

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУБОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА

А.А. Бакин, В.С. Гун, Н.Ю. Сидоренко

В статье представлены результаты экспериментальных исследований дискретной субоптимальной системы управления асинхронным двигателем (АД) по критерию минимума тока статора. Субоптимальная система управления АД была исследована в двух вариантах: со статическим и астатическим регуляторами. Исследования показали, что при нагрузке $M_c=0,8M_n$ ток статора АД уменьшился на 5 %, при $M_c=0,6M_n$ ток на 10 % меньше, при $M_c=0,4M_n$ – на 18 % меньше, при $M_c=0,2M_n$ – на 36 % меньше, на холостом ходу – на 57 % меньше. Была получена оптимальная кривая минимума тока статора при работе двигателя на холостом ходу и режиме малых нагрузок. Испытания проводились на лабораторной установке, включающей в себя тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) с вертикальным законом управления и трехфазный АД типа 4А80В6. Были проведены контрольные испытания для АД типа АОК2-51-6-Т2.

Ключевые слова: субоптимальная система управления, критерий минимума тока статора, асинхронный двигатель, статический и астатический регулятор.

Современные машины переменного тока стали наиболее популярны благодаря относительно простой конструкции и высокой надежности в работе. Известно, что за счет уменьшения амплитуды питающего напряжения постоянной частоты можно получить минимум потерь, т.е. обеспечить энергосберегающий режим работы и уменьшить нагрев двигателя. Основной задачей этой работы является экспериментальное исследование субоптимальной системы управления (СУ) АД по критерию минимума тока статора и дать практические рекомендации для настройки регулятора частоты вращения. Известно, что запас мощности зависит от напряжения питающей сети, амплитуда магнитного потока зависит от напряжения на обмотках статора, момент на валу пропорционален квадрату напряжения статора. Поток является величиной постоянной.

Следовательно, без ущерба для работы на холостом ходу (ХХ) и в режиме малых нагрузок можно понизить напряжение на обмотках статора от

0,4 U_n для режима ХХ до 0,7 U_n для режима половинной загрузки с уменьшением тока статора. В субоптимальной СУ АД как основном элементе для снижения тока ХХ с сохранением частоты питающей сети предлагается использовать тиристорный преобразователь переменного напряжения (ТПН). В рассматриваемой системе ТПН-АД в качестве ТПН представлен тиристорный усилитель со встречно-параллельным соединением вентилей, соединенный со статорными обмотками АД. Предполагается, что вентилями являются однооперационные тиристоры, у которых можно управлять лишь включением. В результате предварительного исследования характера электромеханических характеристик (зависимость «ток–частота вращения») работы АД, управляемого от ТПН, было выявлено, что каждая точка оптимальной кривой соответствует конкретной частоте вращения. Отсюда был сделан вывод о применимости для аппроксимации оптимальной кривой статической регулировочной характеристикой. Был разработан практически вариант субоптимальной СУ АД (рис. 1) с обратной связью по частоте вращения, где ТП – тиристорный преобразователь; ДЧ – датчик частоты вращения; СИФУ – схема импульсно-фазового управления. В СИФУ используется вертикальный закон регулирования углом отпирания тиристоров. Сигнал управления U_{yw} сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом; U_{ocw} – сигнал обратной связи по частоте вращения; U_{zw} – сигнал задания по частоте вращения [1, 3].

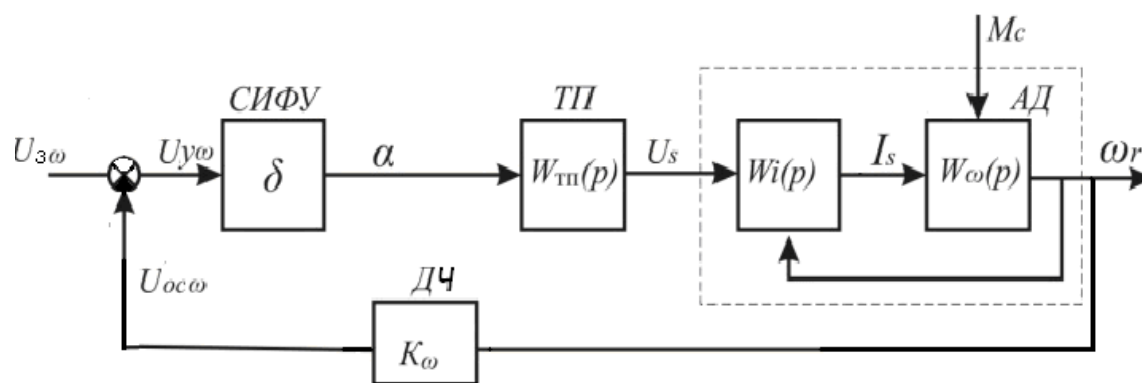


Рис. 1. Вариант субоптимальной системы управления АД

Коэффициент передачи СИФУ – величина δ – тангенс угла наклона пилообразного сигнала СИФУ, численно равная обратной величине коэффициента усиления контура. Величины δ и k_w выбираются по результатам анализа и синтеза, исходя из обеспечения заданных динамических свойств контура. Величина выходного напряжения ТПН определяется углом регулирования α , поступающим от СИФУ. При выборе углов регулирования тиристорами заложены ограничения: максимальный угол отсечки выбирается в соответствии с паспортными данными; минимальный угол выбирается с учетом ограничения величины управляющего сигнала, поступающе-

го в СИФУ на величину, равную величине угла запаздывания тока статора относительно питающего напряжения. При проведении эксперимента минимальный угол был выставлен равным 60 градусам.

С использованием цифровой модели [1,3] рассчитаны электромеханические характеристики: нерегулируемого АД от режима холостого хода до номинального; электромеханическая характеристика работы АД в режиме холостого хода при изменении сигнала задания по частоте вращения от максимального значения, соответствующего точке А до значения, соответствующего точке Г (см. кривая 2 рис. 2). Величина момента сопротивления на холостом ходу принята равной $M_{хх}=0,05M_n=0,37$ (Нм). Точка В соответствует режиму работы АД с минимальным потреблением тока на холостом ходу.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что величина тока холостого хода существенно снижается и в приведённом примере для режима работы в точке В (см. рис. 2) составляет 38 % от величины тока холостого хода нерегулируемого АД (см. точка А, рис. 2). Проверка на модели показала, что с увеличением мощности АД это процентное соотношение изменяется в сторону уменьшения. Так, например, определено, что для двигателя 4А132М4 ($P_n=11$ кВт) оно составляет 34 %.

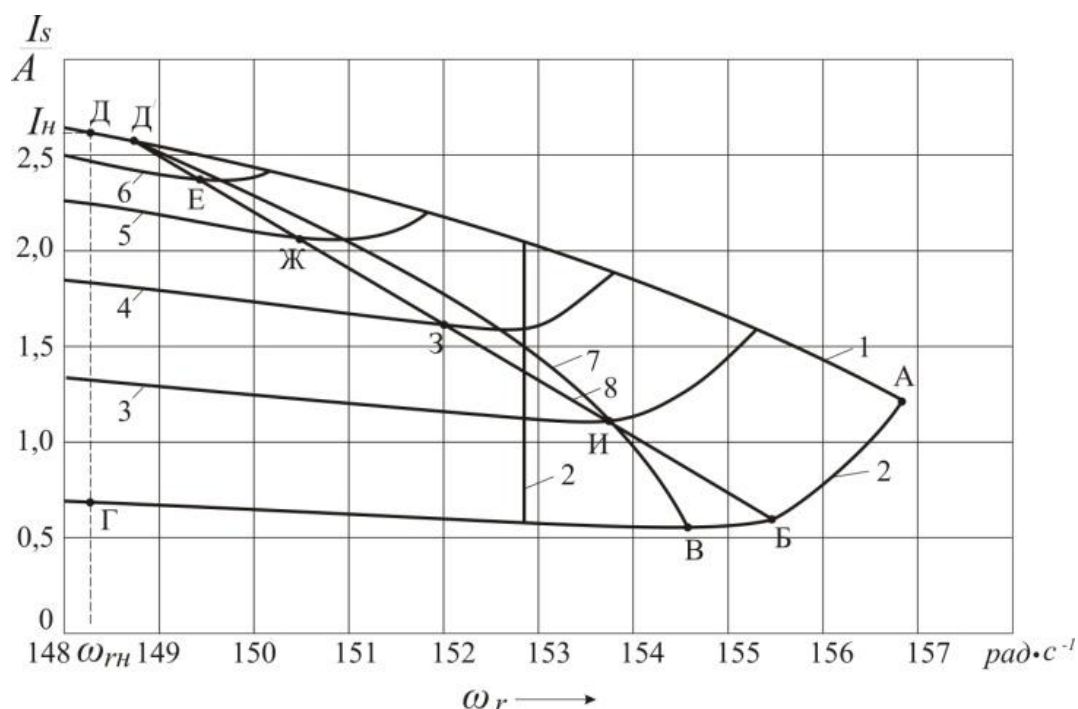


Рис. 2. Электромеханические характеристики работы СУ «ТПН-АД»

Получены электромеханические характеристики АД для режимов работы с постоянной нагрузкой при изменении величины проводимого к двигателю напряжения: кривая 3 – $M_c=0,2M_n$; кривая 4 – $M_c=0,4M_n$; кривая 5 – $M_c=0,6M_n$; кривая 6 – $M_c=0,8M_n$.

Анализируя полученные кривые, можно отметить, что в каждой из них наблюдается минимум, соответствующий минимальной величине тока статора. Через токи с минимальным потреблением тока статора проведена кривая 7, которую будем считать оптимальной кривой. Линия под номером 2' прямая, соответствующая согласно [2, 4] частоте вращения, при которой обеспечивается минимум тока статора. Ввиду того, что частоты вращения, соответствующие минимумам потребления тока статора для фиксированных значений моментов нагрузки АД, превышают номинальную частоту вращения, то для аппроксимации кривой 7 предлагается прямая, которая может быть реализована с помощью статического регулятора частоты вращения. При этом работа контура осуществляется при выбранном, фиксированном значении сигнала задания по частоте вращения U_{zw} . Выбор величин сигнала задания и диапазона регулирования частоты вращения D осуществляется исходя из выполнения условия, при котором электромеханическая характеристика работы контура была максимально приближена к оптимальной кривой 7 (см. рис. 2).

На рис. 2 прямой 8 показан вид рекомендуемой электромеханической характеристики субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора. Это может быть и другая характеристика, определяемая в зависимости от условий работы нагрузочного механизма АД.

Так, например, если АД работает в режиме работы с номинальной нагрузкой, то целесообразно выбрать вид электромеханической характеристики, определяемый отрезком (B–D). Рекомендуемая электромеханическая характеристика работы субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора (прямая 8) в сравнении с прямой 2' точнее аппроксимирует оптимальную кривую 7 и позволяет добиться снижения тока при моментах нагрузки, лежащих в пределах $0...0,8M_n$.

СУ работает при постоянном сигнале задания по частоте вращения со статическим регулятором. Сигнал задания по частоте вращения выбирается, исходя из условия обеспечения минимума (или близкого к минимуму) тока статора АД на холостом ходу и на малых нагрузках.

Статический регулятор частоты вращения обеспечивает при моментах нагрузки, меньших номинального, работу АД на регулировочной характеристике B–D (см. рис. 2), аппроксимирующей кривую оптимального по минимуму тока статора, а при нагрузке, близкой к номинальной (чуть меньше её), – выход АД в режим работы на естественной характеристике.

Для ограничения пусковых токов в рассматриваемой субоптимальной системе управления АД предусмотрен контур регулирования тока, в котором ДТ – датчик тока; сигнал управления I_u сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом; I_{oc} – сигнал обратной связи по току; I_z – сигнал задания по току (рис. 3).

Лабораторная установка включает в себя ТПН с вертикальным законом управления тиристорами, трехфазный АД типа 4А80В6 ($P_{ном}=1,1$ кВт,

$I_{ном}=2,1$ А). АД питается переменным напряжением 127 В. В качестве нагрузки использован двигатель постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением ($R_{ном}=0,75$ кВт). Датчиком частоты вращения служит тахогенератор, закрепленный на валу ДПТ.

Датчиками тока являются трансформаторы тока. На разработанной лабораторной установке был проведен ряд экспериментов по заданной теоретическими исследованиями программе.

Получены электромеханические характеристики (см. рис. 4), соответствующие: 1 – естественная; 2 – на ХХ без ДПТ на валу АД; 3 – на ХХ с ДПТ на валу; 4 – $M_c=0,2$ Мн; 5 – $M_c=0,4$ Мн; 6 – $M_c=0,6$ Мн; 7 – $M_c=0,8$ Мн.

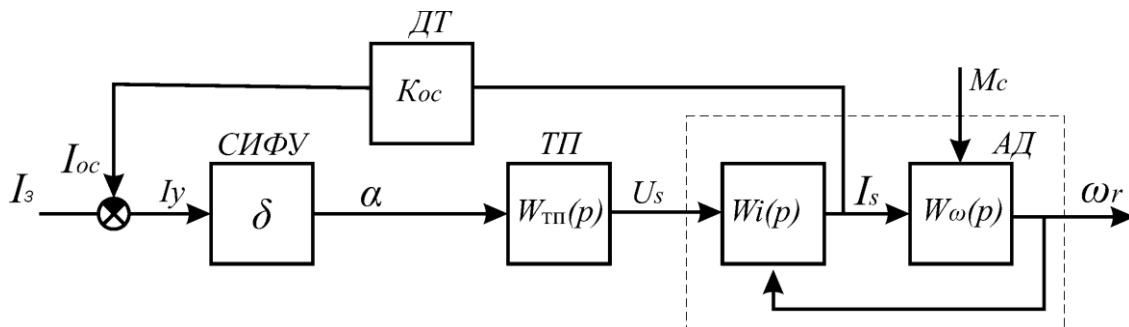


Рис. 3. Контур регулирования тока АД

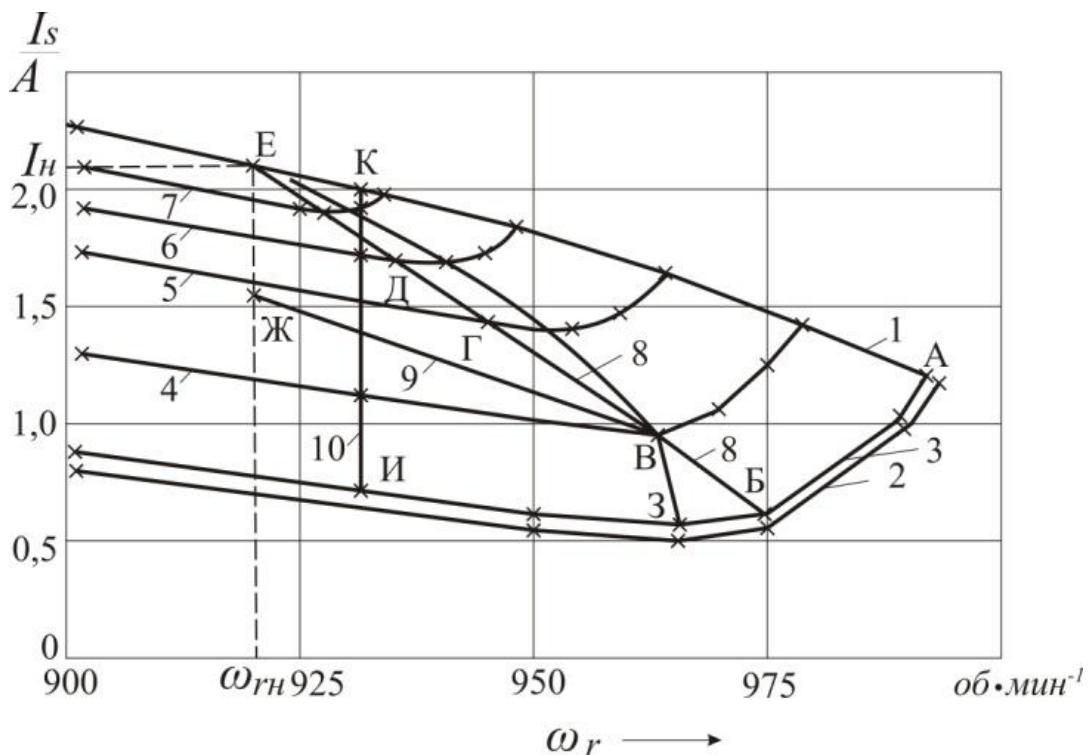


Рис. 4. Экспериментальные электромеханические характеристики АД типа 4А80В6

Вал АД лабораторной установки был механически связан с валом ДПТ. Было проведено отдельное экспериментальное исследование снижения тока ХХ выше указанного АД без ДПТ на его валу (см. кривая 2, рис. 4.). Как видно из рис., минимальный ток ХХ АД без механического соединения составляет 0,52 А, а при механическом соединении с валом составляет 0,61 А. Ввиду того, что в лабораторной установке используется АД, механически соединенный с валом ДПТ, условно принято считать за ХХ работу АД, соответствующую кривой 3 на рис. 4.

В случае статического регулятора частоты вращения сигнал задания выбран соответствующим работе АД в режиме ХХ, показанном точкой Б. Постепенным увеличением нагрузки АД начинает работать на электромеханической характеристике, соответствующей прямой 8, рис. 4. Начиная с точки В и при дальнейшем увеличении нагрузки наблюдалась небольшая неустойчивость режима работы системы. Проблема решалась постепенным увеличением сигнала обратной связи по току. При дальнейшем увеличении нагрузки АД работает по электромеханической характеристике 9, рис. 4. И выходит в режим работы, показанный точкой Д, рис 4.

Как показывают проведенные эксперименты при работе субоптимальной СУ АД со статическим регулятором, удается снизить потребляемый АД ток: на ХХ – 43 %; при $M_c=0,2M_n$ – на 33 %; при $M_c=0,4M_n$ – на 20 %; при $M_c=0,6M_n$ – на 9 %; при $M_c=0,8M_n$ – на 4 % по сравнению с работой АД при тех же значениях момента нагрузки на естественной характеристике (кривая 1, рис. 4).

Если по технологическим условиям АД перемежающийся режим работы с номинальной нагрузкой, то целесообразно выбрать электромеханическую характеристику работы СУ, показанную отрезком Е–З (рис. 4). Здесь ток ХХ АД на 50 % меньше, чем при работе АД в режиме, соответствующем точке А (рис. 4).

При замене статического регулятора на астатический при практической реализации субоптимальной СУ сигнал задания по частоте вращения выставляется таким образом, чтобы АД на ХХ работал в режиме, показанном точкой И (рис. 4). Нагрузка АД постепенно увеличивается, и АД выходит в номинальный режим работы, соответствующий точке К (рис. 4). При этом электромеханическая характеристика имеет вид, показанный на рис. 4 прямой 10.

Как видно из рис. 4., при реализации астатического регулятора потребляемые АД токи несколько больше, чем при тех же значениях нагрузки со статическим регулятором. При моменте нагрузки $M_c=0,8M_n$ и ХХ токи статора АД со статическим и астатическим регуляторами практически совпадают. При $M_c=0,6M_n$ отличаются на 4 %; при $M_c=0,4M_n$ – на 10 %; при $M_c=0,2M_n$ – на 14 % больше с применением астатического регулятора [5, 6].

Заключение. Достижение энергоэкономичного режима работы АД при моментах нагрузки, меньших номинального, возможно при управлении АД с помощью ТПН со статическим регулятором и при постоянном сигнале задания по частоте вращения.

Установлено, что получение субоптимальной СУ АД с ТПН по критерию минимума тока статора со статическим и астатическим регуляторами возможно на основе рассчитанной в координатных осях «ток–частота вращения» оптимальной кривой минимума тока статора.

Выработаны практические рекомендации для реализации субоптимальной СУ АД по критерию минимума тока статора для работы во всем диапазоне нагрузок на валу от ХХ до номинальной.

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. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронных двигателей / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 199 с.
3. Гладышев, С.П. Расчет нелинейных систем на ЭВМ / С.П. Гладышев. – Машиностроение, 1987. – 208 с.
4. 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.
5. Gladyshev, S.P., Bakin, A.A., Gladyshev, P.S. The dynamic of the control loops of the alternating voltage thiristor converter // Int. Conf. – The dynamic of the non-lenear systems. The Trinity College, Dublin, Ireland, 1995.
6. Бакин, А.А. A way of the AC machine stator current decreasing / А.А. Бакин, В.С. Гун, Е.В. Литвинова // Наука ЮУрГУ. Материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 294–296.

[К содержанию](#)