

На реальном объекте весовые коэффициенты РНС, представляющие модель привода, определяются непосредственно в процессе работы привода с использованием алгоритмов обучения РНС и показаний от датчиков, установленных на приводе. В этом случае при определении весовых коэффициентов РНС всегда существует ошибка, зависящая от ошибок измерений датчиками, ошибок обучения РНС и нелинейности ТЭПТ (даже в течение короткого промежутка времени). Данное обстоятельство при идентификации внутренних параметров привода приводит к ошибкам, для снижения которых искомые внутренние параметры привода могут быть определены с учетом всех уравнений системы (8) либо (9) численным методом с минимизацией суммарной квадратичной ошибки для всех уравнений системы.

**Выводы.** 1. Приведенные в табл. 2 результаты подтверждают правильность полученных выше выражений для расчета внутренних параметров привода из значений весовых коэффициентов РНС.

2. Погрешность расчета параметров ТЭПТ по приведенным в статье выражениям из известных с точностью пяти значащих цифр весовых коэффициентов РНС1 и РНС2 не превышает 0,03%.

1. Буякин В.М. Двухконтурная система нейрорегулирования электроприводом с нейросамонастройкой // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* — 2006. — № 8-9. — С. 90—94.

2. Денисов А.И., Денисов Ю.А. Современное состояние и перспективы развития электропривода // *Техн. электродинамика.* Тем. вып. "Проблемы современной электротехники". Ч. 6. — 2006. — С. 46—48.

3. Орловский И.А. Идентификация момента инерции и момента сопротивления в электроприводе постоянного тока // *Радиоэлектроника, информатика, управление.* — 2005. — № 1. — С. 140—144.

4. Орловский И.А. Модель электропривода постоянного тока на рекуррентных нейронных сетях // *Радиоэлектроника, информатика, управление.* — 2006. — № 1. — С. 151—159.

5. Палис Ф., Филаретов В.Ф., Цепковский Ю.А. и др. Синтез прогнозирующих систем с нейрофазными сетями для управления нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами. *Электромашинностроительство та електрообладнання.* — К.: Техніка. 2006. — Вып. 66. — С. 357—360.

6. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. — М.: Энергоатомиздат. 1988. — 304 с.

7. Сисюк Г.Ю., Родькин Д.П., Королев Ю.Г. К вопросу об идентификации параметров тиристорных электроприводов постоянного тока на основе моделей энергообразования // *Проблемы создания новых машин и технологий.* Науч. тр. КГПИ. — Кременчуг. — 1999. — № 2. — С. 47—50.

8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс". 2006. — 1104 с.

9. Baruch I.S., Flores J.M., Garrido R. A fuzzy neural recurrent multi-model for systems identification and control // *Proceeding of the European Control Conference.* — 2001. — P. 3540—3545.

10. Baruch I.S., Palacios I., Flores J.M., Garrido R. An adaptive neural control system of a DC motor drive // *15<sup>th</sup> Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control.* Barcelona, Spain. — 2002. Session Slot: T-Th-Mo4. Area Code: 3a.

Надійшла 21.12.2006

УДК 621.316.728.016.25

В.С.Федій, докт.техн.наук, С.Г.Наместник, канд.техн.наук (Ин-т электродинаміки НАН України, Київ)

## Исследование трехфазного вентильно-реакторного источника реактивной мощности (ИРМ) в индуктивном и емкостном режимах

*Исследовано вплив частоти і фази імпульсів управління в трифазному ІРМ на основі послідовного RLC-контуру і вентильного комутатора, циклічно переключаючого індуктивність цього контуру на відстаючу фазу живильної мережі, на величину основної гармоніки і несинусоїдальність струму мережі (при роботі в індуктивному і емкостному режимах).*

*Досліджено вплив частоти і фази імпульсів керування в трифазному ДРП на основі послідовного RLC-контуру і вентильного комутатора, що циклічно переключає індуктивність цього контуру на відстаючу фазу мережі живлення, на величину основної гармоніки струму та несинусоїдальність струму мережі (при роботі в індуктивному та емкостному режимах).*

© Федій В.С., Наместник С.Г., 2007

Целью данной статьи является анализ регулировочных свойств вентиляльно-реакторного ИРМ и построение оптимальных регулировочных характеристик, обеспечивающих, подобно вращающимся синхронным компенсаторам, требуемые диапазоны плавного изменения мощности как в индуктивном, так и в емкостном режимах работы, а также приемлемый уровень напряжения на емкостях, входящих в силовую схему ИРМ, приведенную в [1].

В случае трехфазной питающей сети и контура без потерь в [1] было получено выражение основной гармоники тока (в отн. ед.), потребляемой из сети

$$I_{C(0)}^* = \left\{ -jv^2 / (v^2 - 1) \right\} \times$$

$$\times \left\{ \frac{\sqrt{3} \left[ \cos(v\omega_1/f_y) - \cos(\omega_1/f_y) \right]}{(v^2 - 1) \left[ \cos(\pi/3 - \omega_1/f_y) - 0,5 \cos(v\omega_1/f_y) \right] \omega_1/f_y} + 1 \right\} e^{j\Psi_0}, \quad (1)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi/T_1$  — угловая частота питающей сети;  $\Psi_0$  — начальная фаза напряжения в момент включения ИРМ;  $v = \omega_0/\omega_1$  — относительная резонансная частота RLC-контура;  $f_y = \Omega/2\pi$  — угловая частота импульсов управления.

В качестве базовых единиц при проведении анализа принимались угловая частота сети  $\omega_1$ , амплитудные значения фазного напряжения сети  $U_m$  и тока прямого включения емкости на фазное напряжение  $I_{пр} = U_m/X_C$ .

Наиболее удобным является рассмотрение регулировочных характеристик совместно с кривыми зависимости коэффициента гармоник сетевого

$$\text{тока } k_{Гг} = \left\{ \left[ \sum_{S \neq 0}^{\pm \infty} \left[ I_{C(S)}^* \right]^2 \right]^{0,5} / I_{C(0)}^* \right\} \cdot 100\% \text{ от частоты,}$$

а в качестве рабочих участков этих характеристик выбрать такие, для которых  $k_{Гг} \leq 100\%$ . При этом возможны два основных случая:

**1 случай.** Величина основной гармоники сетевого тока (в режиме полинальной реактивной мощности на зажимах ИРМ) выбирается равной току емкости при ее непосредственном включении на фазное напряжение сети (т.е.  $I_{C(0)ном} = U_m/X_C$  или в относительных единицах

$$I_{C(0)ном}^* = I_{C(0)ном} / I_{пр} = \pm 1).$$

Типичная регулировочная характеристика для этого случая приведена на рис. 1, где положительным значениям  $I_{C(0)}^*$  соответствует режим потребления реактивной мощности, отрицательным — режим генерирования. Изменяя частоту управления вентилями коммутатора, можно плавно регулировать величину реактивной мощности на

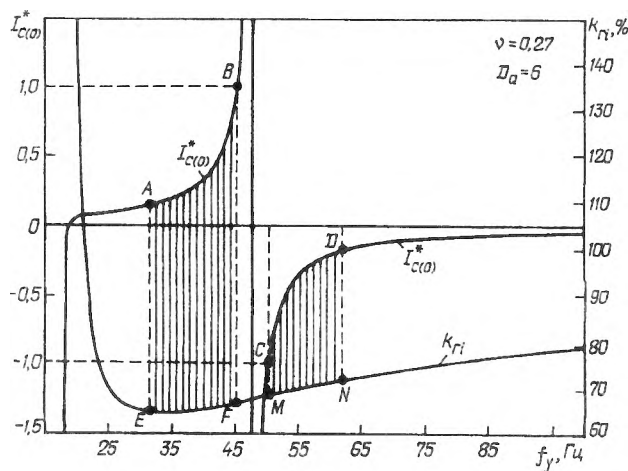


Рис. 1

зажимах ИРМ, а также изменять ее знак (т.е. режим работы ИРМ).

Исходной при определении рабочего участка регулировочной характеристики (в режиме потребления) принята точка *A*, которой соответствует минимальное значение коэффициента гармоник сетевого тока  $k_{Гг}$  (точка *E*), равнос 64,39%, а также минимальное значение тока основной гармоники (для принятого в качестве примера значения диапазона регулирования реактивной мощности  $D_Q = Q_{ном}/Q_{мин} = 6$ ) оно составит  $I_{C(0)мин}^* = I_{C(0)ном}^* / D_Q = 1/6$ . Увеличиваем частоту управления, пока ток основной гармоники не возрастет до величины  $I_{C(0)}^* = +1$  (точка *B*) (т.е. до значения, соответствующего принятому диапазону регулирования  $I_{C(0)ном}^* = I_{C(0)мин}^* \cdot D_Q = 0,167 \cdot 6 = +1$ . Частота управления при этом увеличится до значения  $f_{y, макс} = 45,35$  Гц, а также несколько возрастет коэффициент гармоник — до 66,85%.

При дальнейшем увеличении частоты управления происходит разрыв регулировочной характеристики (вертикальная линия на рис. 1 при  $f_y = 47,82$  Гц) и переход к режиму генерирования ( $I_{C(0)}^* < 0$ ). С ростом параметра  $v$  кривые  $k_{Гг} = \gamma(f_y)$  сдвигаются вправо, а минимальное значение  $k_{Гг, мин}$  (в точке *E*) увеличивается (рис. 1, 2).

Рабочая область для режима генерирования определяется несколько иначе. Исходной точкой при ее построении будет значение  $I_{C(0)ном}^* = -1$  (точка *C*), которой соответствует коэффициент гармоник 68,22% (точка *M*) и частота управления 50,29 Гц. Точка *C* соответствует режиму номинальной мощности ИРМ ( $Q_{ном}$ ). В отличие от режима потребления увеличение частоты управления (в режиме генерирования) приводит к уменьшению тока основной гармоники (а значит, и мощности на зажимах ИРМ). Уменьшив этот ток в  $D_Q = 6$  раз (точка *D*), получим значение частоты  $f_{y, макс} = 62,45$  Гц. Как и в режиме потребления, с ростом частоты управления уровень гармоник в кривой сетевого

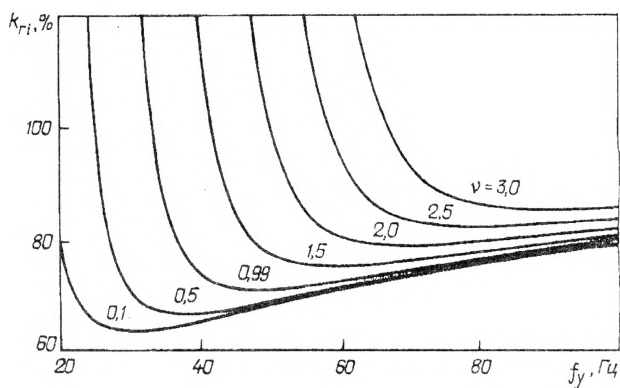


Рис. 2

тока несколько возрастает — с 68,22% до 71,43% (точка  $N$ ). Необходимо отметить, что диапазон регулирования частоты управления  $D_f$  при изменении мощности ИРМ (от минимальной до номинальной или наоборот) небольшой и равен 1,38 (режим потребления) и 1,24 (режим генерирования).

Характерной особенностью регулировочной характеристики в режиме генерирования является то, что с ростом частоты ( $f_y \rightarrow \infty$ ) она асимптотически приближается к нулю (не пересекая при этом ось абсцисс, как это имеет место в режиме потребления) и мало зависит от параметра  $\nu$ . При любом значении  $\nu$  кривая  $I_{C(0)}^* = \Psi(f_y)$  всегда пересекает точку  $I_{C(0)}^* = -1$  и соответствующим увеличением частоты управления этот ток можно снизить в  $D_Q$  раз, т.е. обеспечить требуемый диапазон регулирования. Однако для режима потребления такой закономерности не наблюдается. На рис. 3 приведены графики, иллюстрирующие влияние относительной резонансной частоты  $\nu$  на диапазон регулирования  $D_Q$ , значения частот управления и коэффициентов гармоник в начале и конце рабочего участка регулировочной характеристики. Наиболее сильно влияет параметр  $\nu$  на значение диапазона регулирования  $D_Q$ , слабо — на  $f_y$  и  $k_{ГГ}$ . Из этих графиков следует, что для заданного  $D_Q = 6$  (пунктирная линия) резонансная частота  $RLC$ -контура должна быть равна 0,27. При значениях  $\nu > 0,27$  этот диапазон снижается и наоборот.

Основные параметры регулировочных характеристик (для заданных  $D_Q$  и  $\nu$ ) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Режим работы ИРМ	$Q_{\text{мин}}$			$Q_{\text{ном}}$			$\nu$	$D_Q$	$D_f$
	$f_y, \text{Гц}$	$I_{C(0)}^*$	$k_{ГГ}, \%$	$f_y, \text{Гц}$	$I_{C(0)}^*$	$k_{ГГ}, \%$			
потребление (уч. АВ)	32,90	0,167	64,39	45,35	+1	66,85	0,27	6	1,38
генерирование (уч. СД)	62,45	0,167	71,43	50,29	-1	68,22			1,24

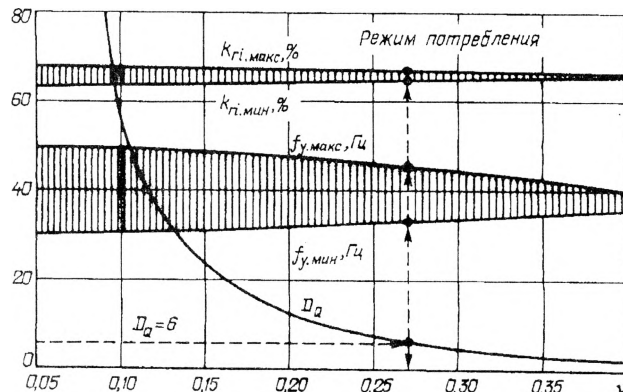


Рис. 3

При проектировании силовой схемы ИРМ и выборе коммутатора весьма актуальным является определение амплитуды напряжения на емкости  $u_{C_{\text{макс}}}^*$ , так как это напряжение, суммируясь с напряжением сети, прикладывается к неработающим в данный момент ключам коммутатора и определяет таким образом выбор их номинального напряжения. Для рассматриваемого случая ( $\nu = 0,27$ ) амплитуда напряжения на емкости весьма велика и составляет (при номинальной мощности ИРМ)  $1,516 U_m$  (режим потребления) и  $1,439 U_m$  (режим генерирования, рис. 4, 5), что не всегда приемлемо на практике.

**II случай.** Величина основной гармоники сетевого тока (в режиме номинальной реактивной мощности на зажимах ИРМ) выбирается меньше, чем ток емкости при ее непосредственном включении на фазное напряжение сети (т.е.  $|I_{C(0)\text{ном}}^*| < 1$ ).

Зависимости тока основной гармоники  $I_{C(0)}^*$  (в режиме номинальной реактивной мощности) и амплитуды напряжения на емкости  $u_{C_{\text{макс}}}^*$  показаны на рис. 4 (режим потребления) и 5 (режим генерирования). Задавая допустимый уровень напряжения на емкости, например,  $u_{C_{\text{макс}}}^* = 1,1$ , можно определить величину тока основной гармоники, составляющую в нашем примере  $0,72 I_{\text{баз}}$  и  $0,75$

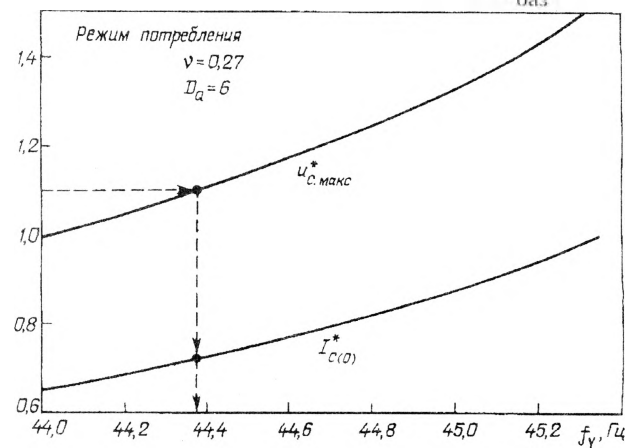


Рис. 4

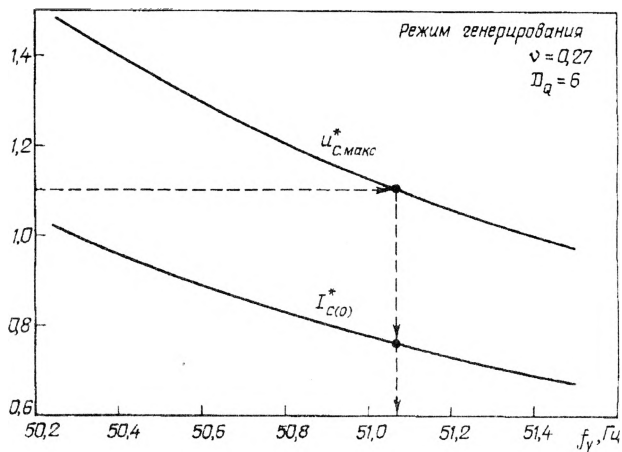


Рис. 5

$I_{баз}^*$ , а по графикам на рис. 1 — соответствующие значения частот управления и коэффициентов гармоник (табл. 2).

Таблица 2

Режим работы ИРМ	$Q_{мин}$			$Q_{ном}$			$v$	$D_Q$	$D_f$
	$f_y, Гц$	$I_{C(0)}^*$	$k_{Гр}, \%$	$f_y, Гц$	$I_{C(0)}^*$	$k_{Гр}, \%$			
потребление	27,38	0,120	66,28	44,38	0,719	66,59	0,27	6	1,62
генерирование	67,08	0,126	72,53	51,08	0,756	68,41			1,31

Сравнивая данные таблиц 1 и 2, можно заметить, что при снижении нагрузки емкости по току рабочие участки регулировочных характеристик сдвигаются **влево** (от 52,90—45,35 Гц до 27,38—44,38 Гц в режиме потребления) либо **вправо** (от 50,29—62,45 Гц до 51,08—67,08 Гц в режиме генерирования), коэффициенты гармоник практически не изменяются, а диапазоны регулирования частоты  $D_f$  несколько возрастают — с 1,38 до 1,62 (режим потребления) и с 1,24 до 1,31 (режим гене-

рирования). Значения токов на границах участков регулировочных характеристик в обоих режимах близки друг к другу (0,120 и 0,126; 0,719 и 0,756), а для большего совпадения этих значений (при необходимости "симметрирования" регулировочных характеристик) можно скорректировать на небольшую величину параметр  $v$ .

Начальная фаза ( $\Psi_0$ ) импульсов управления входит только в выражение для определения величины вынужденного напряжения на емкости ( $U_{Cem}^*$ ) [2] и не сказывается на величине комплексной амплитуды основной гармоники (см. формулу (1), а вызывает только поворот вектора  $I_{C(0)}^*$  на угол  $\Psi_0$ .

**Выводы.** 1. ИРМ на основе последовательного  $RLC$ -контура и коммутатора, циклически переключающего индуктивность этого контура на отстающую фазу трехфазной питающей сети, позволяет плавно регулировать в требуемом диапазоне величину потребляемого из сети (генерируемого в сеть) реактивного тока.

2. Амплитуда основной гармоники тока на входе ИРМ зависит от резонансной частоты контура и частоты импульсов управления ключами коммутатора и стремится к нулю по мере увеличения частоты управления ключами.

3. Фаза импульсов управления ключами коммутаторов не влияет на амплитуду основной гармоники сетевого тока.

1. Федий В.С., Наместник С.Г. Регулировочные характеристики трехфазного вентильно-реакторного источника реактивной мощности (ИРМ) // Техн.электродинамика. — 2006. — № 4. — С. 22—27.

2. Федий В.С., Соболев В.Н. Электромагнитные процессы в многофазных электрических цепях с последовательными  $RLC$ -контурами и коммутаторами // Электротехника. — 2002. — № 8. — С. 43—49.

Надійшла 08.02.2007