

УДК 620.9 + 621.311.1.003

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Бакин, В.С. Гун, Н.Ю. Сидоренко

На базе экспериментальных данных, полученных на установленных режимах, определены необходимые показатели АД и ТПН для изменения существующих настроек с целью экономии электрической энергии. Получены полиномиальные зависимости основных параметров системы автоматического управления АД. Разработана методика оценки эффективного использования электрической энергии в виде коэффициента мощности АД и минимума тока, потребляемого из сети. Приведены экспериментальные и расчетные данные, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, закон пропорционального управления, тиристорный преобразователь напряжения, коэффициент мощности, полиномиальные зависимости.

В современных условиях проблема энергосбережения при работе с АД с переменной нагрузкой становится особенно острой. Известно, что в АД при нагрузке крутящий момент на валу меньше номинального значения, изменяя амплитуду напряжения питания постоянной частоты, можно получить минимум потерь, то есть обеспечить максимум коэффициент мощности двигателя [1–3]. Системы управления электроприводом АД достигли высокой производительности, но в то же время они стали более сложными и дорогостоящими [14]. В большинстве случаев АД работает в двух режимах: близко к номинальному и в режиме малой нагрузки. Целью данной работы является определение параметров недорогой и простой в управлении САРЧ, а также линеаризованной модели АД для определения коэффициентов обратной связи и исследований устойчивости. Подходящей областью применения АД с минимальным энергопотреблением являются механизмы, работающие с переменной нагрузкой, в режиме «холостой ход – номинальная нагрузка». Для решения этой проблемы, в случае двигателей малого и среднего размера, необходимо создать простую в использовании, но точную математическую модель «Пропорциональный регулятор–АД–нагрузка». Математическая модель АД с ТПН для исследования стационарных и переходных процессов основана на полиномиальных зависимостях от экспериментальных параметров стационарных режимов [9, 10]. В качестве примера реализации представлена система второго порядка с обратной связью по частоте вращения и току статора. Практически установлено, что в такой системе с расчетными коэффициентами статического

регулятора скорости и обратных связей стабильность находится в пределах технических требований.

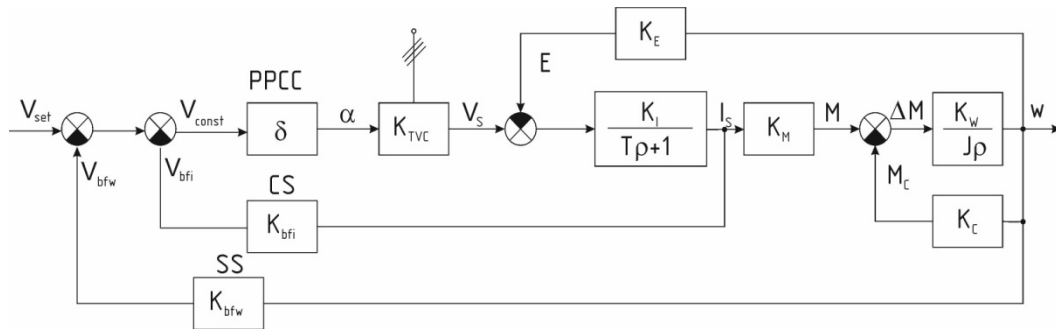


Рис. 1. Структурная схема САРЧ АД, где: ТПН – тиристорный преобразователь напряжения, SS – датчик скорости, CS – датчик тока, РРСС – импульсно-фазовая схема управления.

Используя теорию модального управления, были проведены исследования устойчивости работы замкнутого контура и выбраны параметры: $\delta = 1$, $k_{bfi} = 2$, $k_{bfw} = 1$ [11, 13]. Значение опорного сигнала в соответствии с частотой вращения V_{set} выбиралось в соответствии с экспериментальной характеристикой, исходя из условия: минимального тока холостого хода и малых нагрузок (максимальный коэффициент мощности), при обеспечении стабильной работы АД. При этом управляющий сигнал имеет вид, как : $V_{cs} = V_{set} - V_{bfi} - V_{bfw}$ (рис. 2) .

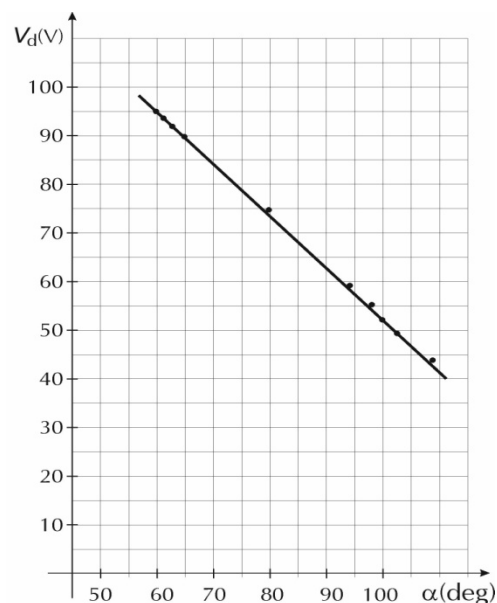


Рис. 2. Зависимость V_d (а), где $V_d = V_s$, построенная по экспериментальным данным

При этом, при определенных допущениях ТПН в пределах рабочих характеристик ($M_{xx} - M_{ном}$) двигателя, в рабочем диапазоне угла регулировки

системы импульсного контроля фаз в пределах $(60 \div 90)^\circ$ напряжение на выходе ТПН как функция от «а» определяются, как $V_d = 160 - 1\,067 \times a$ (см. рис. 2).

Для проверки результатов теоретических исследований по работе САРЧ в соответствии с критериями минимального тока статора и коэффициента максимальной мощности в учебной лаборатории Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) создана экспериментальная установка, включающая ТПН с вертикальный закон управления тиристорами, трехфазный АД типа 4А80В6 ($P_H = 1,1$ кВт, $n_{ном} = 920$ мин⁻¹). Статические характеристики приведены в табл. 1 и на рис. 3 рассматриваются режимы холостого хода и низкой нагрузки для оптимальных настроек. I_s – фазовый ток статора, $\cos\varphi$ – коэффициент мощности, V_s – фазное напряжение статора, n – частота вращения ротора, P_1 – мощность, потребляемая из питающей сети, P_2 – полезная мощность, M – крутящий момент, создаваемый двигателем; a – угол управления тиристором. Работа двигателя при пониженном напряжении стабильна.

Таблица 1

Результаты испытания в режимах холостого хода и низкой нагрузки

M, Nm	n, min ⁻¹	V _s , V	I _s , A	a, grad.	cosφ	P ₁ , W	P ₂ , W
0,15	975	44	0,52	108	0,65	23	15
0,55	970	49,8	0,7	102,5	0,78	71	56
0,75	967,5	51,1	0,8	101,2	0,78	97	76
0,8	965	52,5	0,88	100	0,77	105	81
1,25	960	55,2	1,03	97,5	0,78	161	126
1,41	957,5	56,6	1,13	96,25	0,77	184	142
1,58	955	58	1,18	95	0,77	204	157
1,88	950	58,5	1,3	94,5	0,76	245	187
2,0	947,5	58,8	1,38	94,25	0,75	264	199
2,23	945	59,1	1,45	94	0,74	268	221
2,39	942,5	66,3	1,5	87,5	0,75	315	236
2,55	940	74,5	1,55	80	0,75	293	252
2,83	935	90,3	1,68	65	0,74	331	278
3,18	930	92	1,83	63,33	0,72	428	310
3,53	925	93,6	1,95	61,67	0,72	478	342
3,9	920	95,3	2,1	60	0,70	535	376

В табл. 1 отражены результаты испытания в режимах холостого хода и низкой нагрузки с пониженным напряжением в соответствии с критерием

минимального тока статора (максимальный коэффициент мощности для двигателя 4А80В6).

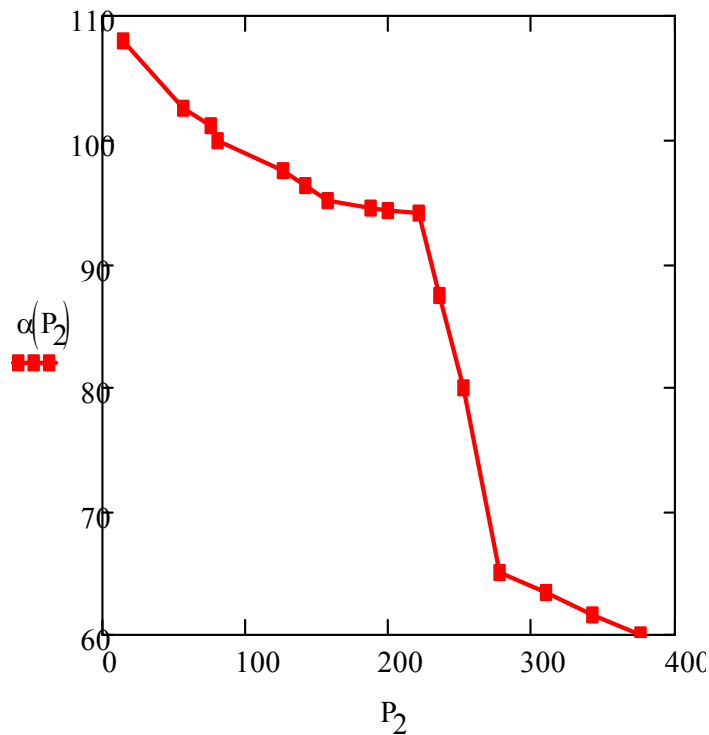


Рис. 3. Угол управления тиристором в зависимости от $\alpha(P_2)$

На рис. 3 показана зависимость угла управления тиристором $\alpha(P_2)$ в режимах холостого хода и низкой нагрузки при пониженном напряжении в соответствии с критерием минимального тока статора (максимальный коэффициент мощности).

Приведенные выше теория и практические рекомендации были апробированы в учебной лаборатории электрических машин ЮУрГУ на двигателе АОК2-51-6-Т2 (220/380В, 16/10А, 4 кВт, 955 мин⁻¹, КПД 82 %, $\cos\varphi_n = 0,78$). В качестве нагрузки использовался двигатель постоянного тока (220В, 4,5кВт, 24,2А, 1000/3000 мин⁻¹), механически подключенный к АД и работающий в режиме электромагнитного тормоза. Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 4, где V_s – напряжение на статор; I_s – ток статора; P_1 – потребляемая активная мощность; Q – реактивная мощность потребления; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; n – частота вращения; P_2 – полезная мощность; S – полная мощность.

Остальные результаты испытаний показаны в табл. 3 и на рис. 5 (двигатель АОК2-51-6-Т2, $P_{ном} = 4$ кВт, $n_{ном} = 955$ мин⁻¹, режим малых нагрузок при условиях минимального тока статора и максимальный коэффициент мощности).

Таблица 2

Испытание АОК2-51-6-Т2: холостой ход

$V_{s,}$ V	$I_{s,}$ A	$P_1,$ kW	$Q,$ KVar	$\cos\varphi$	$n,$ min^{-1}	$P_2,$ W	$S,$ VA
219	2,5	0,32	0,89	0,34	996	3,14	951
200	2,29	0,30	0,74	0,37	995	3,14	795
180	2,17	0,27	0,60	0,40	994	3,13	677
141	1,75	0,22	0,36	0,52	989	3,12	427
121	1,65	0,20	0,27	0,59	985	3,10	345
110	1,63	0,19	0,23	0,61	981	3,09	311
100	1,53	0,19	0,19	0,72	975	3,07	265
91	1,53	0,18	0,16	0,75	969	3,05	240
80	1,55	0,17	0,13	0,79	959	3,02	215
70	1,63	0,17	0,11	0,86	944	2,97	198
60	1,8	0,16	0,09	0,85	919	2,89	188
51	2,13	0,16	0,09	0,85	866	2,70	187

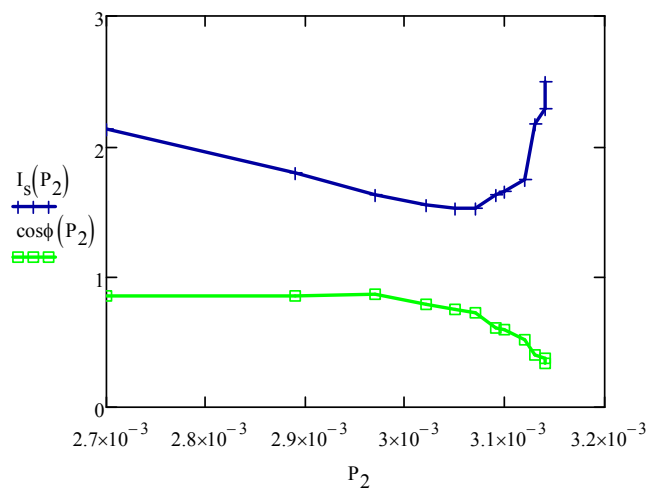


Рис. 4. Статические характеристики холостого хода, I_s , $\cos\varphi$

Таблица 3

Результаты испытаний (двигатель АОК2-51-6-Т2,
 $P_{\text{ном}} = 4 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 955 \text{ мин}^{-1}$)

V_s, V	$I_s,$ A	M, Nm	$n,$ min^{-1}	$Q,$ kVar	P_2, Kw	$\cos\varphi$
95,3	1,54	0,01	970	0,175	0,196	0,77
94,7	1,80	0,11	973	0,18	0,24	0,813
94,3	1,92	2,0	955	0,18	0,26	0,83
93,6	2,21	3,32	942	0,19	0,30	0,84
93,0	2,42	4,22	931	0,20	0,34	0,87
92,5	2,82	6,06	914	0,21	0,39	0,86
92,0	2,95	8,17	906	0,22	0,41	0,87

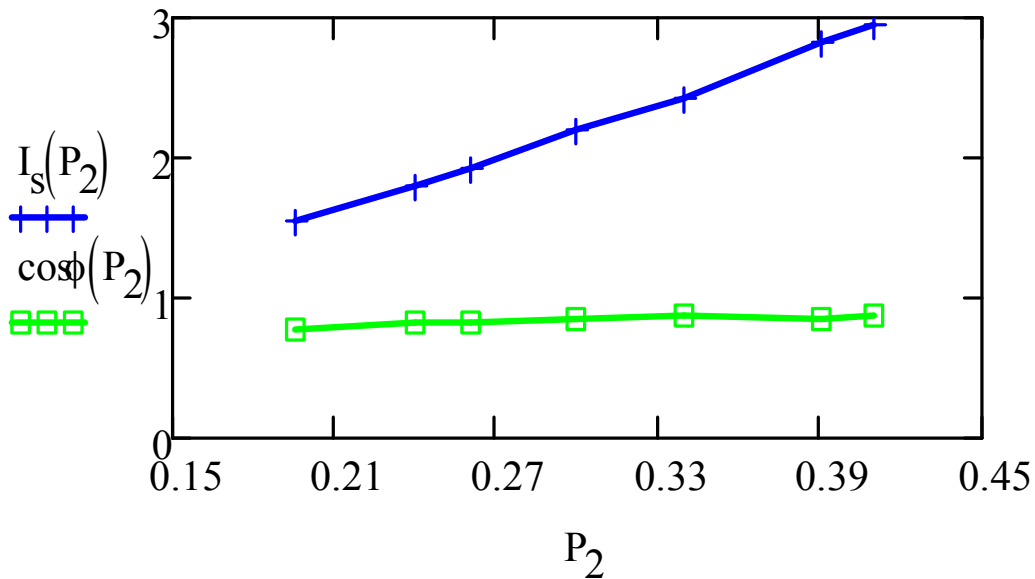


Рис. 5. Статические характеристики, режим малых нагрузок при выполнении условий минимального тока статора и максимального коэффициента мощности для I_s , $\cos\phi$

В таблице величины (см. табл. 3): V_s – экспериментально подобранное напряжение; I_s – ток статора; M – крутящий момент; n – частота вращения; Q – реактивная мощность потребления; P_2 – полезная мощность; $\cos\phi$ – коэффициент мощности. Испытание АОК2-51-6-Т2: $P_{\text{ном}} = 4$ кВт, $n_{\text{ном}} = 955 \text{ мин}^{-1}$, режим малых нагрузок, когда выполняются условия минимального тока статора и максимального коэффициента мощности.

Из графиков видно, что при минимальном значении тока статора, при сохраняемой мощности, коэффициент мощности изменяется в небольших пределах и, примерно, равен $\cos\phi_n$. Оптимизированный ток статора линейно зависит от эффективной мощности. Для определения коэффициентов полиномов, аппроксимирующих данный массив исходных точек, аппроксимирующая программа была написана на языке ФОРТРАН. Приемлемая точность полиномиального описания заданных массивов входных данных была достигнута путем проверки результатов расчетов в контрольных точках [11, 15]. Полиномиальная зависимость второй степени для крутящего момента M от скорости вращения вала двигателя n , напряжения источника питания тиристора V_s , тока, потребляемого от источника питания I_s , угла a управления МФКС:

$$M(n, V_s, I_s, a) = 55,719n - 322,205V_s + 1040,842I_s - 376,986a - 0,008n \times V_s - 1,435n \times I_s + 0,010n \times a + 1,965V_s \times I_s + 2,229V_s \times a + 2,694I_s \times a - 0,029n \times n + 0,999V_s \times V_s - 16,147I_s \times I_s + 1,241a \times a.$$

Для решения прямых и обратных задач управления были определены параметры линейных зависимостей [16]:

$$M(n, V_s, I_s, a) = -0,0161n + 0,0964V_s + 1,6638I_s + 0,0988a.$$

Полиномиальная зависимость коэффициента мощности от тех же параметров будет записана как:

$$\begin{aligned} \cos\varphi(n, V_s, I_s, a) = & 20,479n - 119,793V_s + 431,381I_s - 137,940a + 0,012n \times V_s - \\ & - 0,638n \times I_s + 0,019n \times a + 1,122V_s \times I_s + 0,727V_s \times a + 1,401I_s \times a - 0,012n \times a + \\ & + 0,329V_s \times V_s - 8,571I_s \times I_s + 0,401a \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение принимает вид:

$$\cos\varphi(n, V_s, I_s, a) = 0,011n - 0,061V_s + 0,385I_s - 0,065a.$$

Напряжение на обмотке статора при стабильной работе двигателя и с минимальным током статора и оптимальным коэффициентом мощности будет записано как:

$$\begin{aligned} V_s(n, M, I_s, a) = & 0,704n + 3278,201M - 7056,682I_s + 29,971a - 0,001n \times n - \\ & - 68,340M \times M - 106,666I_s \times I_s - 0,0003a \times a - 3,417n \times M + 7,344n \times I_s - 0,032n \times a + \\ & + 197,015M \times I_s - 0,355M \times a - 0,174I_s \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение принимает вид:

$$V_s(n, M, I_s, a) = 0,163n + 1,9622M + 1,1727I_s - 1,0749a.$$

Ток, потребляемый от сети электропитания для оптимального коэффициента мощности, будет записан как:

$$\begin{aligned} I_s(n, M, V_s, a) = & - 30,681n - 435,947M + 181,552V_s + 205,114a + \\ & + 0,016n \times n + 3,267M \times M - 0,554V_s \times V_s - 0,6561a \times a + 0,465n \times M - \\ & - 0,0030n \times V_s - 0,011n \times a - 0,042M \times V_s - 0,163M \times a - 1,206V_s \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение принимает вид:

$$I_s(n, M, V_s, a) = - 0,0021n + 0,4147M + 0,0144V_s + 0,0177a.$$

Заключение

1. Создана экспериментальная установка в электротехнической лаборатории ЮУрГУ и реализован практический вариант субоптимальной системы управления АД по критерию минимального тока (максимального коэффициента мощности)

2. Разработана практическая версия и математическая модель субоптимальной системы управления АД.

3. Влияния регулировочной характеристики на основные параметры АД описывается полиномами второй и первой степеней.

В результате исследования электромеханических характеристик АД, было установлено, что каждой точке оптимальной регулировочной характеристики соответствуют минимальные значения тока статора и максимум коэффициента мощности при постоянных моментах нагрузки в диапазоне от номинального до холостого хода. Следовательно, линеаризованная характеристика оптимального управления позволяет использовать стандартный ТПН в качестве статического регулятора.

Библиографический список

1. Бакин, А.А. Дискретная субоптимальная система управления асинхронным двигателем по критерию минимума тока статора: дисс. ... канд. техн. наук / А.А. Бакин. – Челябинск, 1996.
2. Gladyshev, S.P. The dynamic of the control loops of the alternating voltage thiristor converter / S.P. Gladyshev, A.A. Bakin, P.S. Gladyshev // Int. Conf. – The dynamic of the non-lenear systems. – Dublin, Ireland: The Trinity College, 1995.
3. «Line Voltage Control of Induction Motor for Increase Its Efficiency in Stable Area» / S. Gladyshev, N. Gladychew, V. Goun, A. Bakin // SAE Technical Paper 2018-01-1830. – 2018. DOI:10.4271/2018-01-1830.
4. Mohan, N. Electric Drives an Integrative Approach / N. Mohan. – Minneapolis: MNPERE.
5. Hubert, C. Electric Machines. Theory, Operation, Applications, Adjustment, and Control Second Edition / C. Hubert. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002).
6. Mohan, N. Advanced Electric Drives. Analysis, Control and Modeling Using Simulink / N. Mohan. – Minneapolis: MNPERE, 2001.
7. Matsch, L. Electromagnetic and Electromechanical Machines / L. Matsch, J. Morgan. – New York: Harper and Row, 1986.
8. Sen, P. Principles of Electric Machines and Power Electronics Third Edition / P. Sen. – Wiley, 2014.
9. Попов, Е.П. Теория нелинейных систем автоматического управления / Е.П. Попов. – М.: Наука, 1988. – 256 с.
10. Гладышев, С.П. Анализ и синтез динамических свойств токовой петли асинхронного двигателя с использованием дифференциальных уравнений / С.П. Гладышев, В.В. Чугаев, А.А. Бакин // Тез. отчет МНТК по преобразовательной технике. Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1994.
11. Макаров, Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD: учебный курс / Е.Г. Макаров. – СПб.: Изд-во «Питер», 2005. – 448с.
12. Копылов, И. Математическое моделирование электрических машин / И. Копылов. – М.: Высшая школа, 1987. – 396 с.
13. Hambley, A. Electrical Engineering. Principles and Applications / A. Hambley. – Pearson Education, Inc., 2014.
14. Виноградов, А.Б. Векторный контроль приводов И. / А.Б. Виноградов. – М.; Иваново: Ивановский гос. Энергетический ун-т, 2008. – 319 с.
15. Марков, В.А. Улучшение экономических и экологических показателей транспортных дизельных двигателей за счет управления процессом подачи топлива: дисс. ... д-ра техн. наук / В.А. Марков. – М., 1995.
16. Гун, В.С. Улучшение динамики и экологических характеристик переходных процессов дизельного двигателя с электронным управлением подачи топлива: дисс. ... канд. техн. наук / В.С. Гун. – Челябинск, 2009.

[К содержанию](#)