

# АНАЛОГОВАЯ МОДЕЛЬ ТИРИСТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Л. С. РЫБИЦКИЙ

Рижский политехнический институт,  
Электроэнергетический факультет, кафедра автоматизированного электропривода

Поступило 18. июня 1980 г.  
Представлено проф. др. Дь. РЕТТЕР

## Введение

Большое внимание в последнее время уделяется созданию регулируемых электроприводов для определенных технологических процессов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями (АКЗД). Одним из способов регулирования скорости вращения АКЗД является тиристорное регулирование напряжения на статорных обмотках двигателя. Устройство с применением данного способа определено как тиристорный асинхронный электропривод (ТАЭП). Схема замещения ТАЭП и питающей сети представлена на рис. 1 а.

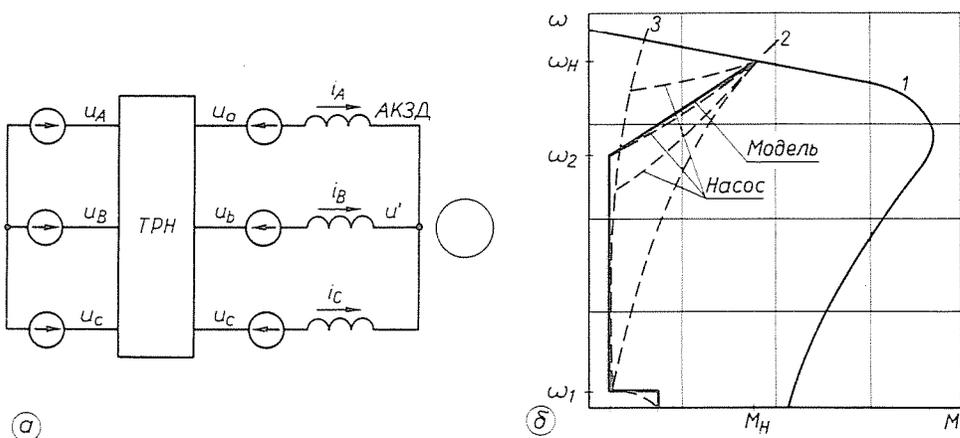


Рис. 1. а—схема замещения ТАЭП, б—механические характеристики АКЗД-1 и ЦН-2,3

Одним из наиболее распространенных и энергоемких технологических процессов является водоснабжение промышленных предприятий и жилых районов городов. Поэтому особый интерес представляет применение ТАЭП в приводе центробежного насоса (ЦН), работающего на водопроводную сеть с высоким противодавлением. Здесь механическая характеристика ЦН существенно отличается от «вентиляторной». На

рис. 1 б показаны механические характеристики АКЗД — кривая 1 и ЦН — в зоне между кривыми 2 и 3, зависящие от противодействия водопроводной сети. Работа ЦН без противодействия характеризуется кривой 2, а с противодействием, превышающим максимально создаваемое насосом, — кривой 3.

Исследование динамических процессов ТАЭП—ЦН возможно аналоговым моделированием данной системы. Для этого необходимо математическое описание элементов ТАЭП—ЦН с последующей разработкой их моделей.

### 1. Математическое описание ТАЭП—ЦН

Асинхронный двигатель целесообразно описать совокупностью дифференциальных уравнений согласно [1].

В обобщенной векторной форме электромагнитные уравнения АКЗД выражаются:

$$\bar{U}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \quad (1)$$

$$\bar{U}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r. \quad (2)$$

Преобразование электромагнитной энергии в механическую описано выражением:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} \bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s. \quad (3)$$

Соотношение механического равновесия выражено:

$$M - M_c \operatorname{sign} \omega = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4)$$

При моделировании не учитываются: насыщение магнитопровода, влияние пазов статора и ротора, потери в стали, высшие гармоники поля; и принимаются: равномерность воздушного зазора, идентичное выполнение фазных обмоток, параметры ротора, приведенные к статору.

С учетом исследований по определению оптимальной структуры модели АКЗД для решения на АВМ и опыта моделирования [1, 2, 3] используется система дифференциальных уравнений в  $\alpha, \beta, 0$  координатах, где переменными являются потокосцепление ротора и ток статора.

Учитывая, что далее будет исследоваться совместная работа асинхронного двигателя и трехфазного тиристорного регулятора напряжения (ТРН), необходимо II уравнение Кирхгофа для статорных цепей (1) выразить в форме с реальными токами, потокоцеплениями и напряжениями. Дифференциальные уравнения асинхронного короткозамкнутого двигателя с основными переменными  $i_A, i_B, i_C, \Psi_{rz}, \Psi_{r\beta}$  образуют систему:

$$\begin{aligned}
 U_a &= R_s i_A + \frac{X_s \sigma}{\omega_0} \frac{di_A}{dt} + K_r \frac{d\Psi_{rA}}{dt}; \\
 U_b &= R_s i_B + \frac{X_s \sigma}{\omega_0} \frac{di_B}{dt} + K_r \frac{d\Psi_{rB}}{dt}; \\
 U_c &= R_s i_C + \frac{X_s \sigma}{\omega_0} \frac{di_C}{dt} + K_r \frac{d\Psi_{rC}}{dt}; \\
 0 &= \frac{X_0 R_r}{X_r} i_{s\beta} - \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - \frac{\omega_0 R_r}{X_r} \Psi_{r\beta} + \omega \Psi_{rz}; \\
 0 &= \frac{X_0 R_r}{X_r} i_{sz} - \frac{d\Psi_{rz}}{dt} - \frac{\omega_0 R_r}{X_r} \Psi_{rz} - \omega \Psi_{r\beta}; \\
 M &= \frac{3p}{2} K_r (\Psi_{rz} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{sz}); \\
 \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c \text{sign } \omega.
 \end{aligned} \tag{5}$$

В реальной установке напряжение  $u_a$  на фазе двигателя несинусоидально с ограниченным числом конечных скачков (рис. 2а) и при полностью открытых тиристорах отличается от  $u_A$  только величиной прямого падения напряжения на тиристорах. Поэтому далее пренебрегаем прямым падением напряжения на тиристорах.

При исследовании ТРН совместно с АКЗД уравнение электрического равновесия одной фазы статора выражается по:

$$u_A - u' = R_s i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \tag{6}$$

где

$$u' = (u_A + u_B + u_C)/3. \tag{7}$$

Тиристорное регулирование переменного тока приводит к образованию бестоковых пауз (рис. 2 а) в фазах. Учет э. д. с. вращения двигателя в бестоковых паузах для одной фазы выражается следующим образом:

$$e_A = K_r \frac{d\Psi_{rA}}{dt}. \quad (8)$$

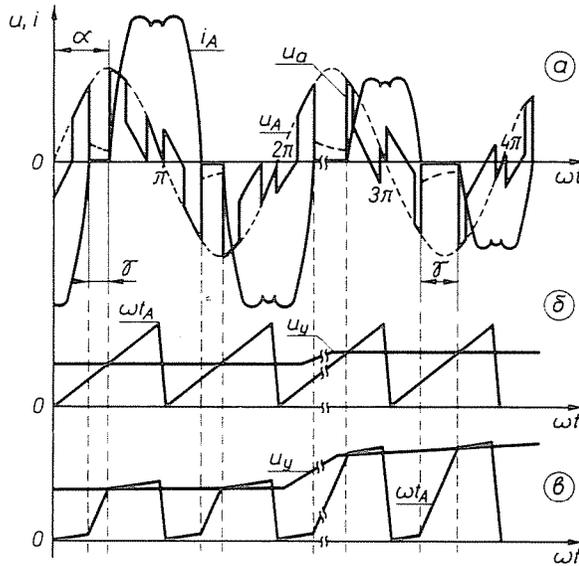


Рис. 2. а—выходное напряжение ТРН и ток фазы; б—способ фазового регулирования; в—регулирование величины бестоковой паузы тиристоров

Выражение (7) описывает такое граничное условие  $u'$ , при котором все тиристоры ТРН включены. Второе граничное условие  $u'$  при полностью выключенных тиристорах ТРН получается из суммы э. д. с. вращения, индуцируемых в обмотках статора затухающим магнитным полем ротора.

При изменении угла бестоковой паузы тиристоров в кривой фазного напряжения нагрузки имеются чередования интервалов времени, где нет обесточенных фаз, одна из них обесточена, обесточены все (2, 3). Общее уравнение для  $u'$  с учетом вышеуказанных ограничений можно записать следующим образом:

$$u' = [(u_A \text{ или } e_A) + (u_B \text{ или } e_B) + (u_C \text{ или } e_C)] / (3 \text{ или } 2 \text{ или } 1). \quad (9)$$

Обратная связь по скорости (ОСС) в системе привода ТАЭП основана на сравнении напряжения, пропорционального скорости

вращения  $\omega$  с задающей величиной  $u_3$ . Величина разности сигналов изменяет моменты срабатывания тиристорov в системе управления ТРН. Этот принцип ОСС пригоден как для фазового управления по углом  $\alpha$  (рис. 2 б), так и для управления углом бестоковой паузы  $\gamma$  (рис. 2 в).

Момент сопротивления на валу АКЗД создается исполнительным механизмом — ЦН. В реальной установке ТАЭП—ЦН обычно применяется жесткая пальцевая муфта, поэтому принято допущение, что вал АКЗД с валом ЦН соединены жестко, без люфта. Механические характеристики ЦН (рис. 1 б) описываются сложными аналитическими выражениями (4) и без учета пускового момента на преодоление трения покоя в подшипниках скольжения насоса. Значительно проще описать  $M_c = M_y$  по методике линеаризации частей характеристик  $M_y = f(n)$ .

## 2. Структурные схемы аналоговой модели ТАЭП—ЦН

Для построения структурных схем моделей АКЗД и ТРН необходимо уравнения (5), (8), (9) преобразовать в машинные (3, 5), выбрать базисные величины и масштабы переменных величин. Заменяв обозначение  $dx/dt$  на  $Dx$  и используя машинные коэффициенты, получаем машинные уравнения ТАЭП—ЦН.

Модель АКЗД построена на 26-ти решающих усилителях и 4-х блоках перемножения и показана на рис. 3.

При моделировании ТРН возможно бесконтактное описание тиристорov, однако это требует большое количество решающих усилителей и нелинейных блоков. Много проще при моделировании использовать вместо тиристорov операционные реле. Здесь неточность в расчетах обуславливается тем, что время срабатывания реле приблизительно на два порядка больше времени выключения тиристорov. Следовательно, для повышения точности совместного моделирования ТРН и АКЗД следует по крайней мере в 100 раз увеличить машинное время по сравнению с реальным.

Модель ТРН на рис. 4 и 5 работает таким образом, что реле К1 ÷ К3 своими контактами изменяют обратные связи решающего усилителя, создающего  $u'$  по (9) в таком виде, что разность  $u_A - u'$  соответствует реальной кривой напряжения, приложенной к фазе статора (2, 3).

Основой модели системы управления ТРН является описание вертикального принципа фазового управления тиристорами (3). При этом от трехфазной системы питающих напряжений формируются три пилообразных напряжения, которые сравниваются с управляющей величиной (рис. 2 б), после чего осуществляется управление тремя реле

проводимости. Контакты реле по определенному закону коммутируют фазные напряжения и э. д. с., создавая и имитируя работу пары встречно-параллельно включенных тиристоров. Модули фазных токов при управлении реле проводимости используются для создания явления

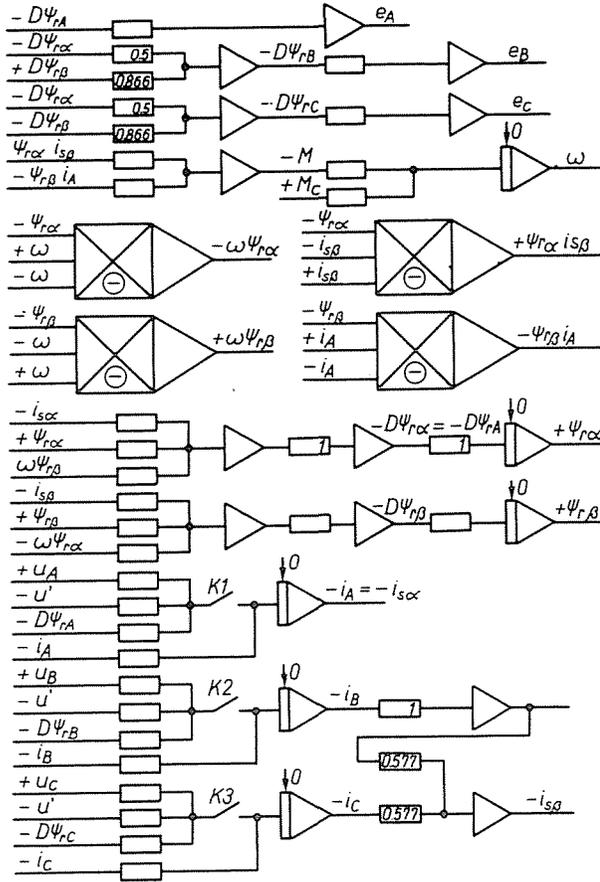


Рис. 3. Модель АКЗД

сдвига тока по фазе относительно напряжения при активно-индуктивной нагрузке.

При управлении ТРН по величине бестоковой паузы  $\gamma$  (рис. 2 а) необходим другой метод формирования пилообразного напряжения. Анализ ряда вариантов схем управления моделью ТРН рациональной выявил схему, вырабатывающую  $\omega t_A, \omega t_B, \omega t_C$  (рис. 5) согласно форме «пилы» на рис. 2 в. Такая пилообразная кривая имеет два перелома, т. е. дважды за полупериод фазного напряжения скачкообразно изменяется

крутизна ее нарастания. Данная схема системы управления приводит к стабильной работе реле проводимости модели ТРН.

Исследуемыми режимами ТАЭП—ЦН являются только прямой пуск и регулирование скорости вращения привода. Поэтому создана

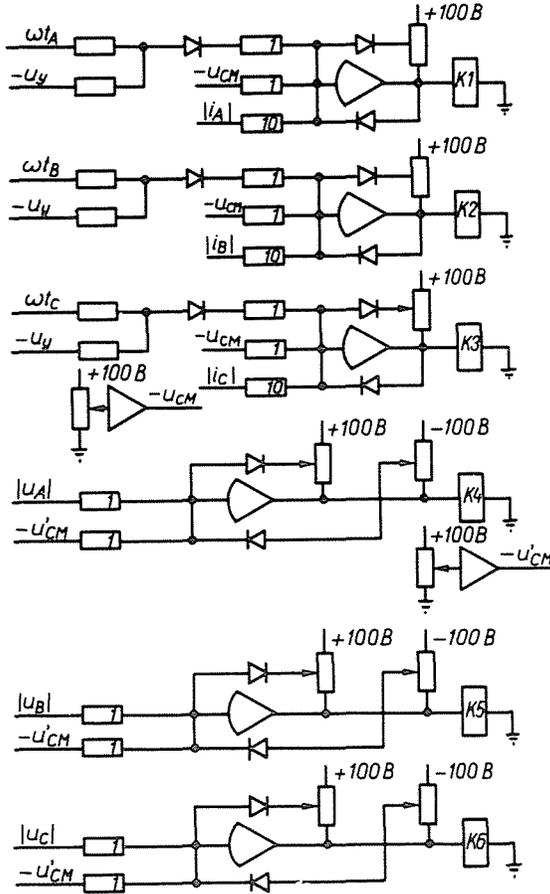


Рис. 4. Часть модели ТРН с операционными реле.

простая схема модели ОСС совместно с моделью сглаживающего фильтра, которая содержит три решающих усилителя с двумя ограничениями (рис. 6 б).

Первое ограничение необходимо для согласования выходного сигнала по знаку, поскольку  $u_y$  меняется по амплитуде только с одной полярностью. Второе служит для определения изменения  $u_y$  по амплитуде.

При моделировании питающей сети использовались типовые схемы модели трехфазного генератора переменного синусоидального напряжения (5).

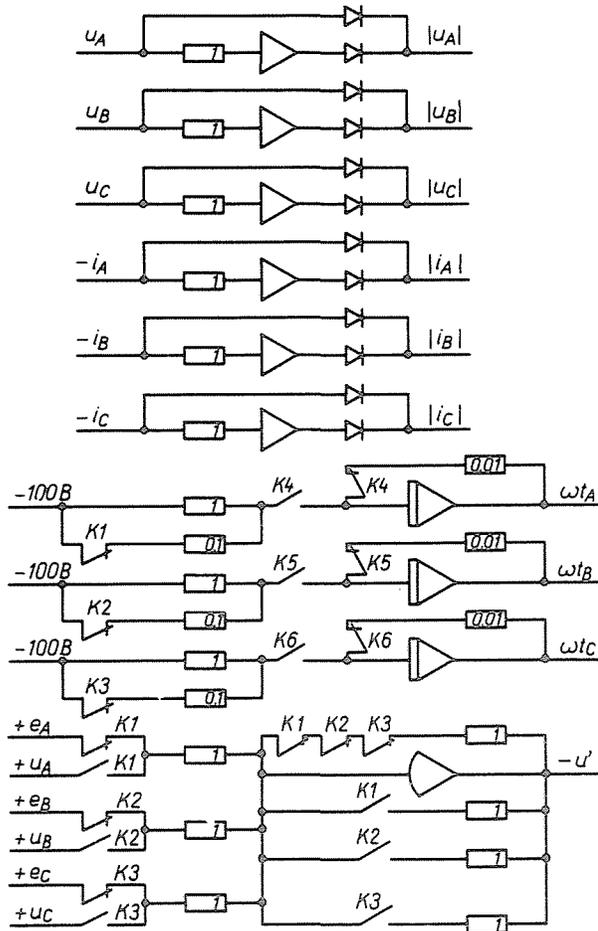


Рис. 5. Вторая часть модели ТРН

Модель центробежного насоса на основе выше изложенных соображений построена как функция ограничения специального вида. Представленная на рис. 6 а схема модели ЦН содержит три ограничителя на диодно-резисторных элементах и два решающих усилителя. Наличие регулируемых потенциометров позволяет изменять такие параметры ограничения механической характеристики ЦН, как величины момента трения покоя, момента холостого хода и противодавления водопроводной сети.

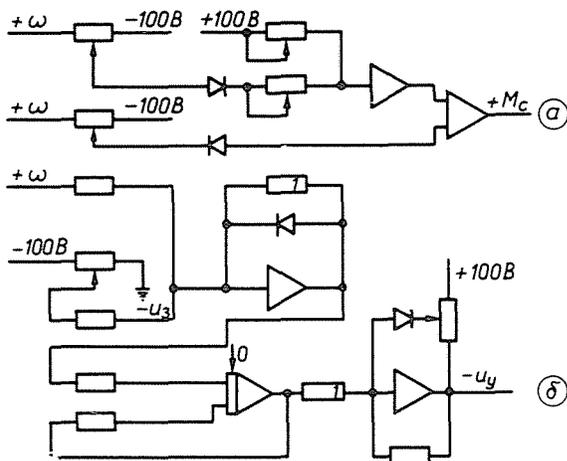


Рис. 6. а—модель центробежного насоса; б—модель обратной связи по скорости в ТАЭП

### 3. Особенности наладки модели ТАЭП—ЦН

Основные трудности при любых исследованиях систем с асинхронным короткозамкнутым двигателем заключаются в определении роторных и статорных параметров. Весьма сложно также определить суммарный момент инерции АКЗД и реального рабочего механизма — центробежного насоса.

С другой стороны, критерием совпадения аналоговой модели с реальной машиной является идентичность измерительных осциллограмм. В исследуемой системе привода имеется ряд меняющихся легко измеряемых величин. Это кратность пускового тока, угол  $\varphi(s)$ , характеризующий изменение соотношения  $\omega L/R$  нагрузки, и время пуска, зависящее от момента инерции и момента сопротивления.

При моделировании ТРН существенным является выбор масштаба времени модели, так как операционные реле аналоговых машин отстают по быстрдействию от тиристоров на  $2 \div 3$  порядка по временам включения ( $t_{вкл}$ ,  $t_{вк}$ ) и выключения ( $t_{выкл}$ ,  $t_{в}$ ). Поэтому для повышения точности модели ТРН следует выбрать соотношение между временами периода питающего двигателя напряжения —  $T$  и периода машинного напряжения —  $T_M$  так, чтобы выполнялось выражение:

$$\frac{T}{t_{вк}} + \frac{T}{t_{в}} \approx \frac{T_M}{t_{вкл}} + \frac{T_M}{t_{выкл}} \quad (10)$$

Например, если в реальном ТАЭП используются тиристоры серии ТД, а модель ТРН создана на операционных реле АВМ ЭМУ—8 и  $T_M = 6,28$  с, то выражение (10) выполняется с точностью 30%, что допустимо при исследованиях электромагнитных процессов ТАЭП.

#### 4. Применение модели ТАЭП—ЦН

Аналоговая модель ТАЭП—ЦН создавалась с целью исследования динамики системы в режимах регулирования скорости вращения и прямого пуска установки. Определялось влияние противодействия водопроводной сети на указанные режимы привода. На рис. 7 а показана осциллограмма прямого пуска модели ТАЭП—ЦН при величине противодействия водопроводной сети, соответствующей половине

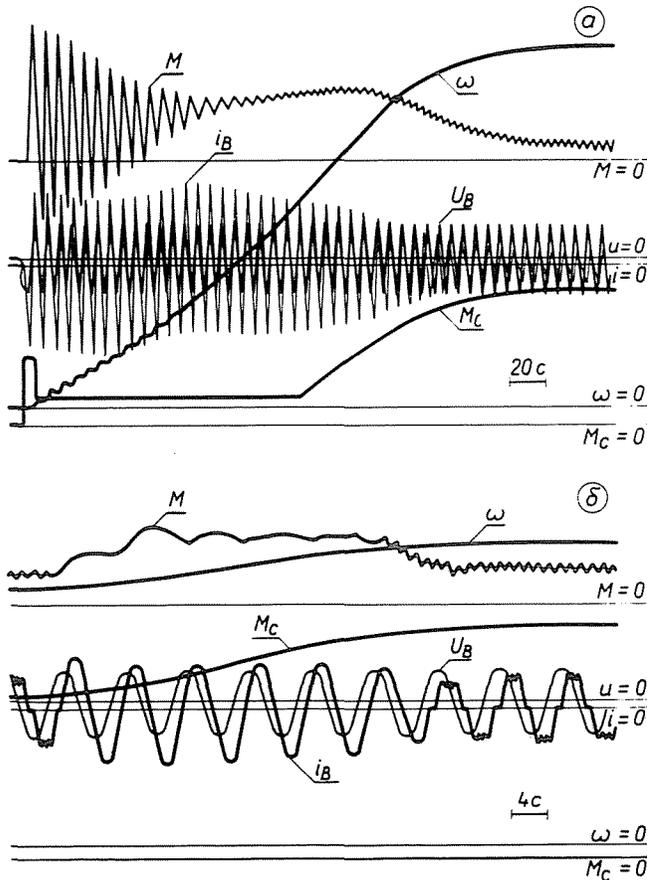


Рис. 7. а—осциллограмма пуска модели ТАЭП—ЦН; б—осциллограмма ступенчатого регулирования скорости

максимально создаваемой насосом. При этом мощность АКЗД—75 кВт, номинальное скольжение 4,5%, фазное напряжение 220 В, а мощность ЦН при наивысшем КПД—35 кВт.

На рис. 7 б дана осциллограмма работы модели ТАЭП—ЦН в режиме ступенчатого регулирования скорости вращения насосной установки. Показан переходный процесс от одного установившегося значения скорости на другое при скачкообразном изменении величины управляющего напряжения  $u_3$ .

Исследование модели ТАЭП—ЦН при ступенчатом регулировании  $u_3$  позволяет определить влияние величины ступени изменения скорости АКЗД на переходные процессы ТАЭП при разных параметрах обратной связи по скорости.

### 5. Выводы

Преимуществом аналогового моделирования при исследованиях динамики тиристорного асинхронного электропривода центробежного насоса является наглядность результата и возможность проведения коррекций в схеме модели в ходе решения.

Созданная аналоговая модель ТАЭП при управлении углом бестоковой паузы тиристоров работает устойчиво в режимах пуска и регулирования скорости привода. Использование метода сравнения кривых  $\varphi(s)$  реального двигателя и модели увеличивает точность модели АКЗД с малыми значениями критического скольжения.

Моделирование ТАЭП с центробежным насосом целесообразно на аналоговых вычислительных машинах средней мощности с числом решающих усилителей не менее 50.

Изучение модели тиристорного асинхронного электропривода центробежного насоса в режимах прямого пуска и регулирования скорости вращения позволяет по характеристикам экстремальных значений параметров ТАЭП оценить качество устройства регулирования.

### Принятые обозначения

- $\bar{U}_s, \bar{U}_r$  — векторы статорного и роторного напряжения;
- $R_s, R_r$  — активные сопротивления статорной и роторной обмотки;
- $\bar{i}_s, \bar{i}_r$  — векторы статорного и роторного тока;
- $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$  — векторы потокосцеплений в статоре и роторе;
- $\omega_k, \omega_0, \omega$  — произвольная, синхронная и роторная угловые скорости вращения;

- $\vec{M}$  — вектор электромагнитного момента;  
 $M, M_c$  — электромагнитный момент и момент сопротивления на валу двигателя;  
 $J$  — момент инерции;  
 $i_A, i_B, i_C$  — моментные значения токов в фазах статорной обмотки;  
 $u_a, u_b, u_c$  — моментные значения статорных фазных напряжений;  
 $u_A, u_B, u_C$  — моментные значения фазных напряжений питающей сети;  
 $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$  — составляющие потокосцепления ротора в  $\alpha, \beta, 0$  координатах;  
 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  — составляющие тока статора в  $\alpha, \beta, 0$  координатах;  
 $\Psi_{rA}, \Psi_{rB}, \Psi_{rC}$  — моментные значения потокосцеплений ротора;  
 $X_s, X_r$  — индуктивные сопротивления статора и ротора;  
 $\sigma$  — результирующий коэффициент рассеяния;  
 $K_r$  — коэффициент связи ротора;  
 $p$  — число пар полюсов;  
 $u'$  — искусственное напряжение нулевой точки модели статорных обмоток двигателя;  
 $\alpha, \gamma$  — углы регулирования и бестоковой паузы статорного тока;  
 $e_A, e_B, e_C$  — фазные э. д. с. вращения двигателя;  
 $u_y$  — задающее напряжение в системе управления моделью регулятора напряжения;  
 $M_u$  — момент сопротивления центробежного насоса;  
 $n$  — скорость вращения привода;  
 $K1 \div K6$  — обозначения контактов и катушек реле в модели регулятора напряжения;  
 $\omega t_A, \omega t_B, \omega t_C$  — пилообразные напряжения;  
 $|i_A|, \dots, |u_A|, \dots$  — модули фазных токов и напряжений питающей сети;  
 $u_3$  — напряжение управления системой привода;  
 $\varphi$  — угол сдвига первой гармоники тока двигателя от синусоиды питающего фазного напряжения;  
 $s$  — величина скольжения;  
 $u_{CM}, u'_{CM}$  — напряжения смещения для повышения надежности срабатывания реле модели;  
 $T, T_M$  — периоды питающих напряжений сети и аналоговой модели;  
 $t_{\text{вкл}}, t_{\text{вк}}$  — время включения реле и тиристоров;  
 $t_{\text{выкл}}, t_{\text{в}}$  — время выключения реле и тиристоров.

## Резюме

В работе представлены структурные схемы аналоговых моделей асинхронного двигателя, тиристорного регулятора напряжения, обратной связи по скорости и центробежного насоса. Даны рекомендации по выбору параметров и наладке модели.

Представлена схема управления моделью тиристорного регулятора напряжения по углу бестоковой паузы тиристором.

Показан пример использования модели при исследованиях динамических показателей в приводе центробежного насоса.

## Литература

1. Ковач, К. П.—Рац, И.: Переходные процессы в машинах переменного тока. Москва, ГЭИ, 1963
2. PROSKE, D.: Die Anlagsimulation drehstromstellergespeister Asynchronmaschinen. Elektr., 1973, 7, s. 352—354
3. Петров, Л. П.—Ладензон, В. А.—Подолов, Р. Г.—Яковлев, Я. В.: Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением. Москва, Энергия, 1977
4. Степанов, А. И.: Центробежные и осевые насосы. Москва, Машгиз, 1960
5. Тетельбаум, И. М.—Шнейдер, Ю. Р.: 400 схем для АВМ. Москва, Энергия, 1978

Рыбицкий Леонид Станиславович

СССР, Латвийская ССР

226059, РИГА-59, ул. Стырну, д. 35, кв. 66