

УДК 624.04 + 62-056.52/.53 + 693.9

ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АМПЛИТУДНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.А. Бакин, В.С. Гун, Н.Ю. Сидоренко

В статье рассматривается замкнутая система регулирования частоты вращения асинхронного двигателя (АД), пропорционального регулятора и тиристорного преобразователя напряжения (ТПН). Разработана математическая модель регулирования частоты вращения АД, позволяющая снизить потери мощности в установившихся режимах и при допустимых параметрах переходных процессов для режимов холостого хода и малых нагрузок. Математическая модель АД с ТПН описывается в виде полиномиальных зависимостей от режимных параметров. Модель базируется на экспериментальных данных АД различной мощности. Разработана методика оценки эффективного использования электрической энергии в виде коэффициента мощности АД. Определен оптимизированный вариант формы регулировочной характеристики по критерию минимума затрат электрической энергии. Приведены экспериментальные и расчетные данные, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, пропорциональный закон регулирования, тиристорный преобразователь напряжения, коэффициент мощности, полиномиальные зависимости.

Известно, что в АД при моментах нагрузки на валу меньше номинального значения, за счет изменения амплитуды питающего напряжения постоянной частоты, можно получить минимум потерь, то есть обеспечить максимум коэффициента мощности двигателя [1].

Математическая модель АД с ТПН для исследования установившихся и переходных процессов создана на основании полиномиальных зависимостей от режимных параметров. Модель базируется на экспериментальных данных АД различной мощности. В качестве примера реализации такой системы приводится система второго порядка с обратными связями по частоте вращения и току статора. Практически было установлено, что в такой системе при рассчитанных коэффициентах статического регулятора частоты вращения и обратных связей устойчивость находится в пределах инженерных требований.

Для регулирования напряжения постоянной частоты находят применение ТПН. При исследовании пропорциональных систем управления с заранее заданной регулировочной характеристикой, то есть со стандартным

пропорциональным регулятором напряжения, основной задачей является определение функций сигнала задания, передаточной функции ТПН и рабочих параметров АД.

Следует заметить, что характерными переходными процессами являются процессы мгновенного наброса и сброса нагрузки. Они отличаются незначительными отклонениями (8–10 %) значений частоты вращения АД от ее значений на установившемся режиме. Хороший результат дает описание характеристик элементов САРЧ полиномиальными зависимостями на основании экспериментальных данных [2, 3, 4, 12].

Предварительный эксперимент, проведенный в учебной лаборатории, позволил построить и проанализировать статические характеристики двигателя 4А80В6 в режимах холостого хода и малых нагрузок. Статические характеристики приведены в табл. 1: рассмотрены режимы холостого хода и малых нагрузок для оптимальных параметров настройки I_s – фазный ток статора – минимальный, φ – коэффициент мощности – максимальный, U_s – фазное напряжение статора, n – частота вращения ротора, P_1 – мощность, потребляемая из сети, P_2 – полезная мощность, M – момент, развиваемый двигателем. Работа двигателя при пониженном напряжении – устойчива.

Таблица 1

Испытание 4А80В6: $P_{ном}=1,1$ кВт, $n_{ном}=920$ мин-1,
режимы холостого хода и малых нагрузок
при пониженном напряжении по критерию минимума тока статора
(максимального коэффициента мощности)

M, нМ	n, min-1	U _s , V	I _s , A	a, grad.	cosφ	P ₁ , kW	P ₂ , kW
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	198
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	219
2,83	935	90,3	1,68	65	0,74	331	245
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

По результатам испытаний при известных допущениях ТПН в пределах рабочих характеристик (M_{xx} – $M_{ном}$) АД был определен рабочий диапазон угла регулирования СИФУ, лежащий в пределах 60–90 градусов. Напряжение на выходе ТПН в зависимости от α , определяется как:

$$U_d = 160 - 1,067\alpha.$$

Зависимость $U_d(\alpha)$, (где $U_d = U_s$) построенная по экспериментальным данным, представлена на рис. 1.

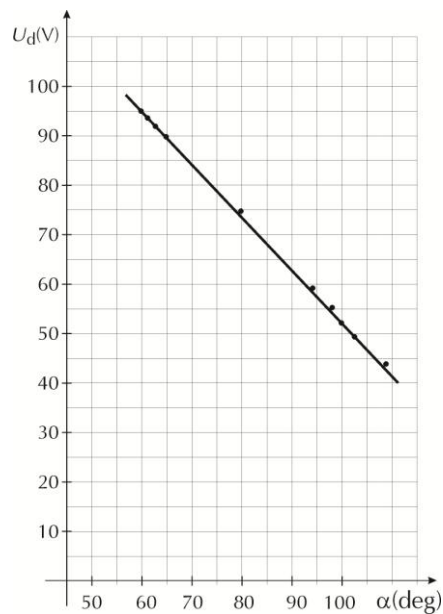


Рис. 1. Напряжение на выходе ТПН в зависимости от угла регулирования СИФУ (α)

Функциональные зависимости экспериментальных данных исследуемого двигателя были описаны полиномиальными зависимостями второго порядка. Для определения функции сигнала задания $U_{set}(n)$ и критерия качества – коэффициента мощности, были построены линейные зависимости. Для определения коэффициентов полиномов, аппроксимирующих заданный массив исходных точек, была написана программа аппроксимации на языке FORTRAN. Приемлемая точность описания полиномами заданных массивов исходных данных достигалась проверкой результатов вычислений в контрольных точках. Полиномиальная зависимость второй степени для крутящего момента M от частоты вращения вала двигателя n , напряжения тиристорного источника питания U_s , тока, потребляемого от источника питания I_s , угла регулирования СИФУ (α):

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

Линейная зависимость:

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

Полиномиальная зависимость коэффициента мощности от тех же параметров запишется как:

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

Линейное приближение примет вид:

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

Напряжение на обмотке статора при устойчивой работе двигателя и при минимальном токе статора и оптимальном коэффициенте мощности запишется как:

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

Линейное приближение имеет вид:

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

Ток, потребляемый из сети для оптимального коэффициента мощности, запишется как:

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

Линейное приближение будет иметь вид:

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

Момент сопротивления потребителя описывался выражением:

$$M_c = k_c \times n,$$

где k_c – коэффициент пропорциональности настройки потребителя.

Оценка влияния пониженного напряжения на динамические показатели АД проведена с использованием разработанной математической модели САРЧ АД.

Предлагаемый критерий качества – коэффициент мощности – также записывается в виде полинома второго порядка в зависимости от параметров двигателя и нагрузки.

Датчики режимных параметров описываются алгебраическими уравнениями:

$$U_{b_{fw}} = k_{b_{fw}} \times w, U_{b_{fi}} = k_{b_{fi}} \times I_s \text{ без учета дискретности в съеме сигнала [1].}$$

Роль статического регулятора частоты вращения выполняет СИФУ с коэффициентом передачи δ (тангенс угла наклона пилообразного сигнала), численно равным обратной величине коэффициента усиления.

Величины δ , k_{bfi} , k_{bfi} выбираются по результатам анализа и синтеза, исходя из обеспечения заданных динамических свойств контура [6, 7, 8, 9].

Структурная схема, удовлетворительно описывающая переходные процессы в АД при питании его от ТПН, представлена на рис. 2, где TCV – тиристорный преобразователь, SS – датчик частоты вращения, CS – датчик тока, AFCS – схема импульсно-фазового управления.

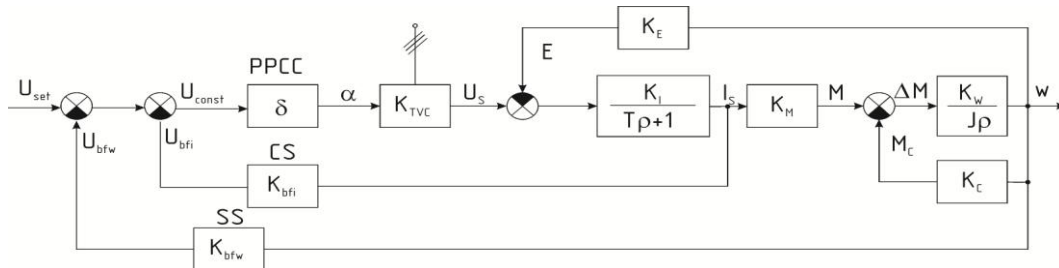


Рис. 2. Структурная схема САРЧ АД

Дифференциальные уравнения, описывающие контур управления частотой вращения АД в переходном процессе ($M_{xx} - M_{ном}$; $M_{ном} - M_{xx}$) примут вид:

$$(L1/R1) \times p J_s = (U_{set} - k_{bfi} \times J_s - k_{bfi} \times w - k_e \times w) / R1,$$

$$p \times w / J_s = M - M_c,$$

где $L1$ – полная индуктивность обмотки статора; $R1$ – активное сопротивление обмотки статора; U_{set} – сигнал задания по частоте вращения; k_e – коэффициент, учитывающий внутреннюю паразитическую обратную связь по частоте вращения; J_s – суммарный момент инерции АД и нагрузки. Поскольку система является системой второго порядка, то для обеспечения устойчивости вводятся две обратные связи: по току и частоте вращения: k_{bfi} и k_{bfi} – коэффициенты обратных связей по току и частоте вращения соответственно.

Используя теорию модального управления, были проведены исследования на устойчивость работы замкнутого контура и выбраны параметры $\delta = 1$, $k_{bfi} = 2$, $k_{bfi} = 1$ [11]. Задача САРЧ – оптимальное функционирование управляемой системы при наличии внешней нагрузки, как правило, случайной. Значения параметров АД и ТПН, входящих в правые части уравнений, в соответствии с рекомендациями работ [2, 3, 4], определялись в виде вышеприведенных функциональных зависимостей. Величина сигнала задания по частоте вращения U_{set} выбирается по экспериментальной характеристике, исходя из условия минимума тока холостого хода и малых нагрузок (максимум коэффициента мощности) при сохранении устойчивой работы АД. Тогда сигнал управления будет иметь вид:

$$U_{cs} = U_{set} - U_{bfi} - U_{bfi}.$$

Сигнал управления U_{cs} сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом (см. рис. 3).

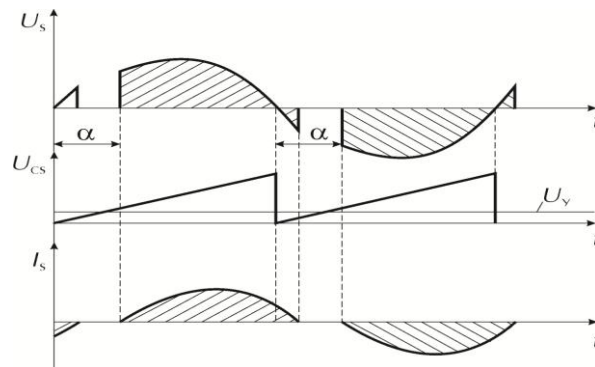


Рис. 3. Временные диаграммы работы разомкнутого контура

Для проверки результатов теоретических исследований работы САРЧ в соответствии с критериям минимального тока статора и максимума коэффициента мощности в учебной лаборатории Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) была создана экспериментальная установка, включающая ТПН с вертикальным законом управления тиристорами, трехфазный АД типа 4А80В6 ($P_{ном}=1,1$ кВт, $n_{ном} = 920$ мин⁻¹). АД питается переменным напряжением 127В и при номинальной частоте вращения потребляет ток $I_n = 2,1$ А, который в дальнейших рассуждениях условно будет считаться номинальным.

В качестве нагрузки использован двигатель постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением типа 2ПН100МГУХЛ4 ($P_n = 0,75$ кВт, $I_n = 8,7$ А). Вал ДПТ механически соединен с валом АД.

Датчиком частоты вращения служит тахогенератор типа ТС-1МУХЛ4, закрепленный на валу ДПТ. Датчиками тока являются трансформаторы тока типа УТТ-5М ($I_{1н} = 15$ А, $I_{2н} = 5$ А).

Проводился анализ динамических свойств рассматриваемых контуров регулирования, используя метод корневого годографа. Согласно теории модального управления [11], определенная неустойчивость обусловлена структурой самого контура. Для устранения этой неустойчивости необходимо ввести дополнительные обратные связи: отрицательная обратная связь по току статора. Сигнал управления сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом.

Практически реализована субоптимальная система управления АД по критериям минимума тока статора и максимума коэффициента мощности.

Изложенная выше теория и практические рекомендации были проверены в учебной лаборатории электрических машин ЮУрГУ на двигателе АОК2-51-6-Т2 (параметры: 220/380 В, 16/10 А, 4 кВт, 955 мин⁻¹, КПД = 82 %, $\cos\phi = 0,78$). В качестве нагрузки был использован ДПТ типа

2ПН160МУХЛ4 (параметры: 220В, 4,5кВт, 24,2А, 1000/3000 мин⁻¹), механически соединенный с АД и работающий в режиме электромагнитного тормоза.

Питание АД осуществлялось с помощью напольного индукционного регулятора напряжения типа ИР 59/22-У3 (параметры: 160 кВА, 380В, пределы регулирования напряжения 0–380 В, ток сети 310А, ток нагрузки 245А).

Результаты проведенных испытаний помещены в табл. 2: (испытание АОК2-51-6-Т2: P_{ном}=4кВт, n_{ном} = 955 мин⁻¹, режим холостого хода) и 3 (испытание АОК2-51-6-Т2: P_{ном} = 4 кВт, n_{ном} = 955мин⁻¹, режим малых нагрузок при выполнении условий минимума тока статора и максимума коэффициента мощности).

Таблица 2

Испытание АОК2-51-6-Т2: P_{ном}=4 кВт,
n_{ном} = 955 мин⁻¹, режим холостого хода

Us, V	Is, A	P1, kW	Q, kVAr	cosφ	n, min ⁻¹	P _{мес} , kW	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

Таблица 3

Испытание АОК2-51-6-Т2: P_{ном} = 4 кВт,
n_{ном} = 955мин⁻¹, режим малых нагрузок

Us, V	Is, A	M, nm	n, min ⁻¹	Q, kVAr	P _{мес} , kW	cosφ
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

Выводы

1. Был разработан практический вариант и математическая модель субоптимальной системы управления АД по критериям минимума тока статора и максимума коэффициента мощности, работающая при постоянном сигнале задания по частоте вращения со статическим регулятором.
2. Оценка влияния регулировочной характеристики на основные показатели АД описана полиномами второй степени.
3. В результате исследования характера электромеханических характеристик (зависимость $I_s - n$) работы АД, управляемого от ТПН или ИР, было выявлено, что каждой точке оптимальной кривой, соответствующей минимальным значениям тока статора и максимума коэффициента мощности, при постоянных моментах нагрузки, соответствует частота вращения в пределах от номинальной до холостого хода. Следовательно, линеаризованная оптимальная регулировочная характеристика 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: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Бакин. – Челябинск, 1996.
2. Марков, В.А. Улучшение экономических и экологических показателей транспортных дизелей путем управления процессом топливоподачи: дис. ... д-р техн. наук / В.А. Марков. – М., 1995.
3. Попов, Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Е.П. Попов. – М.: Наука, 1988. – 256 с.
4. Макаров, Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD: Учебный курс / Е.Г. Макаров. – СПб.: Изд-во «Питер», 2005. – 448 с.
5. Ключев, В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
6. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1994. – 265 с.
7. Гладышев, С.П. Анализ и синтез динамических свойств контура тока асинхронного двигателя с помощью разностных уравнений / С.П. Гладышев, В.В. Чугаев, А.А. Бакин // Тез. докл. Международной научно-технической конференции по преобразовательной технике. Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1994.
8. Гладышев, С.П. Цифровое моделирование тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя / С.П. Гладышев, А.А. Бакин, П.С. Гладышев. – М., 1994. – Рукопись деп. в Информприбор, № 5163 – А.
9. Гладышев, С.П. Уменьшение тока холостого хода асинхронного двигателя с помощью тиристорного коммутатора / С.П. Гладышев, А.А. Бакин, П.С. Гладышев. – М.: 1994 – Рукопись деп. в Информприбор, № 5176 – В.

10. Гладышев, С.П. Исследование устойчивости тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя на цифровой модели / С.П. Гладышев, А.А. Бакин, П.С. Гладышев. – М.: 1994 – Рукопись деп. в Информэлектро, № 45 – эт 94.

11. 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. The Trinity College, Dublin, Ireland, 1995.

12. Гун, В.С. Улучшение динамики и экологических показателей переходных процессов дизеля с электронным управлением подачи топлива: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Гун. – Челябинск, 2009.

[К содержанию](#)