

УДК 621.313.333.2

В. С. ПЕТРУШИН, Р. Н. ЕНОКТАЕВ

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Определен эквивалентный нагрузочный момент на валу двигателя привода ткацкого станка с учетом циклограммы и тахограммы нагрузки, а также тепловой нагрузочной способности. При трех диапазонных критериях выполнено автоматизированное оптимизационное проектирование регулируемых асинхронных двигателей и найдены значения варьируемых параметров двигателей, зависящие от выбранного критерия. Обосновано использование модифицированного критерия приведенных затрат. Выполнена проверка теплового состояния двигателей в динамических режимах с учетом тахограммы нагрузки.

**Ключевые слова:** регулируемый асинхронный двигатель, циклограмма нагрузки, тахограмма нагрузки, эквивалентный нагрузочный момент, проектные диапазонные критерии, варьируемые переменные, оптимизационное проектирование, тепловое состояние.

**Введение.** Частотный асинхронный электропривод (ЧАЭП) ткацкого станка обеспечивает работу при заданных циклограмме –  $M(t)$  и тахограмме –  $n(t)$  нагрузки. Серийные асинхронные двигатели (АД) проектируются на номинальную точку работы и выбор их для такого электропривода требует нахождения условного эквивалентного момента. Для улучшения энергетических показателей ЧАЭП целесообразно проектирование специальных регулируемых асинхронных двигателей (РАД) с учетом заданного диапазона регулирования, что существенно увеличивает объем расчетов и предполагает использование комплексных проектных моделей, включающих в себя модели всех составляющих привода [1,2,3,4]. В качестве диапазонных проектных критериев могут быть использованы как энергетические показатели двигателя, в частности КПД, так и приведенные затраты привода [5, 6]. Рационально применение модифицированного критерия приведенных затрат [7].

**Постановка задачи.** Оптимизационное проектирование РАД осуществляется путем параметрической оптимизации базового двигателя, в качестве которого, как правило, выбирается общепромышленный серийный АД. Выбор выполняется с учетом того, что в рабочем цикле присутствуют изменения, как скорости, так и момента нагрузки. При этом необходимо принимать во внимание снижение допустимого нагрузочного момента в связи с температурными ограничениями для определенного класса изоляции при изменении частоты питающего напряжения, имеющего место при частотном регулировании. С этой целью используется «нормальная» характеристика тепловой нагрузочной способности, построенная для асинхронных двигателей определенного конструктивного исполнения (степени защиты и системы охлаждения) и применяемого закона частотного управления. В результате анализа нагрузки на каждом сегменте рабочего цикла может быть рассчитан эквивалентный нагрузочный момент. Если предположить, что повышение температуры прямо пропорционально потерям и что тепловые потери являются преобладающим компонентом общих потерь, то с учетом изменения потерь пропорционально квадрату скорости выражение для расчета эквивалентного

момента имеет следующий вид:

$$M_{eq} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^7 \left( \frac{M_i}{df_i} \right)^2 t_{if}}}{\sum_{i=1}^7 t_i}, \quad (1)$$

где  $M_{eq}$  – эквивалентный момент двигателя,  $M_i$  – момент для каждого сегмента рабочего цикла,  $df_i$  – поправочный коэффициент для каждой рабочей скорости, который учитывает повышение температуры и соответственно снижение допустимого нагрузочного момента,  $t_i$  – период каждого сегмента цикла.

Используя найденное значение эквивалентного момента, определяется мощность нагрузки и выбирается наиболее подходящий общепромышленный серийный АД. С помощью параметрической оптимизации разрабатывается требуемый РАД.

Рационально при проектировании энергосберегающих РАД использовать в качестве проектного критерия среддиапазонное значение КПД двигателя, максимум которого достигается в результате параметрической оптимизации. Если известны временные диаграммы эксплуатации нагрузок, т.е. время работы на каждой частоте вращения, определяемое технологическими требованиями к приводным механизмам, то оценку такого диапазонного энергетического критерия необходимо производить с учетом длительности работы двигателя в каждой точке диапазона регулирования [4]

$$\eta_{срАД} = \frac{\sum_i (\eta(n_i) \cdot t_{n_i})}{\sum_i t_{n_i}}, \quad (2)$$

где  $t_{n_i}$  – время работы двигателя при частоте вращения  $n_i$ ,  $i$  – порядковый номер рабочего сегмента.

Другим приемлемым проектным критерием представляется приведенные затраты (ПЗ) электропривода [6]. Следует отметить, что при работе РАД в составе современных ЧАЭП из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии:

$$ПЗ_{эн} = C_{эн} [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аэн}, \quad (3)$$

где  $C_{эн}$  – полная стоимость электропривода.  
Стоимость потерь активной энергии

$$C_{аэн} = C_{cae} P_{1эн} (1,04 - \eta_{эн}), \quad (4)$$

где  $C_{cae}$  – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течение срока службы двигателя (0,1 у.е. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), нормативного срока окупаемости электропривода  $T_n$  и коэффициента относительной загрузки двигателя (0,8). Для ЧАЭП значения  $T_n = 5$  лет,  $k_a = 0,065$  (коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления),  $k_o = 0,069$  (коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание электропривода) принимаются такими же, что и для общепромышленных [6].

Среднедиапазонные  $ПЗ_{эн}$  также могут быть рассчитаны с учетом длительности работы двигателя в каждой точке диапазона регулирования

$$ПЗ_{сдэл} = \frac{\sum_i (ПЗ_{эн}(n_i) \cdot t_{n_i})}{\sum_i t_{n_i}}, \quad (5)$$

Модифицированный критерий  $ПЗ$  электропривода [7] учитывает влияние инфляционных процессов и приоритет энергетической составляющей над капитальными затратами. Это осуществляется за счет введения коэффициента значимости эксплуатации  $k_{эз}$  и коэффициента инфляции  $k_{инф}$ .

Тогда выражение для модифицированного критерия  $ПЗ$  электропривода имеет вид:

$$ПЗ_{эзм} = \frac{C_{эн}}{k_{эз}} + C_{эн} \cdot (k_{ам} + k_{об}) \cdot k_{инф} + C_{аэн} \cdot k_{инф}, \quad (6)$$

где  $k_{эз}$  – коэффициент значимости эксплуатации;

$k_{инф}$  – коэффициент инфляции.

Значение  $k_{инф}$  рассчитывается следующим образом

$$k_{инф} = \frac{\sum_{m=0}^{T_n-1} (1 + \frac{d_{инф}}{100\%})^m}{T_n}, \quad (7)$$

где  $d_{инф}$  – усредненный показатель годовой инфляции (в %).

**Результаты исследований.** Нагрузка ткацкого станка, при полной величине 50 Нм, представляется следующей диаграммой (рис.1).

В соответствии с диаграммой задается диапазон регулирования от 540 об/мин до 3600 об/мин. Питание привода осуществляется от трехфазной сети переменного тока 380В/50 Гц. Класс нагревостойкости изоляции двигателя В (допустимая температура 130<sup>0</sup>С). Используется двигатель с самоохлаждением. При прямом соединении двигателя с нагрузкой не требуется редуктор.

На (рис.2) приведена «нормальная» характеристика тепловой нагрузочной способности асинхронных двигателей серии 4А, используя которую определяется эквивалентный нагрузочный момент.

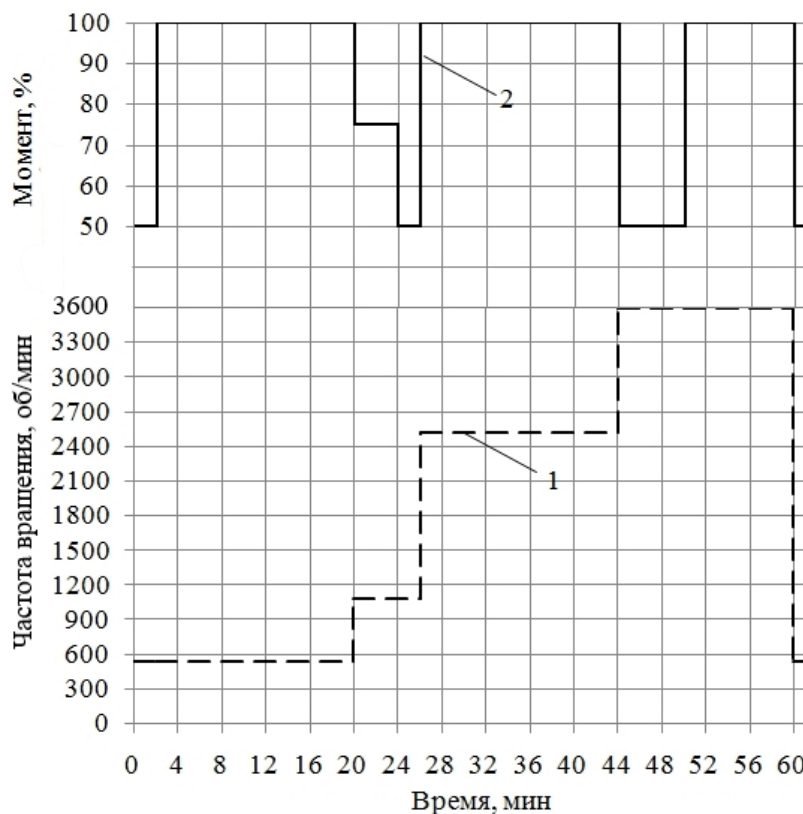


Рис. 1 – Диаграмма нагрузки ткацкого станка.  
Частота вращения  $n$  (1) и момент двигателя  $M$  (2)

Таблиця 1 – К расчету эквивалентного нагрузочного момента

Период (мин.)	2	18	4	2	18	6	10
Момент (о.е.)	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Момент (Нм)	25,0	50,0	37,5	25,0	50,0	25,0	50,0
Скорость (об/мин.)	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Частота (Гц)	9	9	18	18	42	60	60
Частота (о.е.)	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Поправочный коэффициент $df_i$	0,67	0,67	0,78	0,78	1,00	0,83	0,83

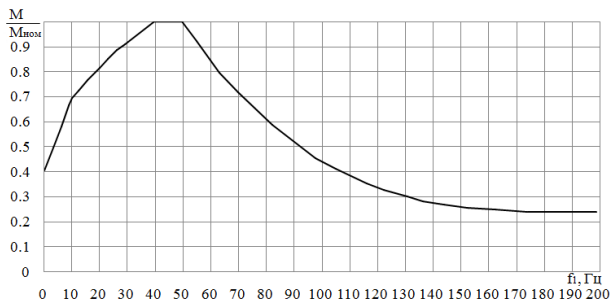


Рис. 2 – Характеристика тепловой нагрузочной способности асинхронных двигателей серии 4А

В (табл.1) сведены данные для расчета на каждом сегменте нагрузочного цикла. Согласно (1) эквивалентный нагрузочный момент составляет 57,8 Нм, что позволяет определить требуемую мощность двигателя.

Выбран серийный асинхронный двигатель 4А160М2.

Системный подход предусматривает при проектировании РАД совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [2,5]. Ввиду этого требуется специальное программное обеспечение автоматизированного проектирования. Программа DIMASDrive [3], разработанная на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета, позволяет осуществить проектирование РАД. В качестве первого проектного критерия использовался средндиапазонный критерий КПД двигателя, второго – средндиапазонный критерий ПЗ электропривода. Рассматривается работа двигателя в РЭП с частотным преобразователем (Altivar 58, 1500 у.е., 15 кг,  $\eta_{np}=0.94$ ) при законе частотного управления  $U/f=const$

В качестве варьируемых параметров выбраны длина пакета статора двигателя ( $L$ ), которая изменяется в диапазоне от 104 до 182 мм и частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя, изменяющаяся в диапазоне от 45 до 55 Гц. Изменение частоты ( $f$ ) предполагает автоматическое изменение числа витков ОС ( $W_1$ ), сечения эффективного проводника ОС ( $q_{эф}$ ), диаметра обмоточного провода ( $d_{np}$ ).

Выполнен подбор коэффициента  $k_{зз}$  для согласования максимума КПД и минимума ПЗ [7]. Экстремумы критериев зависят только от варьируемых переменных, отвечающих массогабаритности составляющей. При введении коэффициента  $k_{зз} = 15$  экстремумы совпадают. Кроме того был использован коэффициент  $k_{инф}$ , равный 1,192, что соответствует показателю инфляции  $d_{инф} - 5\%$  и сроку окупаемости  $T_n - 5$  лет. В процессе оптимизации были учтены проектные диапазонные ограничения по температурам обмотки статора и подшипниковых щитов. В двигателях прошедших оптимизацию диаметр обмоточного провода ( $d_{np}$ ) остался неизменным.

В (табл. 2) приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании трех выбранных критериев проектирования.

При учете задаваемой инфляции на 15,5 % изменится величина модифицированного критерия приведенных затрат ЭП (увеличится с 3486 до 4127 у.е.).

Представляется возможным, используя тахограмму рассматриваемой нагрузки,

Таблиця 2 – Проектные критерии и конструктивные изменения

Двигатели / Показатели	Серийный	Оптимизированный по критерию ПЗ	Оптимизированный по критерию КПД	Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ
ПЗ эп, у.е.	5819	5480	5550	3486
$\eta$ эп	72,8	76,81	76,96	77
$\eta$ АД	77,16	81,42	81,58	81,62
$\cos\phi$ АД	0,93	0,88	0,93	0,90
Масса АД, кг	120	122	133	126
Стоимость АД, у.е.	638	648	699	664
Объем АД, дм <sup>3</sup>	9,62	9,93	11,4	10,38
$f$ , Гц	50	59,9	59,6	59,9
$W_1$	84	70	70	70
$q_{эф}$ , мм <sup>2</sup>	2,76	3,30	3,29	3,30
$L$ , мм	130	134	154	140

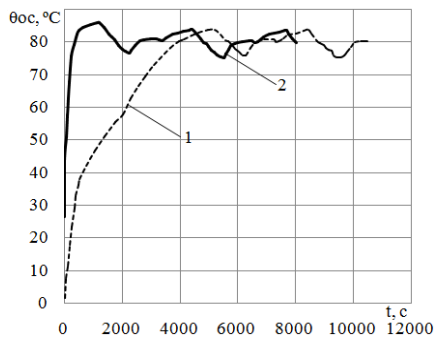


Рис.3 – Перегрев температуры пазовой части обмотки статора «холодного» (1) и «горячего» (2) двигателей

смоделировать тепловое состояние двигателя (перегрев температуры пазовой части обмотки статора  $\Theta_{oc}$ ) в динамическом режиме. Далее проведен анализ лучшей модификации АД, полученной при оптимизационном проектировании по критерию модифицированных ПЗ.

На (рис.3) представлены зависимости  $\Theta_{oc}$ , построенные как без использования соответствующих перегревов конструктивных частей машины, т.е. при рассмотрении «холодного» двигателя, так и с использованием данных перегревов, т.е. при рассмотрении «разогретого» двигателя.

Исходя из рис. 3 модифицированный двигатель при работе на заданную нагрузку не будет перегреваться.

#### Выводы

1. Определение эквивалентного момента и выбор серийного асинхронного двигателя для привода ткацкого станка осуществляется с использованием характеристики тепловой нагрузочной способности и диаграммы нагрузки.

2. Применение в электроприводе станка модификаций базового двигателя, полученных при нескольких проектных критериях, обеспечивает повышенные энергетические показатели и сниженные приведенные затраты.

3. При рассмотрении теплового состояния АД в динамических режимах определена возможность работы без перегрева лучшей модификации в рассматриваемом приводе.

**Список литературы:** 1. IEC 60034 - 25. Руководство по проектированию и производству асинхронных электродвигателей для работы от преобразователей частоты. 2006. 2. Петрушин В. С. Проектирование модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей для систем полупроводникового электропривода. / В. С. Петрушин, С. В. Рябинин, А. М. Якимец // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – № 61. – С. 196 – 197. 3. Петрушин В. С., Рябинин С. В., Якимец А. М. Программный продукт „DIMASDrive“. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001. 4. Петрушин В. С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303с. 5. Петрушин В. С. Проектные диапазонные критерии при разработке регулируемых асинхронных двигателей. / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Научно-практический журнал «Электротехника і Електромеханіка». – 2014. – №5. – С. 33 – 36. 6. Петрушин В. С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід.наук.-техн. зб. – 2001. – №56. – С. 51 – 54. 7. Петрушин В. С. Модификация критерия приведенных затрат электропривода для проектирования регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2014. – № 38 (1081). – С. 132 – 137.

**Bibliography (transliterated):** 1. IEC 60034 – 25. Rukovodstvo po proektirovaniu i proizvodstvu asinkhronnykh elektrodvigateliei dlia raboty ot preobrazovatelei chastoty, 2006. Print. 2. Petrushin, V. S., S. V. Rjabinin and A. M. Iakimets'. "Proektirovanie modifikatsii asinkhronnykh korotkozamknytykh dvigatelei dlia sistem poluprovodnikovogo elektroprivoda." *Vestnik Hark. gos. politehn. in-ta*. No. 61. Kharkov: HGPU, 2000. 196–197. Print. 3. Petrushin V. S., S. V. Rjabinin and A. M. Iakimets'. "Programmyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinkhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda." Patent UA, No.4065. CD. 4. Petrushin V. S. *Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode*. Ucheb. posob. dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii. Odessa. Nauka i tekhnika, 2006. 5. Petrushin V. S., and R. N. Yenoktaiev. "Proektnye diapazonnye kriterii pri razrabotke reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei." *Elektrotekhnika i Elektromekhanika* 5 (2014): 33–36. Print. 6. Petrushin V. S. "Privedennyye zatraty asinkhronnykh dvigatelei v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniia." *Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia*. Resp. mizhvid.nauk.-tekh. zb. No 56. 2001. 51–54. Print. 7. Petrushin V. S., and R. N. Yenoktaiev. "Modifikatsiia kriteriia privedennykh zatrat elektroprivoda dlia proektirovanija reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei." *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo un-ta*. No 38 (1081). 2014. 132–137. Print.

Поступила (received) 24.04.2015

#### «Сведения об авторах /About the Authors»

**Петрушин Виктор Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет, заведующий кафедры электрических машин, тел.: (057) 707-65-14; e-mail: [viktor\\_petrushin@ukr.net](mailto:viktor_petrushin@ukr.net).

**Petrushin Viktor Sergeevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Odessa national polytechnic university, Chair of the Department of Electrical machines, phone: +38 (048)7348494; e-mail: [viktor\\_petrushin@ukr.net](mailto:viktor_petrushin@ukr.net).

**Еноктаев Ростислав Николаевич** – Одесский национальный политехнический университет, инженер кафедры электрических машин, тел. (097)046-30-70; e-mail: [rostik-enok@inbox.ru](mailto:rostik-enok@inbox.ru)

**Yenoktaiev Rostislav Nikolaievich** – Odessa national polytechnic university, Engineer of the Department of Electrical machines, phone +38 (048)734-8494; e-mail: [rostik-enok@inbox.ru](mailto:rostik-enok@inbox.ru)