

6  
А-24  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ПРИБОРОСТРОЕНИЮ, СРЕДСТВАМ  
АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМАМ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ГОСПЛАНЕ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК  
СССР

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

---

ЦОКАНОВ В. В.

*На правах рукописи*

**ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
МАЛОМОЩНЫМИ СИНХРОННЫМИ  
ДВИГАТЕЛЯМИ**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

*Научный руководитель канд. техн. наук старший научный  
сотрудник КС ЗОВ О. А.*

Развитие ряда специальных отраслей техники ставит задачу создания высоконадежных систем автоматики и, в частности, автоматизированных электромашинных систем, способных работать в тяжелых эксплуатационных условиях без обслуживания в течение длительного срока.

Двигатели постоянного тока обладают хорошими регулировочными свойствами, однако наличие коллектора и щеток делают нежелательным, а иногда и невозможным использование их в условиях вибраций, ускорений, в разреженных и агрессивных средах.

В указанных условиях более эффективными оказываются бесконтактные системы. Бесконтактный регулируемый электропривод реализуется достаточно просто при наличии сети переменного тока. Однако, часто единственным источником электрической энергии является сеть постоянного тока. В этом случае задача создания надежного бесконтактного регулируемого электропривода, к которому, как правило, предъявляются также требования минимальных габаритов, веса и максимального к.п.д., значительно усложняется.

Бесконтактные двигатели переменного тока (асинхронные, синхронные, гистерезисные и т. п.) нуждаются в источнике переменного тока. Развитие полупроводниковой техники, появление мощных транзисторов и кремниевых управляемых вентилей позволяет создавать надежные малогабаритные и экономичные статические преобразователи постоянного напряжения в переменное. Специфические свойства транзисторов обуславливают преимущественное применение транзисторных преобразователей при наличии низковольтного источника постоянного тока и мощностях нагрузки порядка киловатта.

Одним из перспективных путей создания бесконтактного регулируемого электропривода с питанием от источника постоянного тока является применение транзисторных преобразователей для управления маломощными синхронными двигателями.

Реферируемая диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию особенностей совместной

работы транзисторного преобразователя и маломощного синхронного двигателя.

В первой главе дан обзор литературы, посвященной вопросам регулирования скорости вращения синхронного двигателя.

Существуют два способа регулирования скорости вращения синхронного двигателя: изменением частоты питающего напряжения при использовании преобразователя с независимым возбуждением и изменением напряжения питания при использовании преобразователя, управляемого датчиком положения ротора. Выявлен широкий круг вопросов, связанных с применением транзисторных преобразователей для управления маломощными синхронными двигателями и не получивших достаточного освещения в литературе. На основе изложенного поставлена задача для исследования.

Вторая глава посвящена анализу работы маломощного синхронного двигателя при частотном регулировании скорости вращения. Исследование проводится на примере неявнополюсной машины с учетом активного сопротивления статора.

На основе сравнения характеристик синхронного двигателя при  $r=0$  и  $r \neq 0$  показано, что при прочих равных условиях активное сопротивление уменьшает  $\Theta_{пред}$  и максимальное значение момента двигателя. Кроме того, при  $r \neq 0$  закон изменения напряжения  $\frac{U}{f} = \text{const}$  (в случае  $M = \text{const}$ ) не обеспечивает эффективного регулирования синхронного двигателя. Влияние активного сопротивления приводит к необходимости вводить в закон пропорционального изменения напряжения поправки, обусловленные конкретными требованиями, предъявляемыми к системе.

В маломощных синхронных машинах при номинальной и близких к ней нагрузках потери в обмотке статора в несколько раз больше потерь в стали и составляют основную часть суммарных потерь. Поэтому наиболее рациональным режимом в данном случае является режим минимального тока. При неизменном возбуждении и  $M = \text{const}$  зависимость  $I = f(U)$  имеет вид V-образных кривых, минимум которых соответствует  $I = I_q$ .

Выполнение указанного условия обеспечивается регулированием напряжения по следующему закону

$$U = \sqrt{(\omega c_e \Phi + Ir)^2 + (\omega LI)^2} \quad (1)$$

При этом момент двигателя определяется выражением

$$M = m p c_m \Phi \frac{E}{z} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\varphi_c - \theta)} \quad (2)$$

Точное соблюдение условия (1) связано со значительными трудностями, обусловленными нелинейной зависимостью  $U = f(v; I)$ . В связи с этим были рассмотрены линейные аппроксимирующие законы

$$U = v(U_n - \Delta U) + \Delta U, \quad (3)$$

где

$$U_n = \sqrt{(E_n + I_n r)^2 + (I_n x_n)^2}$$

$$\Delta U = I_n r$$

и

$$U = v(U_n - \Delta U_1) + \Delta U_1, \quad (4)$$

где

$$\Delta U_1 = \lambda_n \cdot I_n \cdot r.$$

На основе анализа характеристик синхронного двигателя при регулировании согласно (3) и (4) показано, что в первом случае двигатель эффективно используется по моменту на всем диапазоне изменения частоты, однако на низких частотах его перегрузочная способность близка к единице. Во втором случае сохранение заданной перегрузочной способности на всем диапазоне регулирования приводит к резкому увеличению тока двигателя на низких частотах и необходимости завышения установленной мощности примерно в  $\lambda$  раз.

Аппроксимация (1) в виде

$$U = v(U_n - \Delta U) + Ir \quad (5)$$

при некотором усложнении регулятора позволяет обеспечить оптимальные условия работы двигателя в случае номинальной нагрузки и незначительное отклонение от них при нагрузках, отличных от номинальной.

При питании от транзисторного преобразователя напряжение на двигателе в простейшем случае имеет прямоугольную форму. Исследование характеристик синхронного двигателя при питании прямоугольным напряжением выполнено методом гармонического анализа. Проанализировано влияние каждой гармоники на работу синхронного двигателя. Получены выражения основных характеристик синхронного двигателя,

обусловленных суммарным воздействием всех гармонических составляющих напряжения питания.

Сравнение расчетных характеристик синхронного двигателя при питании синусоидальным и прямоугольным напряжением, основная гармоника которого равна синусоидальному, показывает, что высшие гармоники практически не влияют на момент двигателя, однако, увеличивая эффективный ток, они ухудшают  $\eta$  и  $\cos\varphi$ . Например, при питании двигателя напряжением, не содержащим гармоник, кратных трем, в случае номинальной нагрузки ток двигателя увеличивается на 4%, потребляемая мощность — на 0,6%, к.п.д. ухудшается на 0,6%,  $\cos\varphi$  — на 8%.

Исследовано влияние высших гармоник на характеристики синхронного двигателя при частотном регулировании и различных способах изменения эффективного значения напряжения, прикладываемого к двигателю. Результаты исследования свидетельствуют о том, что с уменьшением частоты влияние высших гармоник возрастает незначительно при амплитудном способе и резко — при широтном. В последнем случае уже при двухкратном уменьшении частоты токи высших гармоник возрастают настолько, что потери от них приближаются к номинальным. В то же время при амплитудном способе изменения напряжения на выходе преобразователя коэффициент использования синхронного двигателя по моменту не хуже 0,95 на всем диапазоне изменения частоты.

Управление синхронным двигателем при помощи транзисторного преобразователя с независимым изменением частоты позволяет получить жесткие механические характеристики, но отличается рядом недостатков. В частности, возможно выпадение из синхронизма, имеются трудности прямого пуска, сложен реверс двигателя.

В диссертации рассмотрен второй способ управления синхронным двигателем при помощи транзисторного преобразователя. В этом случае транзисторы преобразователя, на выход которого включены обмотки синхронного двигателя, коммутируются датчиком положения в функции угла поворота ротора. При этом синхронный двигатель не может выпасть из синхронизма, так как очередное переключение транзисторов преобразователя происходит лишь при повороте ротора на определенный угол. Скорость вращения плавно регулируется от нуля изменением напряжения питания. Подобные системы иногда называют «бесколлекторным двигателем постоянного тока».

В главе третьей на примере трехфазной схемы, предложенной автором, рассмотрены особенности работы синхронного двигателя при питании от транзисторного преобразователя, управляемого датчиком положения ротора. Анализ процессов, происходящих в этой системе, показал, что ее можно рассматривать как синхронный двигатель, работающий при  $f = var$  в режиме  $\Theta = const$ , принимая в качестве независимой переменной напряжение питания.

На основе анализа работы маломощного синхронного двигателя при питании от транзисторного преобразователя с учетом указанных особенностей получены выражения для статических характеристик системы в функции напряжения питания, нагрузки и угла  $\Theta$ . В частности, механические характеристики определяются следующим выражением

$$n \approx \frac{60}{2\pi p} \left\{ -\frac{mpc_m \Phi U_1}{2ML} \left( \frac{c_e \Phi r}{U_1 L} - \sin \Theta \right) \pm \sqrt{\left[ \frac{mpc_m \Phi U_1}{2ML} \left( \frac{c_e \Phi r}{U_1 L} - \sin \Theta \right) \right]^2 + \frac{r^2}{L^2} \left( \frac{mpc_m \Phi}{Mr} \cos \Theta - 1 \right)} \right\}, \quad (6)$$

где знак «плюс» перед радикалом относится к первому и второму квадрантам, а знак «минус» — к третьему и четвертому.

Показано, что в области низких частот, когда  $\omega^2 L^2 \ll r^2$ , характеристики системы подобны характеристикам двигателя постоянного тока. С увеличением частоты возрастает влияние индуктивного сопротивления двигателя, в результате чего жесткость характеристик системы несколько ухудшается.

Исследовано влияние момента коммутации силовых транзисторов преобразователя (угла  $\Theta$ ), определяемого установкой датчика положения, на статические характеристики системы. Установлено, что при постоянном моменте нагрузки ток двигателя, к.п.д. и  $\cos\varphi$  существенно зависят от величины угла  $\Theta$ , т. е. его установленное значение, по существу, определяет эффективность работы системы.

Показано, что минимум потерь в обмотке статора, максимум к.п.д. и  $\cos\varphi = 1$  имеют место при различных значениях угла  $\Theta = \Theta_i$ ;  $\Theta_\eta$  и  $\Theta_\varphi$  соответственно. Причем

$$\Theta_i < \Theta_\eta < \Theta_\varphi, \quad (7)$$

где

$$\Theta_i \approx \arcsin \left[ \frac{ML}{mpc_m c_e \Phi^2} \left( 1 - \frac{Mr}{mpc_m \Phi U_1} \right) \right] \quad (8)$$

$$\Theta_\varphi \approx \frac{1}{2} \arcsin 2 \frac{ML}{mpc_m c_e \Phi^2} \quad (9)$$

Анализ статических характеристик системы в широком диапазоне изменения скорости вращения двигателя позволил сделать вывод о том, что при регулировании скорости вращения изменением напряжения питания обеспечивается достаточно высокая эффективность использования двигателя.

Выяснено, что пусковой момент двигателя в рассматриваемом случае зависит не только от величины пускового тока, но и от положения ротора в момент пуска, поскольку датчик положения реагирует лишь на определенный угол поворота ротора.

Основные положения второй и третьей главы были проверены экспериментально на двигателе мощностью 200 вт с возбуждением от постоянного магнита в форме «звездочки» с тремя парами полюсов. Результаты эксперимента подтвердили правильность полученных соотношений.

Четвертая глава посвящена разработке и анализу транзисторных преобразователей, управляемых датчиком положения ротора синхронного двигателя. Особенностью таких преобразователей является синхронизация работы транзисторов выходного каскада при помощи датчика положения ротора. Поэтому трудности, связанные с получением нулевой и близких к ней частот, здесь отсутствуют.

Предложена трехфазная мостовая схема преобразователя, управляемого датчиком положения ротора, позволяющая эффективно использовать силовые транзисторы по мощности. Это обеспечивается коммутацией базовых цепей силовых транзисторов маломощными полупроводниковыми реле, включенными на выходы датчика положения ротора. Реле включены таким образом, что обеспечивают нормальное функционирование схемы при наличии лишь одного независимого выхода датчика положения на пару силовых транзисторов, включенных последовательно между «плюсом» и «минусом» источника питания.

Предложен новый принцип построения датчика положения ротора на базе дросселей насыщения, управляемых полем постоянного магнита. Дан анализ работы такого датчика. Показано, что замкнутая магнитная система дросселя позволяет уменьшить его габариты и повысить мощность выходного сигнала.

На основе анализа уравнения механических характеристик системы, полученного в третьей главе, показана возможность реверса двигателя при одновременном изменении фаз напря-

жений, прикладываемых к обмоткам синхронного двигателя, на 180 эл. град.

Разработаны две реверсивные схемы управления синхронным двигателем при помощи транзисторного преобразователя, транзисторы которого коммутируются датчиком положения. В первом случае изменение фазы напряжения на выходе преобразователя осуществляется переключением двух датчиков положения (прямого и обратного вращения), смещенных в пространстве на 180 эл. град. Датчики переключаются при помощи токовых обмоток управления дросселей насыщения. Эти обмотки включены в коллекторные цепи соответствующих транзисторов реле реверса. В зависимости от полярности сигнала на входе реле реверса насыщены дроссели того или другого датчика положения. В соответствии с этим преобразователь управляется либо датчиком прямого, либо датчиком обратного вращения.

Вторая схема позволяет реверсировать двигатель при наличии лишь одного датчика положения. Изменение фазы выходного напряжения преобразователя осуществляется коммутацией вспомогательных источников постоянного напряжения, питающих коллекторные цепи выходных транзисторов полупроводниковых реле, управляемых датчиком положения. Вспомогательные источники коммутируются при помощи реле реверса, выходные транзисторы которого включены через выпрямительные мосты в первичные обмотки трансформаторов указанных источников.

При работе транзисторного преобразователя на синхронный двигатель существенное влияние на форму линейного тока двигателя, а, следовательно, и на ток силовых транзисторов оказывает э.д.с. вращения. Исследованы особенности работы силовых транзисторов преобразователя при наличии э.д.с. вращения. Получены выражения для мгновенных значений тока транзисторов преобразователя в функции параметров схемы и режима работы синхронного двигателя.

Рассмотрены процессы коммутации силовых транзисторов, включенных последовательно между «плюсом» и «минусом» источника питания, при наличии в области базы насыщенного транзистора избыточных носителей.

Получены выражения, позволяющие определять мощность, рассеиваемую транзистором преобразователя при работе на синхронный двигатель.

Максимальная мощность нагрузки преобразователя пропорциональна напряжению питания и допустимой амплитуде

тока транзистора. Стремление к эффективному использованию транзисторов по мощности с целью получения минимальных габаритов приводит к работе транзисторов в режимах, близких к предельно допустимым. При этом, как правило, возрастает число отказов транзисторов. Изучение причин отказов показывает, что в большинстве случаев они связаны с электрическим и тепловым пробоем. Следовательно, надежность транзисторных схем в значительной мере зависит от правильности выбора режима работы транзисторов.

В связи с этим в пятой главе исследованы условия безопасной работы транзистора в переключающих схемах.

Рассмотрены явления, связанные с электрическим пробоем. Выявлено влияние потенциала базы на режим работы транзистора в области отсечки и в области пробоя. Получены экспериментальные зависимости напряжения пробоя в схеме с общим эмиттером от напряжения запирающего смещения, сопротивления в цепи базы, тока коллектора и температуры.

Экспериментально исследованы условия возникновения «вторичного электрического пробоя». Установлено, что «вторичный электрический пробой» не возникает даже при токах коллектора, значительно превышающих предельно допустимые значения, если исключена возможность «первичного пробоя». Однако, при повышенных температурах и достаточно больших значениях коллекторного напряжения и тока возникает явление, внешне сходное со «вторичным электрическим пробоем», но имеющее тепловую природу.

Проанализированы условия возникновения теплового пробоя транзистора с учетом специфики его работы в ключевом режиме. Экспериментально исследована температурная зависимость тока утечки коллекторного перехода. Показано, что при тепловых расчетах удобно считать ток утечки не зависящим от температуры, учитывая влияние его температурной зависимости на весь ток коллекторного перехода запятого транзистора постоянным коэффициентом при токе рекомбинации

$$I_{kol} = I_{kop} + \epsilon I'_{ko} e^{c(T_n - 20)} \quad (10)$$

На основе решения дифференциального уравнения теплового равновесия транзистора, составленного с учетом особенностей ключевого режима его работы, сделан вывод о том, что транзистор становится термически неустойчивым, когда перегрев, создаваемый температурно зависимой частью обратного тока коллекторного перехода, превышает величину, обратную температурной постоянной.

Получены выражения, позволяющие на основе параметров транзистора и режима его работы определить критическую температуру, при которой возникает тепловой пробой.

Показано, что наличие второго устойчивого термического равновесия в области больших токов утечки коллекторного перехода обуславливает появление при тепловом пробое низкоомного состояния транзистора, внешнее проявление которого сходно со «вторичным электрическим пробоем».

В заключении кратко сформулированы результаты работы, которые могут служить основой для создания конкретных схем бесконтактного регулируемого электропривода на базе маломощного синхронного двигателя и транзисторного преобразователя. Намечены направления дальнейших исследований в этой области.

### Обозначения

- $\eta$  — коэффициент полезного действия;
- $\Theta$  — угол сдвига фаз напряжения, прикладываемого к обмотке синхронного двигателя, и э.д.с., наводимой в ней при вращении ротора;
- $\lambda; \lambda_n$  — перегрузочная способность синхронного двигателя и ее значение в номинальном режиме;
- $\nu$  — относительная частота;
- $\varphi_c$  — угол полного сопротивления обмотки статора;
- $\Phi$  — поток возбуждения;
- $\omega$  — угловая скорость;
- $c$  — температурная постоянная;
- $E; E_n$  — эффективное значение э.д.с., наводимой в фазной обмотке статора синхронного двигателя при вращении ротора, и ее значение на номинальной частоте;
- $I; I_n$  — эффективное значение тока, фазной обмотки синхронного двигателя и его номинальное значение;
- $I_{kol}$  — обратный ток коллекторного перехода транзистора при температуре  $T^\circ\text{C}$ ;
- $I'_{ko}; I_{kop}$  — составляющие обратного тока коллекторного перехода: ток рекомбинации при  $20^\circ\text{C}$  и ток утечки;

- $L$  — индуктивность фазной обмотки синхронного двигателя;  
 $M$  — момент синхронного двигателя;  
 $n$  — скорость вращения об/мин;  
 $r$  — активное сопротивление фазной обмотки синхронного двигателя;  
 $T_n$  — температура коллекторного перехода транзистора;  
 $U$  — эффективное значение фазного напряжения двигателя;  
 $U_n$  — эффективное значение фазного напряжения двигателя в номинальном режиме;  
 $U_1$  — эффективное значение основной гармоники фазного напряжения;  
 $X; X_n$  — индуктивное сопротивление фазной обмотки двигателя и его значение на номинальной частоте;  
 $z$  — полное сопротивление фазной обмотки двигателя.

### Работы, опубликованные автором по теме диссертации

1. Бесколлекторный электропривод постоянного тока (соавтор Коссов О. А.), «Электричество», 1963, № 1.
2. Реверсивный бесколлекторный электропривод постоянного тока с коммутатором на транзисторах, Известия ВУЗов, «Электромеханика», 1964, № 7.
3. К теории дросселей с подмагничиванием, управляемых постоянными магнитами (соавторы Пеккер И. И., Савин М. М.), Известия ВУЗов, «Электромеханика», 1959, № 1.
4. Особенности работы маломощного синхронного двигателя при питании от транзисторного преобразователя с регулируемой частотой (соавтор Коссов О. А.), «Электротехника», 1964, № 9 (в печати).
5. Прибор для испытания транзисторов в области пробоя (соавтор Коссов О. А.), «Передовой научно-технический и производственный опыт», № 28—63—391/7, ГОСИНТИ, 1963.
6. Исследование электрического и теплового пробоев мощных транзисторов (соавтор Коссов О. А.), «Электричество», 1964, № 5.
7. Бесколлекторный электропривод постоянного тока, Авторское свидетельство № 155214 от 16.1.1962, Бюллетень изобретений, 1963, № 12.
8. Реверсивный бесколлекторный электропривод постоянного тока, Авторское свидетельство № 163662 от 7.3.1963, Бюллетень изобретений, 1964, № 13.

Т 10827 11/VII 1964 г. Объем  $3/4$  п. л. Зак. 1662. Тир. 180.

Типография № 3 Упр. по печати Мосгорисполкома