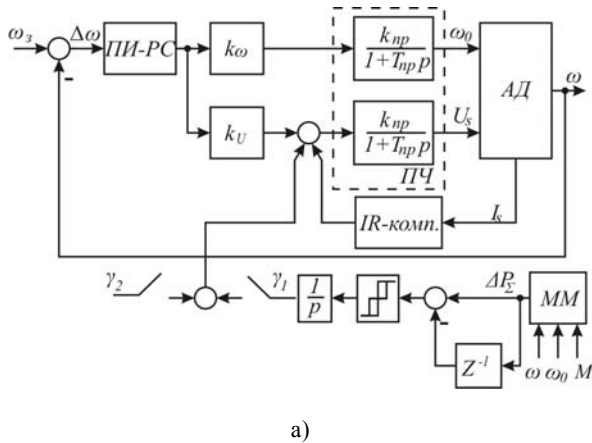


Рис. 2. Электропривод с системой скалярного управления асинхронным двигателем: а – структурная схема электропривода, б – принцип поиска режима минимума мощности потерь

Выражение для мощности потерь энергии (4) можно переписать так:

$$\Delta P_{\Sigma} = 3R_s I_s^2 + 3R_r I_r^2 + 3R_c I_c^2 = 3R_s I_s^2 + 3R_r I_r^2 + 3U_{\mu}^2 / R_c.$$

После математических преобразований получим:

$$\Delta P_{\Sigma} = M \omega_0 s \left(1 + \frac{R_s}{R_r} + \frac{R_r}{s^2 R_c} + \frac{\omega^2 L_{\sigma r}^2}{R_r R_c} \right). \quad (5)$$

Очевидно, что мощность потерь в асинхронном двигателе является функцией скольжения. Из последнего выражения несложно найти оптимальное скольжение, соответствующее минимальному значению мощности потерь:

$$s_{\text{опт}} = \frac{R_r}{\sqrt{R_c (R_s + R_r) + \omega_0^2 L_{\sigma r}^2}}.$$

При реализации скалярного управления по кривой U_s / ω_0 слежение за экстремумом мощности потерь целесообразно осуществлять посредством изме-

нения амплитуды напряжения питания обмотки статора:

$$U_{s\Sigma} = U_s + \gamma_1 + \gamma_2,$$

где γ_1 – управляющий сигнал, γ_2 – тестовый сигнал треугольной формы (рис. 2б).

Критический момент асинхронного двигателя:

$$M_k = \frac{3U_s^2 R_r / s}{\omega_0 \left((R_s + R_r / s)^2 + \omega_0^2 (L_{\sigma s} + L_{\sigma r})^2 \right)},$$

отсюда $M_k \sim U_s^2$.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, можно записать, применив уточненную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k (1 + s_k R_s / R_r)}{s / s_k + s_k / s + 2s_k R_s / R_r} \approx \frac{2M_k}{s_k / s} \sim \frac{2s}{s_k} U_s^2,$$

отсюда $s \sim \frac{Ms_k}{2U_s^2} \sim \frac{1}{U_s^2}$.

Функциональный блок математической модели потерь ММ (рис. 2а) вычисляет мощность потерь асинхронного двигателя, согласно выражению (5).

В связи с использованием в электроприводе модели потерь система управления оказывается зависимой от точности определения параметров схемы замещения. Для исключения этого влияния возможна замена режима минимума мощности потерь на режим минимума тока статора (данные режимы работы достаточно близки друг к другу с точки зрения энергоэффективности [1]). При реализации подобной системы блок ММ заменяется обратной связью по току статора, принцип работы всей системы при этом не меняется.

Если тестовый сигнал треугольной формы $\gamma_2(t)$ имеет амплитуду $\Delta U_{s \max} = \Delta \gamma_{2 \max}$ и период T , то позиция текущей рабочей точки (1, 2 или 3 на рис. 2б) относительно экстремального значения функции может быть определена регистрацией изменения мощности потерь вследствие приложения тестового сигнала ($+\Delta U_{s \max} = +\Delta \gamma_{2 \max}$) в течение первого полу-периода ($T/2$).

Алгоритм поиска экстремума приведен ниже:

- если мощность потерь ΔP_{Σ} увеличивается (точка 1), то текущее значение скольжения s меньше своего оптимального значения $s_{\text{опт}}$ при заданных условиях работы электропривода;
- если ΔP_{Σ} уменьшается (точка 2), то $s > s_{\text{опт}}$;
- если $\Delta P_{\Sigma} \approx 0$ (точка 3), то $s = s_{\text{опт}}$.

Для того, чтобы режим работы асинхронного двигателя был максимально приближен к режиму с оптимальным скольжением, т. е. с минимумом мощности потерь, необходимо задать требуемый знак скорости нарастания напряжения $\gamma_1 = \epsilon t$ (ϵ – эмпирическая постоянная) следующим образом:

– если ΔP_{Σ} увеличивается, то управляющее напряжение γ_1 должно уменьшать напряжение статора:

$$\Delta U_s = \gamma_2(t) - \gamma_1(t) = \gamma_2(t) - \varepsilon \cdot t = \gamma(t) ;$$

– если ΔP_{Σ} уменьшается, то управляющее напряжение γ_1 должно увеличивать напряжение статора:

$$\Delta U_s = \gamma_2(t) + \gamma_1(t) = \gamma_2(t) + \varepsilon \cdot t = \gamma(t) .$$

Моделирование электропривода. Моделирование электропривода с учетом нелинейностей, описываемых выражениями (1–3), проводилось в среде *MatLab* следующим образом.

На первом интервале времени был осуществлен плавный пуск электропривода до установившейся частоты вращения. Система экстремального управления при этом отключена. После завершения переходных процессов система экстремального управления подключается к классической системе скалярного управления и начинает регистрировать направление изменения мощности потерь в первом полупериоде тестового сигнала. В зависимости от изменения мощности потерь система экстремального управления начинает вырабатывать управляющий сигнал $\gamma_1(t)$, направленный на уменьшение потерь в асинхронном двигателе. Когда изменение мощности потерь становится меньше петли гистерезиса регулятора (рис. 2), тестовый сигнал отключается до тех пор, пока в силу различных причин (изменение момента сопротивления, момента инерции, температуры обмоток и др.), не зависящих от изменения задания ω_z , скольжение не отклонится от своего оптимального значения, что вызовет соответствующее увеличение потерь.

На рис. 3 приведены осциллограммы различных переменных электропривода при работе системы, обеспечивающей настройку на режим минимального энергопотребления

$$(\omega_z = 0,5\omega_0, M = 1,35 M_{ном}).$$

Анализ графиков (рис. 3) показывает работоспособность разработанной системы управления. Так, при пониженной в два раза относительно номинальной частоте вращения и моменте, превышающем номинальный, для обеспечения минимального значения потерь необходимо увеличивать напряжение статора, вследствие чего происходит одновременное уменьшение тока обмотки статора (порядка 10...15 %). Мощность потерь снижается на 25 %. Частота вращения ω после отключения системы экстремального управления возвращается к своему значению до включения системы. Колебания частоты вращения во время работы системы незначительны и не превышают $0,005\omega_z$.

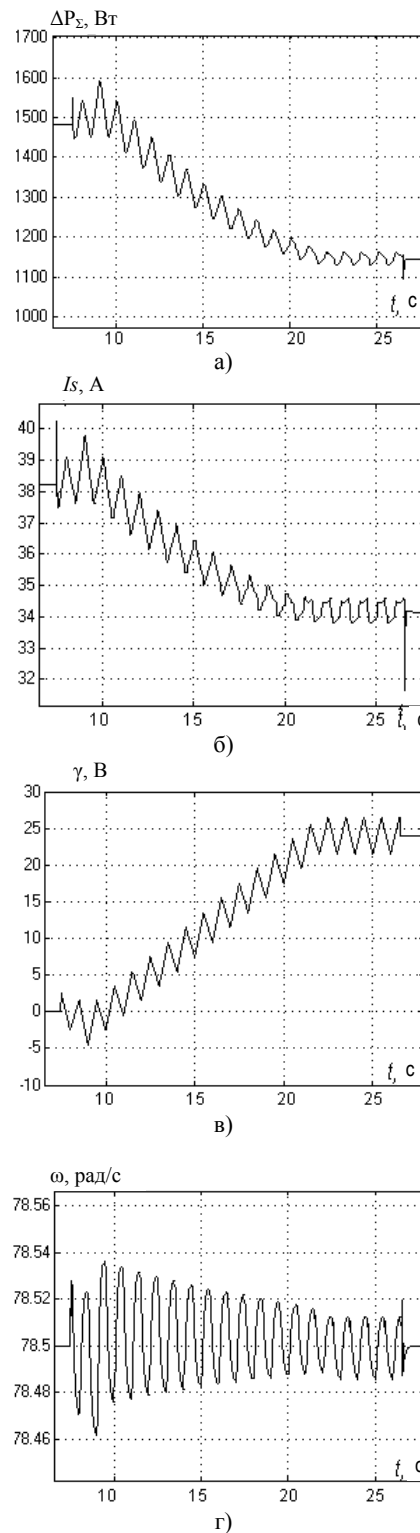


Рис. 3. Графики зависимости переменных электропривода от времени: а – зависимость мощности потерь энергии ΔP_{Σ} от времени t , б – зависимость тока статора I_s от времени t , в – зависимость напряжения системы экстремального управления γ от времени t , г – зависимость частоты вращения ω от времени t

Выводы.

Предлагаемая система управления асинхронным двигателем рассчитана на статические режимы работы. В динамических процессах для электропривода могут ставиться другие задачи, поэтому в этих режимах настройки, оптимизирующие потребление энергии, целесообразно отключать. Система управления дает наибольший эффект при работе на пониженных частотах вращения и/или с пониженными/повышенными моментами сопротивления за счет регулирования в необходимых пределах магнитного потока или соответствующего тока посредством изменения напряжения питания статора. Уменьшение мощности потерь может достигать 25 % первоначальной величины в зависимости от реализуемого момента и частоты вращения.

Литература

1. *Браславский, И. Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М., 2004.
2. *Виноградов, А. Б.* Оптимизация тягового асинхронного электропривода с учетом потерь и насыщения стали / [А. Б. Виноградов и др.] // Электроприводы переменного тока: Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – С. 285–288.
3. *Космодамианский, А. С.* Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагру-

женных элементов / [А. С. Космодамианский и др.] // Электротехника. – 2014. – №8. – С. 38–43.

4. *Космодамианский, А. С.* Сравнительная оценка различных способов скалярного управления тяговым асинхронным двигателем с учетом температуры обмоток / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №6 – С. 129–135.

5. *Поляков, В. Н.* Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: авторефер. дис. ... д-ра техн. наук / В.Н. Поляков. – Екатеринбург, 2009.

6. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. – С. 57–61.

7. Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors / D.A. Sousa [et al] // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – № 4. – P. 2157–2164.

8. An efficiency-optimization controller for induction motor drives / M.E.H. Benbouzid, N.S. Nait Said // IEEE Power Engineering Review. – 1998. – Vol. 18. – Issue 5. – P. 63–64.

9. Loss-minimising control scheme for induction motors / S. Lim, K. Nam // IEE Proc.-Electr. Power Appl. – 2004. – Vol. 151. – №4. – July. – P. 385–397.

10. Vector control using series iron loss model of induction motors and power loss minimization / K. Aissa, K.D. Eddine // World academy of science, engineering, and technology, 52, 2009. – P. 142–148.

УДК 674.047.3

*Н. Н. Сеницын, Н. В. Телин, А. Н. Корнилов,
А. А. Нифонтова, Д. С. Ревакина
Череповецкий государственный университет*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ ШПОНА ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

В статье предложено математическое описание процесса сушки шпона при высокоинтенсивном нагреве, изложен способ тестирования численной модели сушки шпона, с использованием точного решения задачи Стефана. Представлены результаты исследования влияния настроечных параметров численного алгоритма на погрешность результатов моделирования.

Математическая модель сушки шпона, сквозное уравнение теплопроводности, тестирование, задача Стефана, погрешность решения.

The paper presents a mathematical description of the veneer drying process with high-intensity heating. The method of testing a numerical model of veneer drying, using exact solutions of the Stefan problem is described. The authors presented the results of studying the effect of tuning parameters of the numerical algorithm on the error of the simulation results.

Mathematical model of the veneer drying, through-conduction equation, testing, Stefan problem, error solution.

Введение.

Для изучения закономерностей прогрева влажного шпона применяют математические модели. Для технологии процесса сушки важное значение имеет температура материала. При наличии дополнительного подвода теплоты теплопроводностью или излучением температура на его поверхности будет выше температуры мокрого термометра. Если испарение происходит не только на поверхности материала, но

и внутри его (критерий испарения $\varepsilon > 0$), то температура центральных слоев тела меньше, чем на поверхности, т. е. имеет место температурный градиент [1].

При высокоинтенсивном процессе сушки влажного тела возникает давление парогазовой смеси, превышающее давление влажного воздуха в окружающей среде. Наличие градиента давления вызывает молярное движение парогазовой смеси по типу фильтрации [1].