

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 62-83:681.513.5

КЛЮЕВ О.В., к.т.н., доцент,
САДОВОЙ А.В., д.т.н., професор

Днепродзержинский государственный технический университет

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Введение. Известны системы как частотного, так и векторного управления скоростью вращения вала асинхронного двигателя (АД). Все системы частотного управления являются фактически одноканальными [1], где контур стабилизации потока через функциональный преобразователь подчинён контуру регулирования скорости. Однако при стабилизации потока на номинальном уровне и уменьшении момента нагрузки на валу АД его коэффициент мощности становится меньше номинального, и это уменьшение может быть значительным. Поэтому улучшить энергетические показатели автоматизированного электропривода можно, изменяя поток в функции момента сил сопротивления на валу АД. Для оптимизации энергетических процессов в АД необходимо построить двухканальную систему с независимым управлением скоростью и потокосцеплением асинхронной машины, что возможно реализовать в векторной полеориентированной системе управления с добавлением в её состав контура экстремального регулирования. Целью регулирования можно принять достижение экстремума некоторой целевой функции и слежение за дрейфом экстремума при изменении параметров и переменных состояния электропривода.

Постановка задачи. Задача настоящей статьи состоит в формировании функций качества установившихся режимов работы асинхронной машины и исследовании свойств этих функций с целью получения результатов, необходимых для синтеза систем экстремального управления асинхронными электроприводами.

Результаты работы. Примем за исходную следующую систему уравнений установившегося режима работы асинхронной машины, записанных в ортогональных осях uv , ориентированных по вектору потокосцепления ротора:

$$\begin{aligned} U_{su} &= I_{su}R' - \omega_k L'_s I_{sv} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru}; & \omega_k &= \omega + \frac{R_r K_r I_{sv}}{\Psi_{ru}}; \\ U_{sv} &= I_{sv}R' + \omega_k L'_s I_{su} + K_r \omega \Psi_{ru}; & M_c &= \frac{3}{2} N K_r \Psi_{ru} I_{sv}. \\ \Psi_{ru} &= L_m I_{su}; \end{aligned} \quad (1)$$

Из уравнений (1) следуют соотношения

$$I_{su} = \frac{\Psi_{ru}}{L_m}; \quad I_{sv} = \frac{2M_c}{3NK_r \Psi_{ru}}. \quad (2)$$

Тогда модуль вектора тока статора находится по формуле

$$|\vec{I}_s| = I_s = \sqrt{I_{su}^2 + I_{sv}^2} = \sqrt{\frac{\Psi_{ru}^2}{L_m^2} + \frac{4M_c^2}{9N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2}}. \quad (3)$$

Поскольку параметры ротора в уравнениях (1) приведены к статору и ротор не подключен к питающей сети, то активная мощность, потребляемая АД, равна:

$$P_{s,r} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\vec{U}_s \times \vec{I}_s^*] = \frac{3}{2} [U_{su} I_{su} + U_{sv} I_{sv}]. \quad (4)$$

Составляющие вектора напряжения статора после замены токов I_{su} и I_{sv} в выражениях (1) соотношениями (2) примут вид

$$U_{su} = R_s \frac{\Psi_{ru}}{L_m} - \frac{2\omega_k L_s' M_c}{3N K_r \Psi_{ru}} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru}; \quad U_{sv} = \frac{2R_s' M_c}{3N K_r \Psi_{ru}} + \frac{\omega_k L_s' \Psi_{ru}}{L_m} + K_r \omega \Psi_{ru}. \quad (5)$$

Подставляем соотношения (2), (5) в (4) и после преобразований получим

$$P_{s,r} = \frac{3R_s \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{2R_s' M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2} + \frac{\omega M_c}{N}. \quad (6)$$

В этом выражении последнее слагаемое есть мощность на валу, а первые два слагаемых представляют активные потери в обмотках статора и ротора от обеих составляющих токов. Активные потери в стали не учитываются. Тогда мощность потерь

$$\Delta P = \frac{3R_s \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{2R_s' M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2}. \quad (7)$$

Реактивная мощность АД определяется по формуле

$$Q_{s,r} = \frac{3}{2} \text{Im}[\vec{U}_s \times \vec{I}_s^*] = \frac{3}{2} (U_{sv} I_{su} - U_{su} I_{sv}). \quad (8)$$

Подставив соотношения (2) и (5) в (8), после преобразований получим

$$Q_{s,r} = \frac{3L_s' \omega_k \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{2L_s' \omega_k M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2} + \frac{3K_r \omega \Psi_{ru}^2}{2L_m} + \frac{M_c}{N T_r}. \quad (9)$$

Скорость вращения системы координат равна

$$\omega_k = \omega + \frac{R_r K_r I_{sv}}{\Psi_{ru}} = \omega + \frac{2R_r M_c}{3N \Psi_{ru}^2}. \quad (10)$$

Подставляем полученное выражение в (9), упростив которое будем иметь

$$Q_{s,r} = \frac{3L_s' \omega \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{L_s' R_r M_c}{N L_m^2} + \frac{2L_s' \omega M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2} + \frac{4L_s' R_r M_c^3}{9N^3 K_r^2 \Psi_{ru}^4} + \frac{3K_r \omega \Psi_{ru}^2}{2L_m} + \frac{M_c}{N T_r}. \quad (11)$$

Коэффициент мощности АД рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_{s,r}}{\sqrt{P_{s,r}^2 + Q_{s,r}^2}}. \quad (12)$$

Любое из выражений (3), (7), (11) или (12) может рассматриваться как функция качества установившихся режимов работы асинхронной машины. Указанные соотношения в общем случае являются функциями трёх переменных: момента нагрузки, скорости вращения вала и модуля потокосцепления ротора АД. Скорость вращения стабилизируется системой управления на уровне, определяемом требованиями и условиями технологического процесса. Момент на валу двигателя в установившемся режиме работы зачастую зависит от скорости вращения. Поэтому исследовать перечисленные критерии качества на экстремум имеет смысл только как функции потока Ψ_{ru} , а равенство нулю производных этих функций по потоку является условием экстремума энергетических характеристик работающего электропривода, включенного в технологический процесс.

Возьмём производную от модуля вектора тока статора (3) по потокосцеплению и приравняем её нулю. Разрешив полученное уравнение относительно потокосцепления, получим следующую формулу:

$$\Psi_{ru} = \sqrt[4]{\frac{4L_m^2 M_c^2}{9N^2 K_r^2}}. \quad (13)$$

При этих значениях $\Psi_{\text{ру}}$ ток статора достигает наименьшей величины при заданном моменте нагрузки. Если решим уравнение $\frac{d\Delta P}{d\Psi_{\text{ру}}} = 0$ относительно потокосцепления, то получим

$$\Psi_{\text{ру}} = \sqrt[4]{\frac{4R' L_m^2 M_c^2}{9N^2 K_f^2 R_s}}. \quad (14)$$

Выполним расчёты значений потокосцеплений для двигателя 4AK160S4Y3 по формулам (13) и (14). Результаты расчётов приведены в табл.1, 2.

Таблица 1 – Результаты расчёта по формуле (13)

M_c/M_n	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}$	0,955	1,351	1,654	1,91	2,136

Таблица 2 – Результаты расчёта по формуле (14)

M_c/M_n	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}$	1,172	1,657	2,029	2,343	2,62

Из таблиц видно, что для наиболее вероятных нагрузок $M_c = (0,4...1)M_n$ минимум тока статора или потерь в двигателе достигается на нелинейном участке характеристики намагничивания, где формулы, полученные для двигателя с линейной характеристикой намагничивания дают завышенные (в 1,5...3 раза больше номинального) значения потока двигателя. Такой поток не может быть достигнут вследствие насыщения стали. По этой же причине в результате резкого увеличения тока намагничивания потери при значительном росте потока превзойдут не только минимальные, но и номинальные. Из сказанного следует, что при синтезе алгоритмов экстремального управления необходимо учитывать влияние потока двигателя на его параметры.

Результаты поиска экстремума целевых функций (3) и (7) методом дихотомии с учётом влияния нелинейности кривой намагничивания на параметры АД приведены в табл.3, 4. Исследования проводились для прежнего двигателя 4AK160S4Y3. Для других АД следует ожидать аналогичных результатов.

Таблица 3 – Значения потока, обеспечивающие минимум току статора

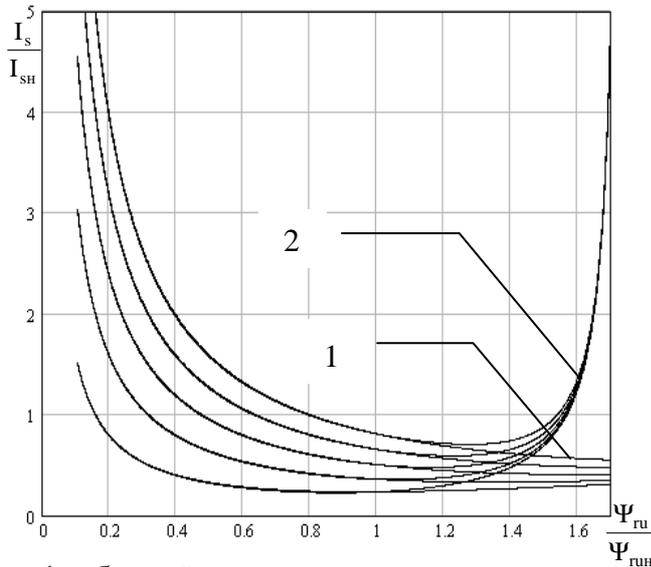
M_c/M_n	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}$	0,88	1,064	1,165	1,234	1,278

Таблица 4 – Значения потока, при которых потери достигают минимума

M_c/M_n	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}$	0,989	1,165	1,257	1,315	1,356

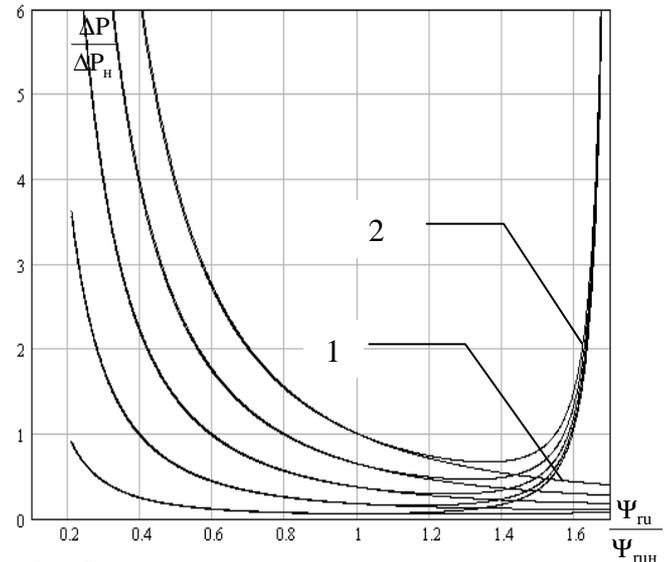
Из сравнения результатов табл.1, 2 и 3, 4 видны существенные различия в значениях потокосцеплений, что говорит о неадекватности целевых функций, полученных из статических моделей АД без учёта нелинейности характеристики намагничивания. Сказанное подтверждается графиками на рис.1, 2. Из этих рисунков хорошо видно, что

различия между характеристиками в пределах линейной зоны кривой намагничивания отсутствуют. Характеристики на обоих рисунках построены для тех же значений моментов нагрузки, что приведены в таблицах. При насыщении магнитопровода реактивный ток статора резко возрастает, что приводит к быстрому увеличению активных потерь в обмотках АД. Из рис.1, 2 и табл.3, 4 видно, что для обеспечения минимума тока или потерь в меди обмотки статора двигатель должен иметь потокосцепление ротора больше номинального, т.е. работать на нелинейном участке кривой намагничивания.



1 – без учёта насыщения магнитопровода;
2 – с учётом насыщения магнитопровода

Рисунок 1 – Зависимость модуля тока статора от потокосцепления ротора



1 – без учёта насыщения магнитопровода;
2 – с учётом насыщения магнитопровода

Рисунок 2 – Зависимость потерь в АД от потокосцепления ротора

Теперь найдём экстремум целевой функции (11). Для этого продифференцируем её по Ψ_{ru} , приравняем полученное выражение нулю и получим следующее уравнение:

$$\left(\frac{3L'_s \omega}{L_m^2} + \frac{3K_r \omega}{L_m} \right) \Psi_{ru}^6 - \frac{4L'_s \omega M_c^2}{3N^2 K_r^2} \Psi_{ru}^2 - \frac{16L'_s R_r M_c^3}{9N^3 K_r^2} = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) можно привести к виду

$$t^3 + pt + q = 0. \quad (16)$$

Его действительный корень вычисляется по формуле Кардано:

$$t = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}. \quad (17)$$

Тогда экстремальные значения потокосцепления будут находиться как $\Psi_{ru} = \sqrt{t}$.

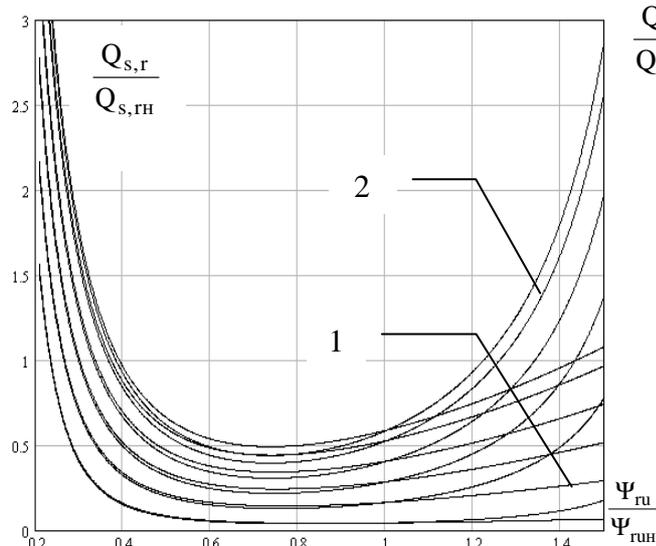
Вторая производная реактивной мощности по потокосцеплению будет положительной для любых значений потокосцеплений. Это говорит о том, что реактивная мощность является вогнутой функцией на всей области определения и, следовательно, экстремальная точка будет минимумом. Из выражения (15) следует, что координаты минимума целевой функции (11) зависят как от момента нагрузки, так и от скорости. Уравнение (15) получено в предположении, что параметр L_m равен номинальному значению и не зависит от потока. Если учесть эту зависимость, то в результате дифференцирования приходим к сложному уравнению. Поэтому при учёте нелинейности кривой намагничивания целесообразно для отыскания экстремальных потокосцеплений

применить численные методы прямого поиска экстремума функции одной переменной, например, метод дихотомии. В табл.5 помещены результаты исследования характеристики (11) на экстремум для различных скоростей и моментов нагрузки при учёте зависимости $L_m = f(\Psi_{\text{ру}})$ и без него.

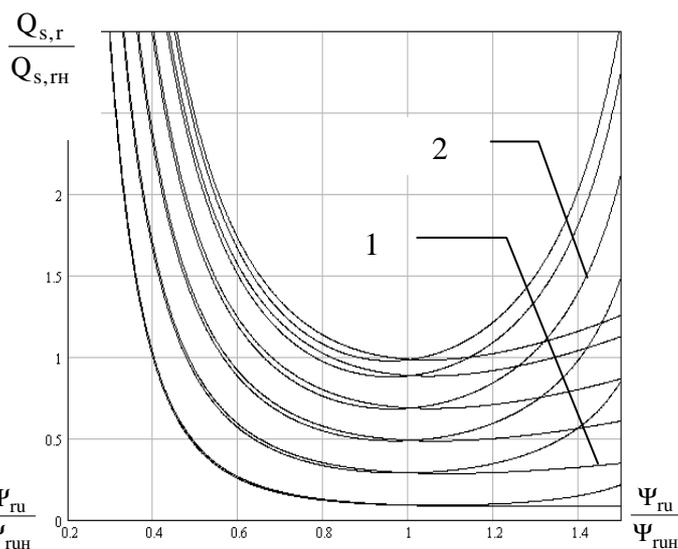
Таблица 5 – Результаты исследования работы АД по критерию минимума реактивной мощности (11)

ω/ω_0	0,15	0,35	0,55	0,75	0,95	M_c/M_H
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = L_{\text{мн}}$	1,119	1,072	1,056	1,048	1,043	1
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = f(\Psi_{\text{ру}})$	1,001	0,973	0,926	0,922	0,919	
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = L_{\text{мн}}$	0,792	0,758	0,747	0,741	0,738	0,5
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = f(\Psi_{\text{ру}})$	0,774	0,75	0,742	0,737	0,735	
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = L_{\text{мн}}$	0,501	0,479	0,472	0,469	0,467	0,2
$\Psi_{\text{ру}}/\Psi_{\text{рун}}, L_m = f(\Psi_{\text{ру}})$	0,521	0,503	0,497	0,494	0,492	

На рис.3, 4 показаны зависимости в относительных единицах реактивной мощности АД от модуля вектора потокосцепления ротора для различных скоростей и нагрузок. Из графиков видно, что экстремум характеристик при увеличении скорости вращения смещается вверх, а при росте нагрузки – вправо. При этом экстремальные потокосцепления и особенно соответствующие им значения реактивной мощности для обоих типов характеристик отличаются незначительно. При низких скоростях функция реактивной мощности в окрестности минимума является пологой. При увеличении скорости минимум становится явно выраженным.



1 – без учёта насыщения магнитопровода;
2 – с учётом насыщения магнитопровода
Рисунок 3 – Графики изменения реактивной мощности при различных скоростях и $M_c = 0,5M_H$



1 – без учёта насыщения магнитопровода;
2 – с учётом насыщения магнитопровода
Рисунок 4 – Графики изменения реактивной мощности при различных скоростях и $M_c = M_H$

Если продифференцировать по Ψ_{ru} выражение для коэффициента мощности (12) и приравнять производную нулю, то после преобразований получается следующее тождество, которому должны удовлетворять значения Ψ_{ru} , доставляющие максимум коэффициенту мощности:

$$Q_{s,r} \cdot \frac{dP_{s,r}}{dt} = P_{s,r} \cdot \frac{dQ_{s,r}}{dt} . \quad (18)$$

Для упрощения полученного уравнения примем скорость вращения системы координат ω_k , не зависящей от потокосцепления, т.е. в дальнейших преобразованиях положим $\omega_k = \omega$. После подстановки выражений (6) и (9), а также результатов их дифференцирования по Ψ_{ru} в равенство (18), получим

$$\left(\frac{3L'_s \omega \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{2L'_s \omega M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2} + \frac{3K_r \omega \Psi_{ru}^2}{2L_m} + \frac{M_c}{NT_r} \right) \left(\frac{3R_s \Psi_{ru}}{L_m^2} - \frac{4R' M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^3} \right) = \left(\frac{3R_s \Psi_{ru}^2}{2L_m^2} + \frac{2R' M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^2} + \frac{\omega M_c}{N} \right) \left(\frac{3L'_s \omega \Psi_{ru}}{L_m^2} + \frac{3K_r \omega \Psi_{ru}}{L_m} - \frac{4L'_s \omega M_c^2}{3N^2 K_r^2 \Psi_{ru}^3} \right) . \quad (19)$$

Результатом преобразований выражения (19) будет следующее биквадратное уравнение:

$$\left(\frac{3R_s}{NT_r L_m^2} - \frac{3L'_s \omega^2}{NL_m^2} - \frac{3K_r \omega^2}{NL_m} \right) \Psi_{ru}^4 + \left(\frac{4R_s L'_s \omega M_c}{N^2 K_r^2 L_m^2} - \frac{4R' L'_s \omega M_c}{N^2 K_r^2 L_m^2} - \frac{4R' \omega M_c}{N^2 K_r L_m} \right) \Psi_{ru}^2 + \left(\frac{4L'_s \omega^2 M_c^2}{3N^3 K_r^2} - \frac{4R' M_c^2}{3K_r^2 N^3 T_r} \right) = 0 . \quad (20)$$

Решая уравнение (20) методом сведения его к квадратному уравнению для заданных скорости и момента нагрузки, беря далее в качестве результата единственный положительный действительный корень, получаем приближённое значение потокосцепления, при котором коэффициент мощности достигает максимума. Приближённость результатов следует из сделанного выше допущения $\omega_k = \omega$. В табл.6 содержатся результаты решения уравнения (20) для различных скоростей и моментов.

Таблица 6 – Физически реализуемые корни уравнения (20)

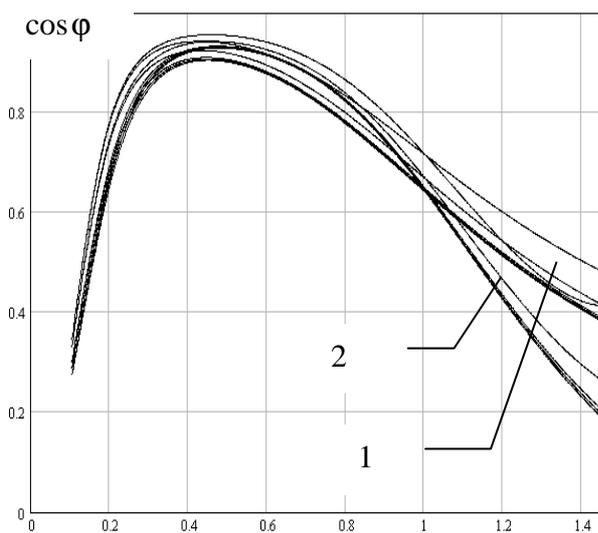
ω/ω_0	0,15	0,35	0,55	0,75	0,95	M_c/M_n
$\Psi_{ru}/\Psi_{рун}$	0,79	0,925	0,961	0,978	0,988	1
$L_m = L_{mn}$	0,56	0,654	0,68	0,691	0,698	0,5
	0,353	0,414	0,43	0,437	0,442	0,2

Если в выражение (12) подставим соотношения (6) и (11), то получим $\cos \phi$ как функцию трёх переменных: угловой скорости вала в электрических рад/с, момента на валу и потокосцепления ротора. При фиксированных скорости и моменте нагрузки коэффициент мощности как функция потока имеет явно выраженный максимум. Для определения его координат в силу громоздкости и сложности получаемой зависимости целесообразно применить метод прямого численного поиска экстремума. Результаты вычислений, осуществлённые методом дихотомии, помещены в табл.7, из данных которой следует, что экстремальные значения потокосцеплений практически не изменяются от скорости и существенно зависят от момента нагрузки.

Таблиця 7 – Результати дослідження на екстремум коефіцієнта потужності АД при різних моделях критерія якості

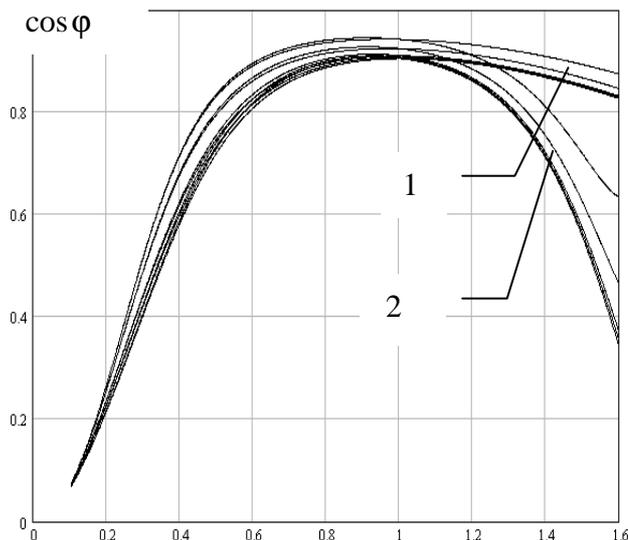
ω/ω_0		0,15	0,35	0,55	0,75	0,95	M_c/M_H
$\frac{\Psi_{gu}}{\Psi_{гун}}$	$L_m = L_{mH}$	0,968	0,992	1,004	1,004	1,009	1
	$L_m = f(\Psi_{gu})$	0,915	0,927	0,933	0,933	0,933	
	$L_m = L_{mH}$	0,685	0,703	0,709	0,709	0,715	0,5
	$L_m = f(\Psi_{gu})$	0,697	0,709	0,715	0,715	0,715	
	$L_m = L_{mH}$	0,432	0,444	0,45	0,45	0,45	0,2
	$L_m = f(\Psi_{gu})$	0,462	0,473	0,479	0,479	0,479	

Из сравнения значений табл.6, 7 видно, что наибольшие погрешности определения экстремальных значений потокосцеплений из решения уравнения (20) наблюдаются при низких скоростях вращения. На рис.5, 6 показаны графики зависимости коэффициента мощности от потока при разных скоростях и моментах. Рис.,5 6 подтверждают сделанные выше выводы и, кроме того, обнаруживают пологость функции коэффициента мощности в окрестности максимума.



1-без учёта насыщения магнитопровода;
2-с учётом насыщения магнитопровода

Рисунок 5 – Графики коэффициента мощности при разных скоростях и $M_c = 0.2M_H$



1-без учёта насыщения магнитопровода;
2-с учётом насыщения магнитопровода

Рисунок 6 – Графики коэффициента мощности при разных скоростях и $M_c = M_H$

Если по графикам рис.2 определить величины активных потерь для потокосцеплений, при которых функции реактивной мощности и коэффициента мощности достигают экстремума, то видно, что эти потери в подавляющем большинстве случаев не превышают номинальных. Исключение составляет область высоких скоростей и номинальных нагрузок, где экстремум достигается при потокосцеплениях несколько меньших номинального значения. При этом потери будут незначительно превышать номинальные. Однако благодаря пологости $Q_{s,r}$ и $\cos \phi$ в области экстремума можно сместить величину Ψ_{gu} до номинального значения, незначительно ухудшив при этом

функцию качества. Сказанное указывает на допустимость обеспечения экстремальных значений $Q_{s,r}$ и $\cos \varphi$ по условиям нагрева АД.

Выводы. Регулирование модуля потокосцепления ротора позволяет оптимизировать основные энергетические характеристики АД в статических режимах работы. При управлении по минимуму реактивной мощности или по максимуму коэффициента мощности модель с линейной кривой намагничивания можно эффективно использовать для получения достаточно точных приближений к экстремальным потокосцеплениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С.Сандлер, Р.С.Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.

УДК 621.3.051.025

САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор
АЛЕКСЕЕВ И.А., к.т.н., доцент
ТРИКИЛО А.И., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМЕ ОДНОПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Введение. Более ста лет назад Никола Тесла опубликовал результаты своих опытов по резонансному методу передачи электрической энергии [1, 2]. В начале двадцатого века не было современных электронных компонентов, а трехфазные сети, работающие с частотой 50-60 Гц, успешно справлялись с задачами по передаче энергии в диапазоне мощности от сотен ватт до тысяч мегаватт и на расстояние до 1000 километров. Технологические потери на активных и реактивных сопротивлениях, коммуникационных и преобразующих устройствах при таком способе передачи электрической энергии составляют более 20%.

Первым на территории СНГ однопроводную систему передачи электрической энергии внедрил «Газпром» (Россия) и спонсировал изготовление соответствующей установки мощностью 20 кВт [3]. Вдоль газопроводов технологически прокладывают линии электропередачи для катодной защиты, питания насосов для перекачивания и для других эксплуатационных служб. Стандартные линии стоят дорого, содержат провода из цветных металлов. При однопроводной передаче энергии стало возможным протянуть стальной провод, а на некоторых участках газопровода даже осуществить передачу энергии по самой трубе. Такая система имеет в сотни раз лучшие электрические параметры (КПД более 90%), чем традиционные двух-, трехпроводные.

Постановка задачи. Основной задачей данной работы является анализ электрических, геометрических, частотных характеристик резонансных трансформаторов и основных закономерностей построения на их основе резонансных силовых сетей электропитания.

Результаты работы. На базе кафедры электромеханики Днепродзержинского государственного технического университета в лабораторных условиях была исследована однопроводная резонансная система передачи электрической энергии мощностью до 100 Вт.

В качестве передающего и принимающего трансформаторов в системе резонансной передачи электрической энергии использовались трансформаторы Тесла, изготовленные на пластиковых каркасах с параметрами, указанными в табл.1.