

ПРОЕКТНЫЕ ДИАПАЗОННЫЕ КРИТЕРИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Виконано автоматизоване оптимізаційне проектування регульованих асинхронних двигунів для різних проектних задач при двох діапазонних критеріях. Проектні задачі припускають розгляд як статичних, так і динамічних режимів. Визначено зміну варійованих параметрів двигунів залежно від обраного критерію та проектної задачі.

Выполнено автоматизированное оптимизационное проектирование регулированных асинхронных двигателей для различных проектных задач при двух диапазонных критериях. Проектные задачи предполагают рассмотрение как статических, так и динамических режимов. Определено изменение варьируемых параметров двигателей в зависимости от выбранного критерия и проектной задачи.

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку использование серийных асинхронных двигателей (АД) в частотных электроприводах (ЭП) не оптимально по массогабаритным, стоимостным, энергетическим показателям для конкретного электропривода может выполняться проектирование специальных регулируемых асинхронных двигателей (РАД) с учетом их работы на соответствующие по величине и характеру нагрузки, а также определенно-го режима работы [1-3]. РАД проектируются не на одну номинальную точку работы, как проектируются АД общепромышленного назначения, а на работу в заданном диапазоне регулирования и при их разработке существенно возрастает объем расчетов [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае при проектировании РАД в качестве проектных критериев могут использоваться масса, габариты, стоимость двигателя, среднедиапазонные приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию (ПЗ), среднедиапазонные энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), либо может быть применен обобщенный критерий, учитывающий в качестве составляющих вышеперечисленные критерии. Можно также использовать аналогичные проектные критерии, определяемые для всего регулируемого ЭП. Результаты проектирования изменятся при различных используемых критериях или при различных их составляющих в обобщенном критерии, а также зависят от задаваемых коэффициентов значимости этих составляющих. При расчете критериев могут приниматься во внимание их значения в переходных режимах работы. Такой подход позволяет осуществлять проектирование как для режимов работы, в которых продолжительности переходных режимов значительно меньше продолжительностей работы в установившихся режимах, так и для режимов при соизмеримости вышеуказанных продолжительностей. Таким образом, можно определить несколько проектных задач, характеризующих как диапазоном работы на определенную нагрузку, так и продолжительностью работы на заданных тахограммах частотах вращения.

Если в качестве критерия проектирования использовать такой энергетический показатель, как среднедиапазонный КПД двигателя, будет обеспечиваться проектирование энергосберегающего РАД.

Среднедиапазонные энергетические проектные критерии [5] должны отражать энергетику РАД во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2 и определяются как эквивалентные усредненные для этого диапазона. То же касается и обобщенного критерия приведенных затрат двигателя, который учитывает стоимость изготовления и затраты на эксплуатацию. В связи с тем, что затраты зависят от КПД и коэффициента мощности, обобщенный критерий приведенных затрат имеет различные значения в разных точках диапазона и целесообразно определять диапазонное значение этого критерия, т.е. эквивалентное усредненное для всего диапазона.

Если диапазонные энергетические показатели рассчитываются как усредненные для всего диапазона

$$\eta_{срАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \eta_{АД}(n) \cdot dn, \quad (1)$$

$$\cos \varphi_{1срАД} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \cos \varphi_{1АД}(n) \cdot dn, \quad (2)$$

то диапазонный критерий ежегодных приведенных затрат двигателя может быть определен исходя из следующего. При известной полной стоимости двигателя $сed$ значение критерия определяется как

$$ПЗ_{АД} = (сed + C_u) \cdot [1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{аАД}, \quad (3)$$

где C_u – стоимость затрат на компенсацию реактивной мощности, грн; C_a – стоимость потерь электроэнергии за год, грн; T_n – нормативный срок окупаемости двигателя, лет; k_a – доля затрат на амортизационные отчисления; k_o – доля затрат на обслуживание при эксплуатации двигателя.

Для регулируемых асинхронных двигателей значения $T_n = 5$ лет, $k_a = 0,065$, $k_o = 0,069$ принимаются теми же, что и для общепромышленных АД [2]. Тогда

$$ПЗ_{АД} = 1,67(сed + C_u) + C_{аАД}, \quad (4)$$

$$C_u = C_{cre} P_1 (tgj_1 - 0,484), \quad (5)$$

$$C_{аАД} = C_{cae} P_{1АД} (1,04 - h_{АД}), \quad (6)$$

где C_{cae} – коэффициент, учитывающий стоимость потерь активной энергии, представляющий собой произведение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии в течении срока службы двигателя (0,2 грн. за кВт·ч), числа часов работы двигателя в течении года (2100), числа

лет работы до капитального ремонта (5) и коэффициента относительной загрузки двигателя (0,8), C_{cre} – коэффициент, учитывающий стоимость компенсации реактивной энергии и представляющий собой произведение стоимости 1 кВАр реактивной мощности компенсирующих устройств (10 грн. за 1 кВАр), коэффициента участия двигателя в максимуме нагрузки системы (0,25).

$$PZ_{cdAD} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} PZ_{AD}(n) \cdot dn. \quad (7)$$

Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия PZ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии

$$PZ_{ЭП} = ser[1 + T_n(k_a + k_o)] + C_{aЭП}, \quad (8)$$

где ser – полная стоимость электропривода

$$C_{aЭП} = C_{cae} P_{ЭП}(1,04 - h_{ЭП}), \quad (9)$$

Значения коэффициентов и стоимостей, а так же часов и лет используются такие же, что и для определения PZ_{AD}

$$PZ_{cdЭП} = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \int_{n_1}^{n_2} PZ_{ЭП}(n) \cdot dn, \quad (10)$$

Если известны временные диаграммы эксплуатации нагрузок, т.е. время работы на каждой частоте вращения, определяемое технологическими требованиями к приводным механизмам, то оценку данных диапазонных энергетических критериев двигателя и привода необходимо производить с учетом длительности работы двигателя в каждой точке диапазона регулирования

$$\eta_{cd} = \frac{\sum_i (\eta(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_i t_{ni}}, \quad (11)$$

$$\cos \varphi_{1cd} = \frac{\sum_i (\cos \varphi_{1cd}(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_i t_{ni}}, \quad (12)$$

где t_{ni} – время работы двигателя при частоте вращения n_i , i – порядковый номер участка тахограммы.

Соответственно рассчитываются средндиапазонные приведенные затраты

$$PZ_{cd} = \frac{\sum_i (PZ(n_i) \cdot t_{ni})}{\sum_i t_{ni}}. \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проектировании РАД в соответствии с принципами системного подхода необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [7, 8]. Поэтому основной особенностью при проектировании РАД является необходимость использования в системе расчетного проектирования комплексной математической модели всей системы

ЭП, а не модели только двигателя, как это делается при проектировании общепромышленных АД [9]. Стандартные методы и программное обеспечение автоматизированного проектирования, разработанные для машин общепромышленного назначения, не могут быть применены для решения задач проектирования и оптимизации регулируемых двигателей. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработан программный продукт DIMASDrive [6], позволяющий осуществить проектирование РАД.

При разработке РАД целесообразно в качестве критериев использовать средндиапазонный критерий КПД двигателя и средндиапазонный критерий PZ электропривода.

Рассматривается работа серийного асинхронного двигателя 4A160S4. Используется схема соединения обмотки статора "звездой". 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 нагрузки используется "лифтовая" нагрузка величиной 75 Н·м. Настройки преобразователя позволяют обеспечить выполнение каждой из трех рассматриваемых проектных задач. В качестве варьируемых параметров выбраны длина пакета статора двигателя (L) и частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя. Изменение частоты (f) предполагает автоматическое изменение числа витков ОС (W_1), сечения эффективного проводника ОС ($q_{эф}$), диаметра обмоточного провода (d_{np}).

Первая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для определенного диапазона регулирования. В рассматриваемом случае выбран диапазон 300 – 1900 об/мин. Диапазоны изменения варьируемых параметров от 0,8 до 1,2 базовых значений.

В табл. 1 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

Таблица 1
Проектные критерии и конструктивные изменения

Показатели и параметры \ Двигатели	Серийный	Оптимизированный по критерию η	Оптимизированный по критерию $PZ_{ЭП}$
η_{cd} АД, %	83,43	85,54	85
PZ_{cd} АД, тыс. у.е.	2,143	2,114	2,101
Масса АД, кг	120	132	127
Стоимость АД, у.е.	651	710	683
Масса РЭП, кг	135	147	142
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,210	2,183
PZ_{cd} РЭП, тыс. у.е.	4,709	4,678	4,664
η_{cd} РЭП, %	81,8	83,86	83,34
L , мм	130	155	145
f , Гц	50	58,54	55,47
W_1	112	96	101
$q_{эф}$, мм ²	2,45	2,87	2,72
d_{np} , мм	1,33	1,43	1,38

Вторая проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (100 с. – 300 об/мин, 100 с. – 1900 об/мин) и решается без учета переходных процессов (рис. 1).

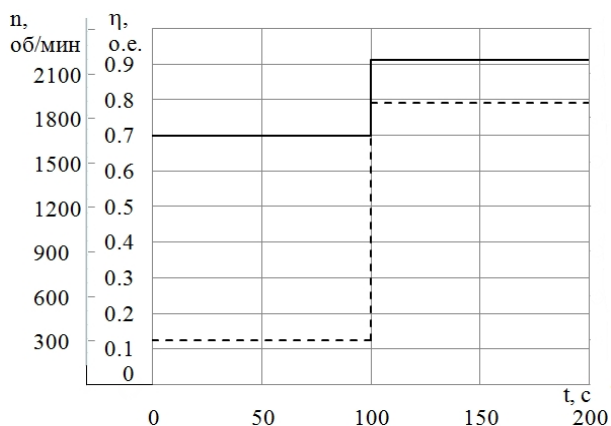


Рис. 1. Характеристики частоты вращения n (пунктирная линия) и КПД (сплошная линия) базового двигателя при второй проектной задаче

В табл. 2 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

Таблица 2

Проектные критерии и конструктивные изменения

Показатели и параметры	Двигатели		
	Серийный	Оптимизированный по критерию η	Оптимизированный по критерию $PZ_{ЭП}$
$\eta_{ср}$ АД, %	75,13	80,5	80,15
$PZ_{ср}$ АД, тыс. у.е.	2,603	2,349	2,304
Масса АД, кг	120	129	121
Стоимость АД, у.е.	651	696	654
Масса РЭП, кг	135	144	136
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,196	2,154
$PZ_{ср}$ РЭП, тыс. у.е.	5,169	4,915	4,864
$\eta_{ср}$ РЭП, %	73,66	78,92	78,58
L , мм	130	150	134
f_s , Гц	50	59,62	59,94
W_1	112	94	93
$q_{эф}$, мм ²	2,45	2,92	2,94
$d_{пр}$, мм	1,33	1,43	1,43

Третья проектная задача предполагает оптимизационное проектирование РАД для работы на заданную тахограмму (1 с. – 300 об/мин, 1 с. – 300 об/мин, 2 с. – 1900 об/мин, 2 с. – 300 об/мин) и решается с учетом переходных процессов (рис. 2). Первая секунда с отображением пуска на рис. 2 не представлена и в расчете энергетических показателей не учитывалась.

В табл. 3 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух выбранных критериев проектирования.

ВЫВОДЫ

1. Результаты оптимизационного проектирования (значения конструктивных изменений) различны в зависимости от выбранного проектного критерия.

2. Экстремумы проектных критериев в зависимости от варьируемых параметров не совпадают.

3. Аналогичным образом можно осуществить оптимизационное проектирование при других критериях и проектных задачах, а также разнообразных варьируемых параметрах.

Таблица 3

Проектные критерии и конструктивные изменения

Показатели и параметры	Двигатели		
	Серийный	Оптимизированный по критерию η	Оптимизированный по критерию $PZ_{ЭП}$
$\eta_{ср}$ АД, %	76,65	80,4	77,78
$PZ_{ср}$ АД, тыс. у.е.	1,173	1,090	1,088
Масса АД, кг	120	121	130
Стоимость АД, у.е.	651	652	702
Масса РЭП, кг	135	136	145
Стоим. РЭП, тыс. у.е.	2,151	2,152	2,202
$PZ_{ср}$ РЭП, тыс. у.е.	3,678	3,594	3,593
$\eta_{ср}$ РЭП, %	75,15	78,62	76,5
L , мм	130	133	153
f_s , Гц	50	59,94	59,51
W_1	112	93	94
$q_{эф}$, мм ²	2,45	2,94	2,92
$d_{пр}$, мм	1,33	1,43	1,43

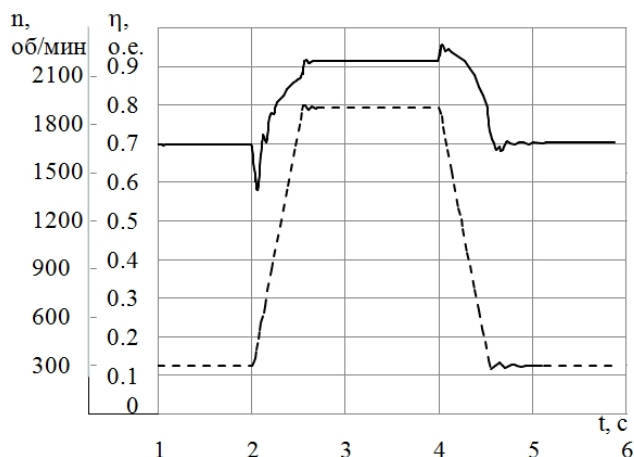


Рис. 2. Характеристики частоты вращения n (пунктирная линия) и КПД (сплошная линия) базового двигателя при третьей проектной задаче

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Проектирование модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей для систем полупроводникового электропривода // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Харьковск. гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 61. – С. 196-197.
- Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вып. 56. – С. 51-54.
- Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303 с.
- Петрушин В.С. Оптимизация обмоточных данных частотно-регулируемых асинхронных двигателей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2002. – Вып. 12. – Том 1. – С. 242-245.

5. Петрушин В.С. Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2001. – Вып.1(13). – С. 81-86.
6. 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). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
7. Schroder P. Elektrische Antriebe. Regelung von Antriebssystemen. Berlin: Springer, 2001, 1172 p.
8. Park T.S., Kim S.H, Yoo J.Y. Speed-sensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm // Trans. KIEE. – 1999. – vol. 48B. – №3. – pp. 139-143.
9. GOST IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

REFERENCES: 1. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. Design modifications asynchronous cage motors for electric semiconductor systems. *Vestnik Khar'kovskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universiteta – Bulletin of Kharkov State Polytechnic University*, 1999, no.61, pp. 196-197. 2. Petrushin V.S. These costs asynchronous motors in the drive frequency for different control laws. *Elektromashinobuduvannja ta elektroobladnanja: Resp. mizhvid. naukovo-tekhnichii zbirnik – Electrical machine-building and electrical equipment: Republican inter-departmental scientific-technical collection*, 2001, no.56, pp. 51-54. 3. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode: Uchebnoe posobie* [Induction motors in adjustable electric: Textbook]. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 320 p. 4. Petrushin V.S. Optimization of winding data of variable frequency induction motors. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2002, no.12, pp. 196-197. 5. Petrushin V.S. Range of optimality criteria for the design of controlled asynchronous motors. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2001, no.1(13), pp. 81-86.

6. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Jakimec A.M. *Programmyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnyh korotkozamknutyh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda* [Program performance analysis, selection and design of asynchronous cage motors controlled drive systems]. Patent UA, no.4065. 7. Schroder P. *Ekekrtrische Antriebe. Regelung von Antriebssystemen* [Electric Actuators. Control of Drive Systems]. Berlin, Springer Publ., 2001, 1172 p. 8. Park T.S., Kim S.H, Yoo J.Y. Speed-sensorless vector control of an induction motor using recursive least square algorithm. *Trans. KIEE*, 1999, vol.48B, no.3, pp. 139-143. 9. GOST IEC/TS 60034-25 Ed. 1.0 Rotating electrical machines Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply.

Поступила (received) 06.07.2014

*Петрушин Виктор Сергеевич¹, д.т.н., проф.,
Еноктаев Ростислав Николаевич¹, магистрант,
¹Одесский национальный политехнический университет,
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +380 048 7058494,
e-mail: victor_petrushin@ukr.net, rostik-enok@inbox.ru*

*V.S. Petrushin¹, R.N. Jenoktajev¹
¹Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine*

Design range criteria in designing of controlled asynchronous motors.

The paper presents automated optimization designing of regulated induction motors accomplished for a variety of design problems under two range criteria. Design tasks involve consideration of both static and dynamic modes. Dependence of change in the motors variable parameters on the criterion chosen and the designing objectives is determined.

Key words – controlled induction motor, design range criteria, automated optimization designing.