

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЧАСТОТНОУПРАВЛЯЕМЫХ
СИСТЕМ «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ —
АСИНХРОННЫЙ ГИРОЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»**

И. Ф. КАЛИНИН, Б. П. СОУСТИН, Ю. А. ШУРЫГИН

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

При частотном управлении трудно создать преобразователь с идеальной формой синусоидального тока. Даже электромашинный преобразователь (синхронный генератор, ротор которого вращается по заданному закону) не может обеспечить этого условия, так как параметры преобразователя изменяются при изменении частоты, что приводит к непостоянству коэффициента гармоник ($K_r = 3 \div 10\%$).

Использование метода широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону нельзя считать решением вопроса, так как даже при одинаковом K_r на малой и высокой частотах действие высших гармонических не одинаково, что приводит в конечном счете к дополнительному перегреву ротора [1].

Представляют интерес преобразователи частоты, выполненные на ключевых элементах, которые могут иметь произвольную, в частности, обратную зависимость от частоты статора. В подобных схемах формирование амплитуды и формы тока происходит с помощью двухзонного регулятора, включенного в цепь обратной связи замкнутой цепи [2, 3, 4, 1], рис. 1, а. Преобразователь в этом случае отслеживает входной сигнал с заданной степенью точности. Для рассмотрения принципа работы приведена электрическая схема на транзисторах и диодах для одной фазы, рис. 1, б.

Первоначально через нагрузку ток не протекает, затем за счет превышения входного сигнала включаются ключи, например, Т1 и Т2. К нагрузке прикладывается напряжение источника питания и через нее начинает протекать ток. При достижении током значения i_{t1} датчик тока ДТ (выполняемый по принципу магнитного усилителя) выдает сигнал на отключение ключей Т1 и Т2. Нагрузка за счет э.д.с. самоиндукции подключается через диоды Д1 и Д2 к источнику в противоположном направлении, ток начинает спадать. При достижении током значения i_{t2} датчик тока снова выдает сигнал на включение ключей Т1 и Т2, ток снова начинает возрастать, потом спадать и т. д.

Частота и глубина пульсации будут определяться разностью между напряжением входного сигнала и напряжением, пропорциональным току нагрузки

$$\Delta i = \frac{\Delta U_{вх}}{R_i} = \frac{U_{вх} - U_{ос}}{R_i} = \frac{U_{вх} - Z_{дт} i_n}{R_i}, \quad (1)$$

Ток нагрузки пульсирует между верхней и нижней синусоидой. В точке 1 $i = I_m \sin \omega t + \frac{\Delta i}{2}$, в точке 2 $i = I_m \sin \omega t - \frac{\Delta i}{2}$. Очевидно, датчик тока и усилитель сигнала рассогласования необходимо настраивать так,

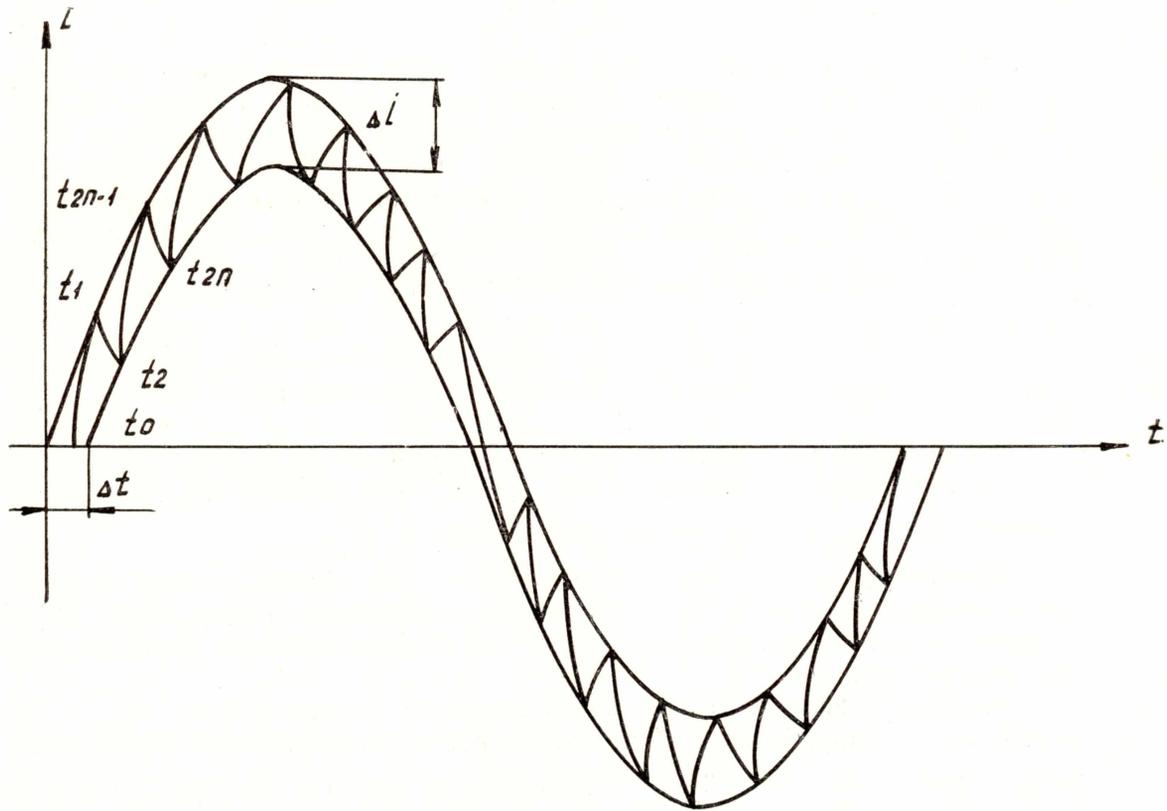


Рис. 1 а. Формирование тока нагрузки.

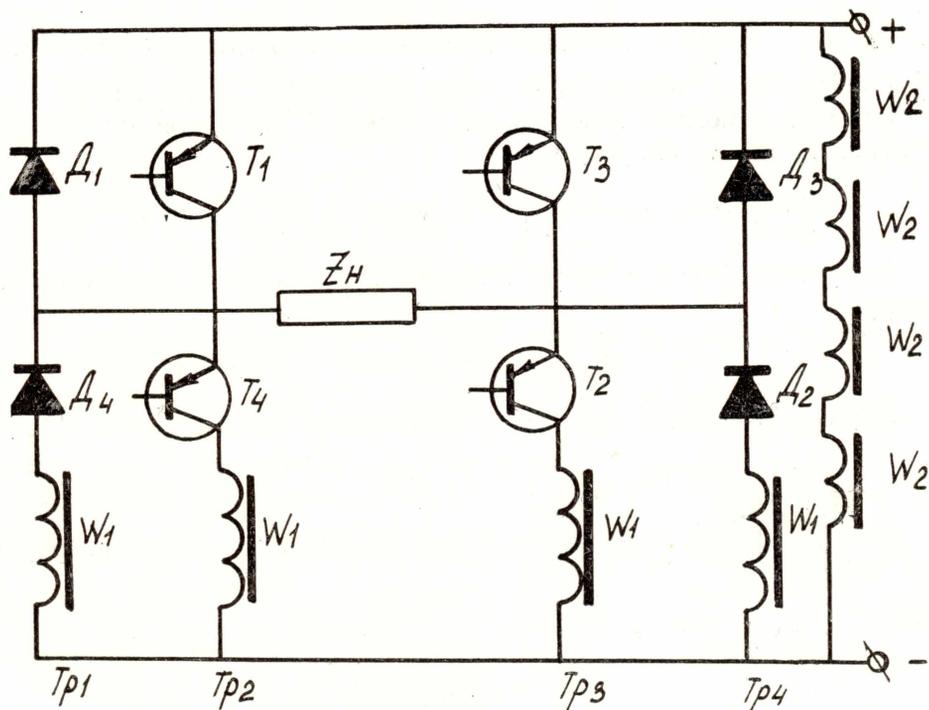


Рис. 1 б. Принципиальная схема для одной фазы.

чтобы включение ключей происходило при определенном значении входного сигнала

$$\Delta i_{\text{вх}} \geq \Delta i \quad (2)$$

Зона нечувствительности обеспечивает минимальные потери холостого хода при отсутствии входного сигнала, так как все ключи инвертора при этом закрыты, и необходимую временную задержку при включении ключей, формирующих отрицательную полуволну тока. Величина пульсации тока может получиться как угодно малой, однако, при этом возрастает частота переключений и увеличиваются динамические потери в преобразователе. При увеличении величины Δi повышается эффективное значение тока и возрастают потери в меди двигателя. В [2, 4] указывается оптимальная величина пульсации тока, не превышающая $(20 + 30)\%$ от номинального.

Для снижения средней частоты переключения ключей целесообразно последовательно с обмотками статора включать дополнительные индуктивности.

При включении в качестве нагрузки трехфазного асинхронного гиродвигателя необходимы три схемы рис. 1,б, которые должны управляться синусоидальным напряжением со сдвигом фаз $\pm \frac{2\pi}{3}$.

Эквивалентное входное сопротивление исследуемого асинхронного двигателя, работающего с постоянным абсолютным скольжением ($\beta_{\text{опт}}$) и потоком (Φ), не превышающим $(0,7-0,8)$ от номинального, линейно зависит от частоты.

Выделяя вещественную часть входного сопротивления $R_{\text{вх}} = K\alpha$ (здесь K — коэффициент пропорциональности, определяемый через параметры двигателя, а $\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}}$ — относительная частота статора), находим закон изменения тока в цепи нагрузки в промежуток времени от t_0 до t_1 .

$$i(t) = \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (3)$$

Здесь $\tau = \frac{L_{\text{экв}}}{R_{\text{вх}}}$ — эквивалентная электромагнитная постоянная времени асинхронного гиродвигателя при постоянном скольжении.

Очевидно, момент выключения в точке 1 определяется при равенстве экспоненты (3) и синусоиды

$$\frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = I_m \sin \omega t + \frac{\Delta t}{2}. \quad (4)$$

На участке от 1 до точки 2 ключи закрыты, ток нагрузки спадает по закону

$$i(t) = -\frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + I_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (5)$$

Момент включения в точке 2 найдется решением

$$-\frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + I_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = J_m \sin \omega t - \frac{\Delta t}{2}. \quad (6)$$

Искомая форма тока описывается в общем случае системой трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned} \text{для } t > t_{2\pi-2} \quad i(t_{2\pi-2}) \exp\left(-\frac{t-t_{2\pi-2}}{\tau}\right) + \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_{2\pi-2}}{\tau}\right) \right] = \\ = J_m \sin \omega t + \frac{\Delta i}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{для } t > t_{2\pi-1} \quad i(t_{2\pi-1}) \exp\left(-\frac{t-t_{2\pi-1}}{\tau}\right) - \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{вх}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_{2\pi-1}}{\tau}\right) \right] = \\ = J_m \sin \omega t + \frac{\Delta i}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i(t_{2\pi-1}) &= i(t_{2\pi-2}) \exp\left(\frac{t_{2\pi-1}-t_{2\pi-2}}{\tau}\right) + \frac{U_{\Pi}}{R_{\text{ВХ}}}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{2\pi-1}-t_{2\pi-2}}{\tau}\right)\right] \\
 i(t_{2\pi}) &= i(t_{2\pi-1}) \exp\left(-\frac{t_{2\pi}-t_{2\pi-1}}{\tau}\right) - \frac{U_{\Pi}}{R_{\text{ВХ}}}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{2\pi}-t_{2\pi-1}}{\tau}\right)\right] \\
 i(t_{2\pi-2}) &= C,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где $i_{2\pi}$ — искомые значения токов в моменты включения ключей;
 $i_{2\pi-1}$ — искомые значения токов в моменты выключения ключей.
 $t_{2\pi}$ и $t_{2\pi-1}$ — моменты включения и выключения ключей.

Система уравнений (7) решалась на ЦВМ «Проминь-М». Циклическая программа для решения (7) была добавлена командами, позволяющими вычислять значения косинусов в искомых точках. Решение велось с точностью до четвертого знака. Гармонический анализ производится разложением в ряды Фурье кривой тока, полученной на ЦВМ для различных параметров управления.

Зависимость частоты коммутации (пульсации) тока от параметров системы «инвертор — двигатель» находится из приближенного решения уравнения (3) и (5).

$$f_k = \frac{2U_{\Pi} + \Delta I R_{\text{ВХ}}}{4L_{\text{ЭКВ}} \Delta I} - \frac{I_m^2 (2L_{\text{ЭКВ}}^2 \omega_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ВХ}}^2)}{2\Delta I_{\text{ЭКВ}} (2U_{\Pi} + \Delta I R_{\text{ВХ}})}. \tag{8}$$

Здесь $L_{\text{ЭКВ}} = L_{\text{ВХ}} + L_{\text{ад}} + L_{\text{доп}}$ — индуктивность асинхронного двигателя, датчика тока и дополнительная индуктивность. В функциональную схему системы, кроме силовой схемы, выполненной либо на транзисторах, либо на тиристорах, и датчиков тока входят устройства сравнения мгновенных значений тока на шести триггерах, усилителей — формирователей импульсов управления и синусоидального задатчика частоты статора.

Выражение (7) берется за основу построения гироскопического привода с асинхронным двигателем. Частота переключения в этом случае выбирается из условия минимальных потерь в стали и меди статора и ротора от несинусоидального тока.

Для проверки приведенных выкладок был собран макет на транзисторах типа П210 и проведены различные испытания. Номинальная мощность макета 1000 *ва*, номинальное выходное напряжение 127/40 *в*, выходная частота изменяется от 0 до 1000 *гц* как в одном, так и в другом направлениях, стабильность частоты $f_{\text{ВЫХ}} = 500 \text{ гц} \pm 0,005\%$.

Закон изменения частоты — линейный или экспоненциальный, стабильность тока в номинальном режиме 0,2%; величина нелинейных искажений без дополнительных фильтров не превышала 14%, коэффициент нелинейных искажений по току при включении на выход конденсаторов 10 *мкф* на фазу не превышал 2%, по напряжению 2,5%. Макет питается от напряжения сети 220 *в* 400 *гц*, к. п. д. в номинальном режиме 0,65. Нагрузка может изменяться от 0 до номинальной, холостой ход преобразователя допускается. Вес экспериментального макета менее 30 *кг*.

Кроме частотного пуска возможно осуществить прямой пуск на любой частоте нагрузки с мощностью до 600 *вт*.

На рис. 2,б,в приведены осциллограммы тока преобразователя без фильтров при $f = 5$ и 500 *гц* и напряжения при $f = 50 \text{ гц}$.

Экспериментальные исследования проводились с гидродвигателем $J = 2,6 \text{ г см сек}^2$, $f_{1N} = 1000 \text{ гц}$, $U_{1N} = 36 \text{ в}$ в режиме реверсивного управления. Измерялись следующие параметры:

- а) время реверса (разгона и торможения) при частотах $\pm 500 \text{ гц}$;
- б) температура перегрева двигателя;
- в) коэффициенты нелинейного искажения по току и напряжению.

Результаты, полученные при испытании системы «преобразователь — гидродвигатель», сведены в табл. 2. Все параметры управления реверсиро-

Таблица 1

№ п. п.	Параметры	Режим работы							Оптимальное частотное управление		
		прямое включение в сеть			линейное частотное управление						
1	Ток нагрузки [а]	4	2,5	1,1	2,5	1,3	0,75	0,63	1,1÷0,75	0,9÷0,63	0,63
2	Время разгона t_n (сек.)	280	340	480	82	121	139	126	86	68	47
3	Время торможения t (сек)	5400	5900	6800	120	190	260	230	200	210	—
4	Выходное напряжение [в]	—	—	—	—	—	20,5	24	20,51	24	54
5	Температура перегрева [°C]	22	18	18	18	18	16	15	16	15	—
6	Коэффициент нелинейных искажений по току [%]	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	—
7	Коэффициент нелинейных искажений по напряжений [%]	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	2,5	2,5	—

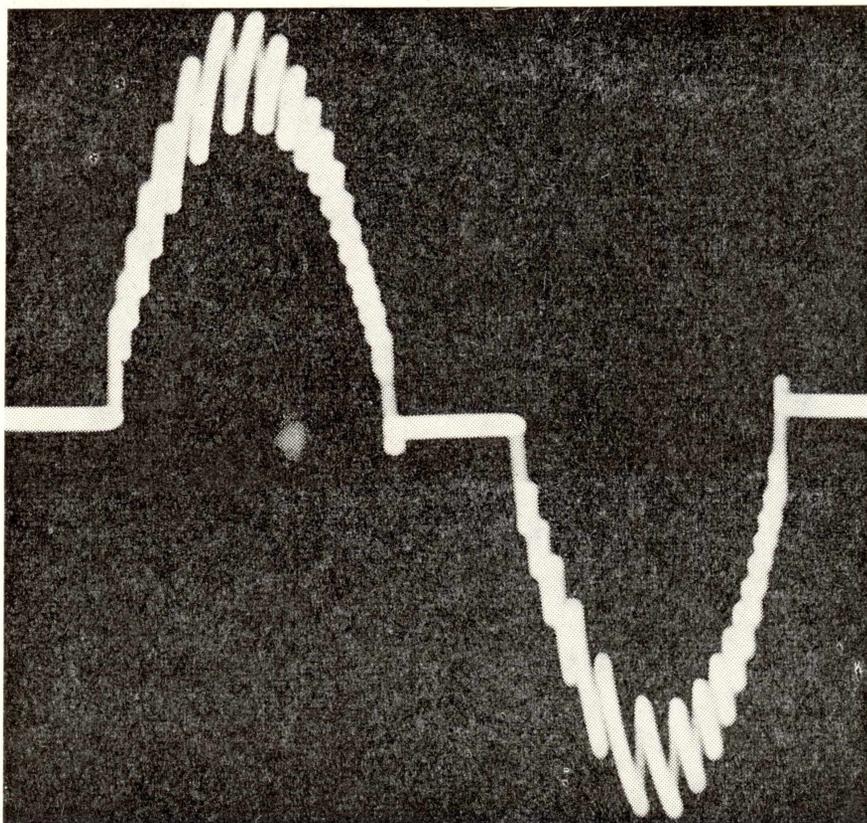


Рис. 2а. Осциллограмма тока нагрузки при $f=5$ гц.

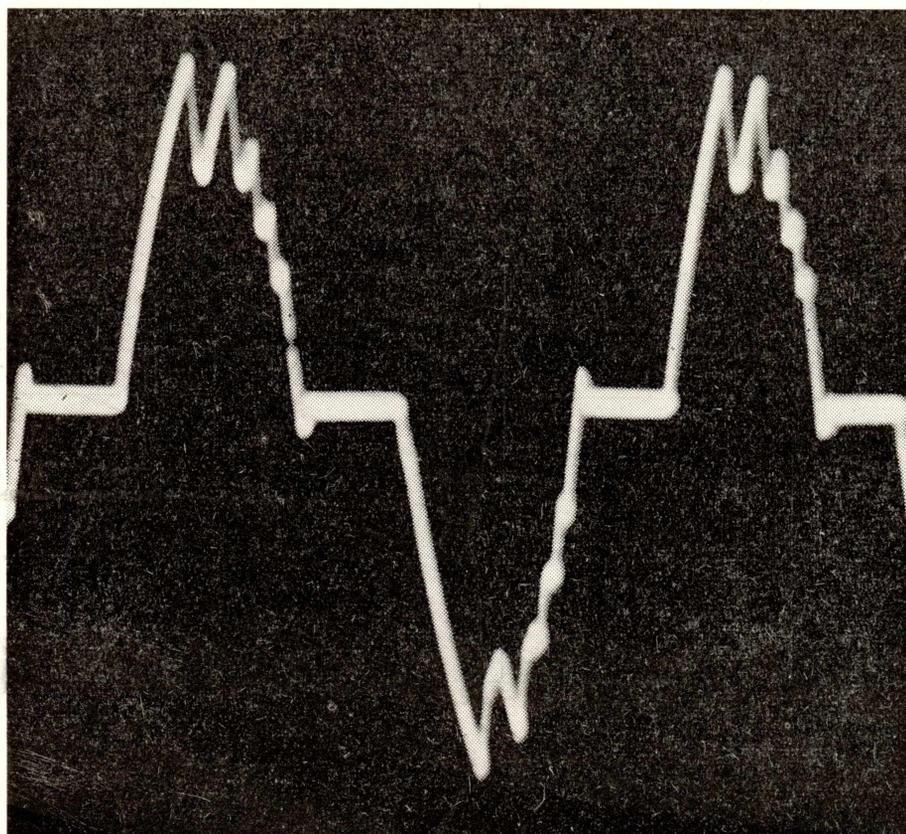


Рис. 2б. Осциллограмма тока нагрузки при $f=500$ гц.

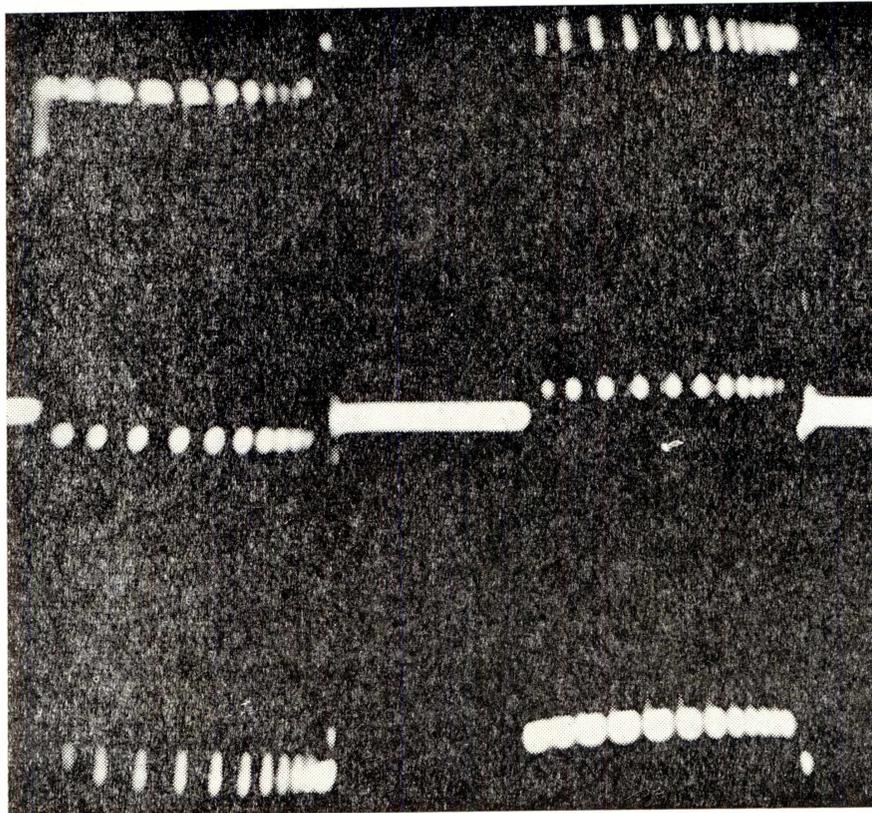


Рис. 2в. Осциллограмма напряжения на нагрузке при $f=50$ гц.

ванием приведены для оптимального закона частоты с перенастройкой величины тока статора. Время реверса измерялось как две составляющие: генераторное торможение от номинальной скорости до нуля t_m и пуска в противоположную сторону от нуля до номинальной t_p . Кроме того, в таблице приведено время первого пуска $t_{п}$, которое во всех случаях меньше, так как двигатель не был перегрет пусковыми токами. В табл. 2 приведено время установившегося режима t_N и количество циклов $N_{ц}$.

Таблица 2

Время отдельных участков работы гиродвигателя (сек)	$t_{п}$	t_N	t_T	t_p	$N_{ц}$	$t_{п}$	t_N	t_T	t_p	$N_{ц}$	$t_{п}$	t_N	t_T	t_p	$N_{ц}$
	86	240	240	95	14	86	1200	240	95	7	68	1200	280	77	7
Температура окружающей среды $T_{окр}$ [$^{\circ}C$]	26 40 50					40 50					40 50				
Средняя температура перегрева $\tau^{\circ}C$	22 32 38					22 26					16 17				
Ток статора при разгоне [а]	0,9 ÷ 0,75					0,9 ÷ 0,75					0,65				
Ток статора при торможении [а]	1,2					1,2					0,9				

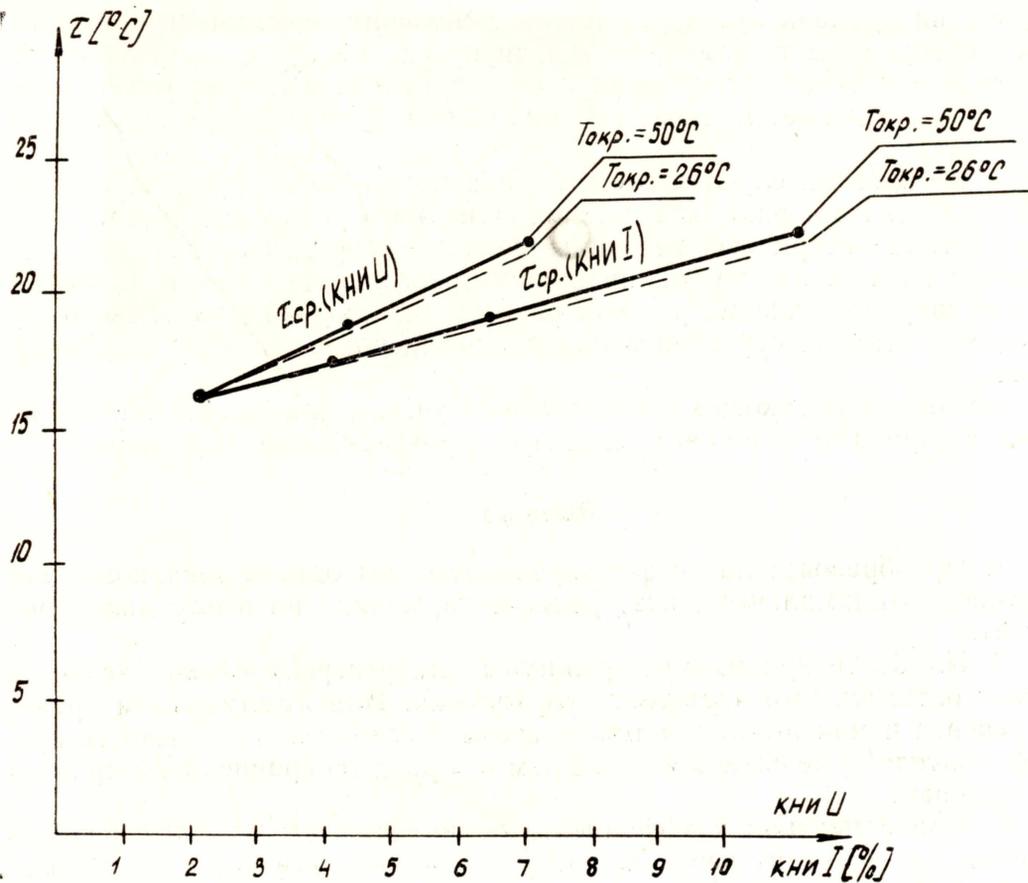


Рис. 3. Зависимость перегрева от коэффициента нелинейных искажений.

Из табл. 2 видно, что минимальный перегрев установился при последней цикличности при времени установившегося режима 20 мин. времени реверса около 6 мин. При этом температура перегрева составила $16 \pm 17^\circ \text{C}$. При увеличении времени установившегося режима уменьшается температура перегрева, однако, увеличивать более 30 мин это время нецелесообразно.

Для оптимального режима управления при различной температуре окружающей среды $T_{окр}$ снимались зависимости температуры перегрева гиродвигателя от величины коэффициента нелинейных искажений по току и напряжению рис. 3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением коэффициента нелинейных искажений $2 \div 11\%$ температура перегрева увеличивается приблизительно одинаково независимо от температуры окружающей среды. При дальнейшем увеличении КНИ перегрев растет по экспоненте. При этом искажения по току меньше влияют на перегрев, чем искажения по напряжению.

Кроме решенной задачи, решался вопрос оптимального пуска из условия минимального времени. Для этого были проведены расчеты для форсированного пуска методом графического интегрирования динамического момента по времени и определены потери. Расчетные данные совпали с экспериментальными. Причем, время для второго и третьего режимов получилось меньше (соответственно 59 сек. вместо 82 сек. и 35 сек. вместо 47 сек.), однако при этом расчетный перегрев превышал экспериментальный на $4 \div 5^\circ \text{C}$.

Определена установленная мощность преобразователя и сравнительная оценка потерь энергии в различных режимах управления. При оптимальном частотном пуске электрические потери уменьшаются в 3,27 раза, а время пуска двигателя сокращается по сравнению с прямым пуском в 10 раз.

Следует иметь в виду, что во многих практических случаях задача минимизации времени пуска решается с большим числом ограничений. Так, следует учесть влияние времени пуска на состояние готовности прибора, зависящей от установившейся температуры, которая в свою очередь определяется тепловой постоянной времени и потребляемой мощностью.

В конкретных случаях такая задача может быть решена при условии равенства времени установления теплового режима и пуска.

Система «вторичный источник питания — гиродвигатель» проектируется в этом случае на заданное время разгона. Не менее важным является вопрос о влиянии режима разгона на изменение начального положения главной оси гироскопа, на поведение этой оси в процессе пуска.

Ограничения такого вида могут быть учтены при исследовании системы «вторичный источник питания — гиродвигатель — гироскоп».

Выводы

1. Преобразователь с формированием выходного тока позволяет получить минимальный коэффициент гармоник по всему диапазону частот.

2. Наиболее приемлемым режимом для реверсирования является режим оптимального частотного управления. При минимальном времени реверса и максимальном токе статора установленная мощность преобразователя уменьшается более чем в 3 раза по сравнению с прямым включением.

4. При изменении коэффициента нелинейных искажений $2 \div 11\%$ в сторону увеличения перегрев ротора также увеличивается (приблизительно $0,8^\circ\text{C}$ на 1% КНИ), стремясь к установившемуся значению в области КНИ-15 \div 32%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Азаров, В. И. Иванчура, Б. П. Соустин. Исследование гармонического состава выходного напряжения инвертора. Сб. докладов научно-технической конференции АН УССР, институт электродинамики. Киев, 1969.

2. И. Ф. Калинин, Б. П. Соустин. Замкнутая система формирования кривой тока инвертора, Сборник «Устройства преобразовательной техники», Киев, 1969.

3. С. И. Волков, И. Ф. Калинин, Б. П. Соустин. Исследование замкнутой системы регулирования скорости и момента асинхронного двигателя, тезисы докладов XXII научно-технической конференции. ЛИАП, Ленинград, 1969.

4. В. Н. Бродский, Е. С. Иванов. Бесконтактный электропривод с частотно-токовым управлением для замкнутых систем регулирования. Электричество, № 10, 1967.

5. И. Ф. Калинин, Б. П. Соустин. Оптимальный по быстродействию разгон асинхронного гидроэлектродвигателя. Труды V научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Томск, 1967.