

# Источник бесперебойного электропитания

## на основе стабилизированного обратимого преобразователя и регулятора мощности

Гурген Барегамян,  
д. т. н., профессор

Варздат Маргарян,  
к. т. н.

### Введение

Сети электропитания часто подвергаются воздействию дестабилизирующих факторов и поэтому, как правило, не обеспечивают должного качества электроэнергии. Обычно типовыми аномалиями электропитания являются пониженное напряжение, импульсные перенапряжения, электромагнитные помехи, несанкционированные отключения электропитания и повышенное напряжение.

Ответственные потребители, не допускающие аномалии в электропитании, в настоящее время имеют практически во всех областях хозяйства: в энергетике, транспорте, связи, медицине, атомной, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности и др. Бесперебойное и качественное электропитание ответственных потребителей обычно организуют системами гарантированного энергоснабжения, основными компонентами которых являются источники бесперебойного питания (ИБП).

Сегодня в мире серийно выпускаются всевозможные ИБП [1, 2], отличающиеся друг от друга по схемам преобразования, типу используемых вентилях, качеству преобразованной электроэнергии, конструкции, параметрам и т. д. Среди такого разнообразия особую роль играют транзисторные ИБП мощностью от единиц до десятков киловатт, пользующиеся большим спросом. Однако вопросы, связанные с оптимизацией структур и схем таких ИБП, расширением их функциональных возможностей, повышением качества вырабатываемой электроэнергии и технико-экономических показателей, постоянно находятся в поле зрения разработчиков. Данная работа посвящена исследованию и обоснованию перспективности структуры ИБП на основе обратимого преобразователя, в котором питание осуществляется от сети через тиристорно-дрессельный регулятор мощности (РМ), что позволяет регулировать передаваемую в нагрузку мощность.

### Анализ структуры ИБП

Анализ распространенных структур ИБП показывает, что почти во всех них имеется некоторая избыточность, обусловленная, в основном, стремлением обеспечить высокую надежность питания ответственных потребителей или уменьшение времени перерыва в снабжении [3]. Однако в них имеется избыточность и иного характера, связанная с наличием отдельного зарядного выпрямителя (ЗВ), что в большинстве случаев необоснованно и неэкономично. Поэтому в последние годы нередко встречаются ИБП с многофункциональными преобразователями, выполняющие функции как инвертирования, так и выпрямления. Преобразователи этого класса известны в электротехнике как «обратимые» (ОП). Простейшая структура ИБП с ОП приведена на рис. 1 [3, 4]. В ней основное питание нагрузки (Н) осуществляется от сети через статический переключатель (СП), а ОП работает в выпрямительном режиме, заряжая (подзаряжая) аккумуляторную батарею (АБ). В случаях исчезновения напряжения сети или недопустимых отклонений его параметров ОП переходит в инверторный режим и осуществляет питание преобразованным током АБ.

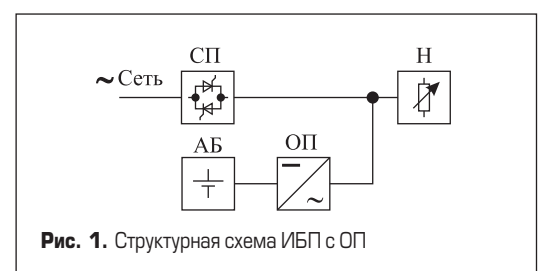


Рис. 1. Структурная схема ИБП с ОП

Структура ИБП на базе ОП может выполнять также ряд других важных функций, таких как:

- предотвращение перенапряжений на нагрузке, вызванных авариями или грозовыми разрядами;

- улучшение показателей качества выходной электроэнергии;
- регулирование передаваемой нагрузке мощности путем изменения угла управления СП;
- работа в режиме компенсации (описана ниже).

Данная система неработоспособна лишь в случае, когда длительно сохраняются большие отклонения частоты сети от нормы. Если это допустимо, то применение данной структуры дает заметный выигрыш — экономии узла ЗВ со своим трансформатором. Кроме того, количество преобразований энергии в ней меньше, за счет чего снижаются потери мощности в длительном режиме работы.

Указанные ОП обычно регулируются с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), причем в них выходное напряжение модуляционного коммутатора не зависит от выходного тока. При любом токе изменением скважности ШИМ-импульсов можно установить любое выходное напряжение, не превышающее входное. Двусторонняя проводимость ключей позволяет не только установить ток любого знака, но и менять знак выходного напряжения.

В любом режиме работы ОП токи ключевых приборов определяются выходным током. При переходе из одного режима в другой меняется лишь распределение токов между транзистором и диодом ключа. Причем в инверторном режиме ток транзистора максимален, ток диода минимален; в выпрямительном режиме ток транзистора минимален, ток диода максимален.

Таким образом, по свойствам рассматриваемые ОП являются универсальными устройствами и обеспечивают работу в режимах инвертора, выпрямителя и др. Их классификация по назначению (инвертор, выпрямитель) имеет смысл лишь по выполняемой функции. В данных ОП направление передачи энергии может меняться простым способом, а именно, изменением задающего сигнала.

**Исследование структуры ИБП с РМ**

Как уже отмечалось, в рассматриваемой структуре ИБП по рис. 1 отсутствует ЗВ со своим трансформатором, что дает существенную экономию. Ее можно более усилить, если СП, выполняющему функцию переключения нагрузки от сети, придать функцию регулирования передаваемой нагрузке мощности и, тем самым, расширить функциональные возможности ИБП [4].

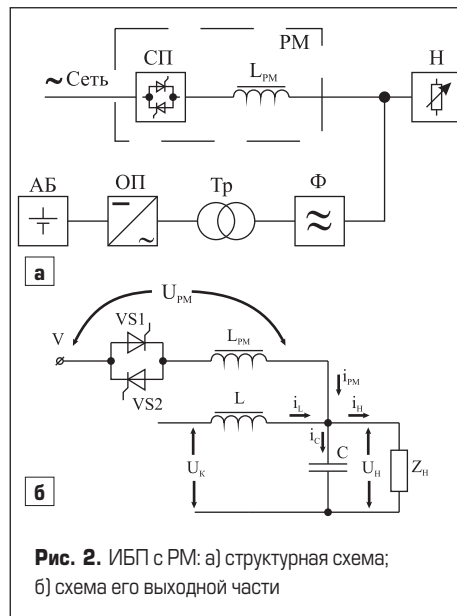
С этой целью в ИБП последовательно с СП достаточно включить дроссель (рис. 2). Последние совместно образуют широко известный в электронике тиристорно-дроссельный регулятор мощности [5], который наряду с функцией переключения нагрузки может выполнять также функцию регулирования мощности в цепи «ОП–Н».

Сущность режима компенсации состоит в следующем. Энергетический режим в системе «ОП–РМ–Н» можно задавать различным образом. Изменением угла управления

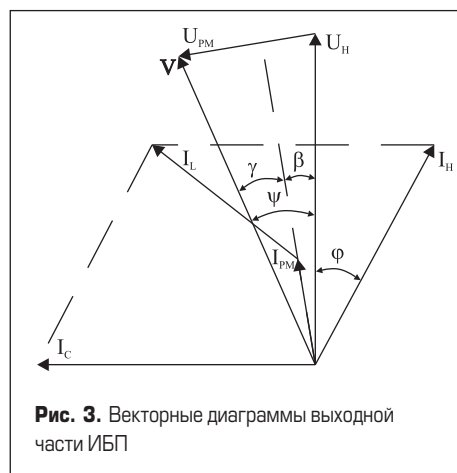
$\alpha$  ток РМ может плавно регулироваться; пропорционально регулируется и передаваемая мощность. При этом управлением РМ можно регулировать мощность АБ.

В случае когда параметры сети длительно находятся в допустимых пределах, можно установить такой угол управления РМ, чтобы потребляемая от сети средняя мощность покрывала активные мощности нагрузки и заряда АБ. Формирование синусоидального напряжения нагрузки при этом возлагается на ОП, работающий в инверторном режиме и обеспечивающий реактивные мощности нагрузки и РМ. Кроме того, дроссель РМ выполняет функцию низкочастотного фильтра.

При больших отклонениях параметров сети ИБП переходит в режим, при котором РМ отключен, а нагрузка питается от АБ через ОП, работающий в инверторном режиме. Важное значение имеют также переходные режимы, т. е. переходы между режимами компенсации (К) и инвертирования (И). Переход «И→К» обычно осуществляется в легких условиях, при которых опасные или аварийные процессы не возникают. Обратный переход «К→И» происходит обычно в аварийных условиях. При этом бесперебойность питания обеспечивается введением фиксированного фазового сдвига  $\psi$  между напряжениями сети



**Рис. 2.** ИБП с РМ: а) структурная схема; б) схема его выходной части



**Рис. 3.** Векторные диаграммы выходной части ИБП

и нагрузки и отдельным управлением тиристорами РМ.

Таким образом, рассматриваемая система обеспечивает выполнение всех перечисленных функций ИБП, кроме одного случая, когда длительно сохраняются большие отклонения частоты сети от нормы, а потребитель чувствителен к ее отклонениям. Особый интерес представляет случай, когда требуется только стабилизировать питание нагрузки и исключить кратковременные прерывания до автоматического повторного включения. При этом взамен АБ можно включать электролитические конденсаторы с согласованным по выходу уровнем напряжения, т. е. имеется возможность обойтись без силового трансформатора.

Анализ режима в схеме рис. 2 подробно приведен в [4]. На рис. 3 показаны векторные диаграммы схемы рис. 2 для эффективных значений основных гармоник. Напряжение нагрузки  $U_H$  отстает от напряжения сети  $V$  на фиксированный угол  $\psi$ , вследствие чего на РМ поддерживается напряжение  $U_{PM}$ . Ток РМ ( $I_{PM}$ ) отстает от  $U_{PM}$  на  $\pi/2$ , а ток  $I_L$  получается векторным суммированием токов нагрузки ( $I_H$ ), конденсатора ( $I_C$ ) и РМ.

Из векторной диаграммы для  $U_{PM}$  получается:

$$U_{PM} = \sqrt{U_H^2 - 2U_H V \cos\psi + V^2},$$

или, выражая относительными величинами, получим:

$$m = U_{PM}/U_H = \sqrt{1 - 2v \cos\psi + v^2}, \quad (1)$$

где  $v = V/U_H$ .

Закон изменения тока  $I_{PM}$  на интервале ( $\alpha, \pi - \alpha$ ) определяется интегралом

$$\begin{aligned} i_{PM}(\vartheta) &= \frac{1}{X_{PM}} \int_{\alpha}^{\vartheta} u_{PM}(\vartheta) d\vartheta = \\ &= \frac{mU_H}{X_{PM}} \int_{\alpha}^{\vartheta} \cos\vartheta d\vartheta = \\ &= \frac{m\sqrt{2}U_H}{X_{PM}} (\sin\vartheta - \sin\alpha), \end{aligned} \quad (2)$$

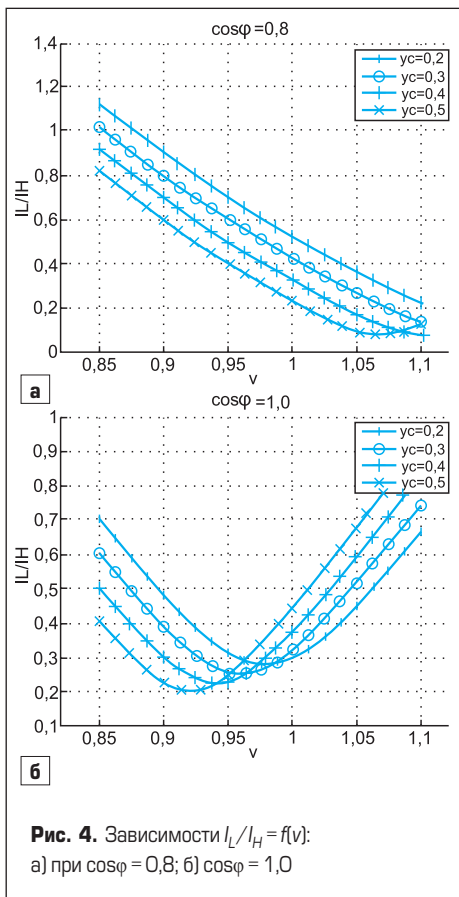
где отсчет угловой времени  $\vartheta = \omega t$  ведется с момента амплитуды  $u_{PM}$ .

На векторной диаграмме углы  $\beta$  и  $\gamma$  связаны с углом  $\psi$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \sin\beta &= (v \cos\psi - 1)/m, \\ \cos\beta &= v \sin\psi/m, \\ \sin\gamma &= (v - \cos\psi)/m, \\ \cos\gamma &= \sin\psi/m. \end{aligned}$$

Мощность, передаваемая от сети на выход, составит:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} i_{PM}(\vartheta) u_H(\vartheta) d\vartheta = \\ &= \frac{U_H^2 v \sin\psi}{X_{PM}} \left( 1 - \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right), \end{aligned} \quad (3)$$



а для относительной передаваемой мощности получаем

$$\bar{P}_{cp} = \frac{P_{cp}}{S_H} = \frac{v \sin \psi}{\bar{X}_{PM}} \left( 1 - \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right),$$

$$\bar{X}_{PM} = \frac{X_{PM}}{Z_H}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что для передачи нагрузке неизменной мощности с уменьшением напряжения сети  $V$  угол  $\alpha$  следует соответствующим образом уменьшить, и наоборот.

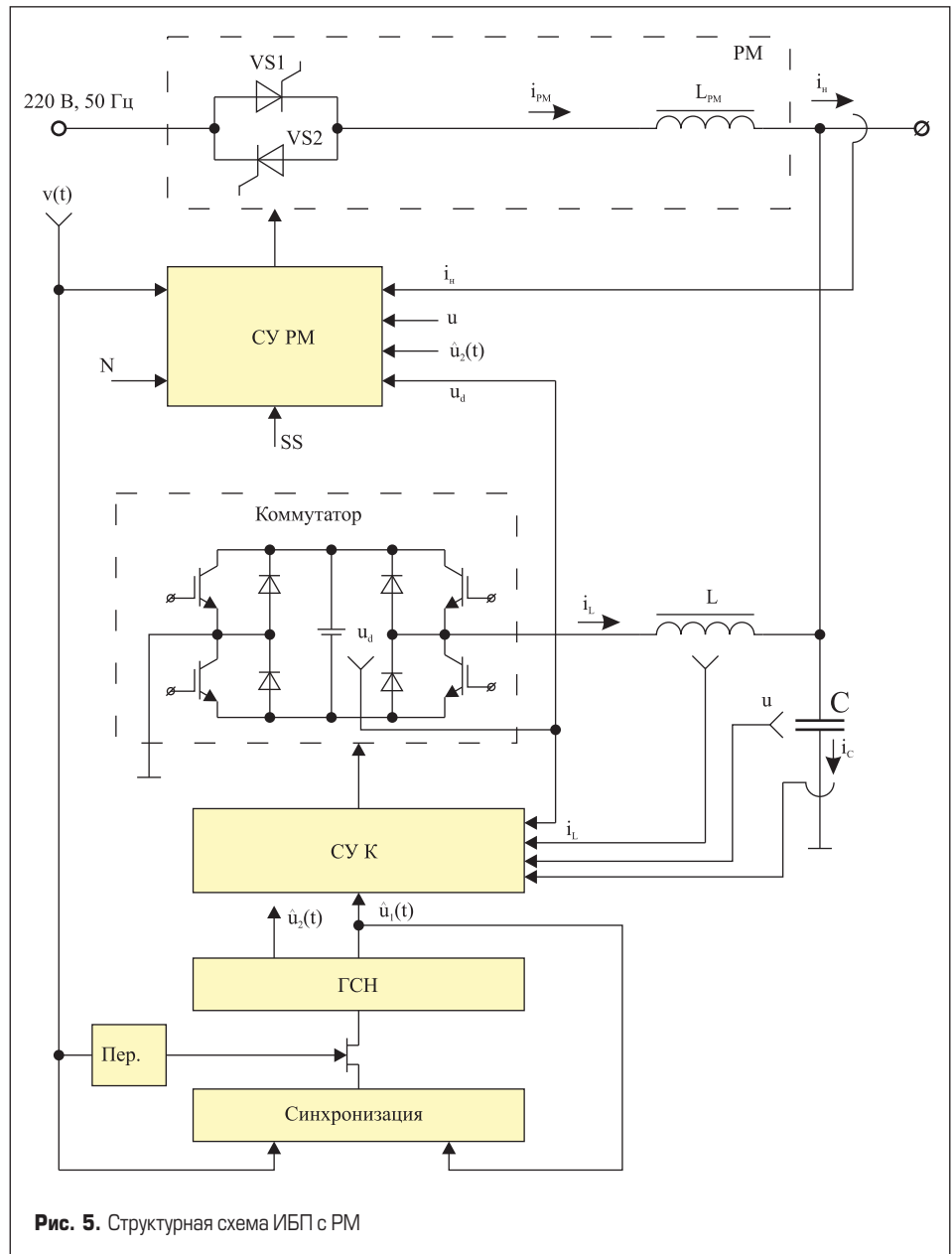
Параметры схемы выбираются из режима минимального напряжения сети и максимальной мощности нагрузки. В случае однофазной промышленной сети 220 В/50 Гц, согласно стандартам, имеем  $k_{min} = 0,85$  и  $k_{max} = 1,1$ . При этом задается минимальный (нулевой) угол управления  $\alpha$ .

Как следует из (1), напряжение  $U_{PM}$  достигает минимума при условии  $V = U_H \cos\psi$ , т. е.  $\cos\psi = k_{min}$ , и получается ограничение на угол  $\psi$ :  $\psi \leq 31,783$ .

Максимальная активная мощность нагрузки достигается при чисто активной нагрузке ( $\cos\varphi = 1$ ). Если также учесть режим заряда АБ, то мощность, передаваемая РМ, будет увеличиваться в  $k$  раз (при  $k = 1$  заряд отсутствует, при  $k = 1,05$ ,  $k = 1,1$  и  $k = 1,2$  имеет место заряд АБ соответственно 5, 10 и 20% от номинальной мощности нагрузки), т. е.  $\bar{P}_{cp} = k$ . При этом имеем  $\sin\psi/\bar{X}_{PM} \geq k/0,85 \approx 1,1765k$ .

Таблица 1. Значения параметров  $\psi$  и  $\bar{X}_{PM}$

$\bar{X}_{PM}$		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$\psi$ , град.	$k = 1,00$	3,37	6,76	10,16	13,61	17,11	20,67
	$k = 1,05$	3,54	7,1	10,68	14,3	17,99	21,75
	$k = 1,10$	3,71	7,44	11,19	15	18,88	22,84
	$k = 1,20$	4,05	8,12	12,23	16,4	20,67	25,06
Относительное изменение угла, %		≈20				≈21	



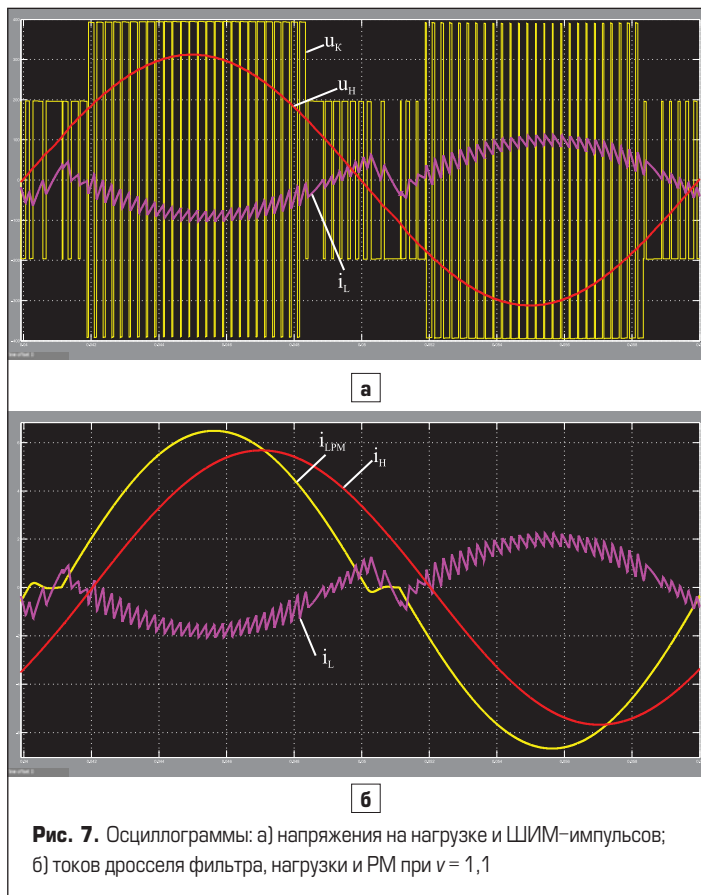
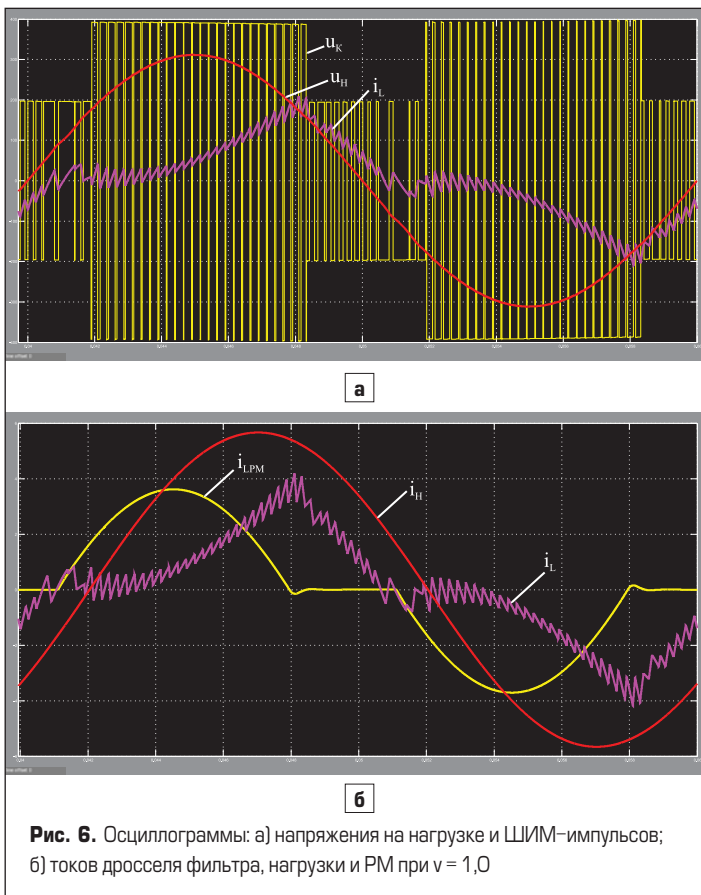
Удовлетворяющие этому условию значения параметров  $\psi$  и  $\bar{X}_{PM}$  приведены в таблице 1. Приемлемой парой параметров здесь можно считать параметры  $\psi = \pi/12$  и  $\bar{X}_{PM0} = 0,2$ .

В режиме компенсации, согласно векторной диаграмме рис. 3, ток  $I_L$  можно рассчитать по данному выражению (5) ( $\bar{y}_C = 2\pi f C Z_H$  — относительная проводимость конденсатора выходного фильтра на основной частоте).

На рис. 4 показаны зависимости  $I_L/I_H = f(v)$  для вышеуказанных параметров  $\psi$  и  $\bar{X}_{PM0}$ , а также для диапазона изменений параметров  $v = 0,85...1,1$  и  $\bar{y}_C = 0,2...0,5$ . Полученные результаты показывают, что коммутатор по току не перегружается, т. е. описанный здесь режим компенсации можно использовать без ухудшения характеристик ИБП.

На рис. 5 показана структурная схема ИБП с РМ. Транзисторный коммутатор управляется

$$I_L = I_H \sqrt{1 - 2\bar{y}_C \sin\varphi + \bar{y}_C^2 + \frac{2v_{мин}}{\bar{X}_{PM0} v} \times \frac{\cos\varphi}{(\cos\varphi)_{макс}} \left[ \bar{y}_C (v \cos\psi - 1) - v \sin(\psi + \varphi) + \sin\varphi \right] + \frac{(1 - 2v \cos\psi + v^2)}{\bar{X}_{PM0}^2} \left[ \frac{v_{мин}}{v} \frac{\cos\varphi}{(\cos\varphi)_{макс}} \right]^2}. \quad (5)$$



собственной системой управления, с помощью которой достигается такое слежение заданного сигнала  $\hat{u}_1(t)$ , чтобы выходное напряжение на нагрузке максимально приближалось к заданному  $u(t) \approx \hat{u}_1(t)$ . Для слежения используются обратные связи по сигналам  $u$ ,  $i_L$ ,  $i_C$  и  $u_H$ . СУ коммутатора построен по принципу вычисляемого прогноза [6], с помощью которого гарантируется качественное слежение напряжения на выходе.

Напряжение задания получается от генератора синусоидального напряжения (ГСН), которое синхронизируется с напряжением сети  $v(t)$ . Сигнал задания  $\hat{u}_1(t)$  (синусоидальное напряжение) отстает от первой гармоники сетевого напряжения ( $V_1$ ) на некоторый угол  $\psi$ , который в данном случае выбран равным  $\pi/12$ . От ГСН генерируется также ортогональный сигнал  $\hat{u}_2(t)$ .

С помощью моделирования системы получены осциллограммы напряжений и токов, показанные на рис. 6 и 7.

Из сравнения приведенных осциллограмм рис. 6 и рис. 7 очевидно, что при увеличении сетевого напряжения ток дросселя выходного фильтра инвертора меняет знак, т. е.

инвертор переходит в режим заряда АБ. Такого же результата можно достичь и при  $v = 0,85$ , соответственным образом меняя угол управления тиристоров РМ. Для наглядности процессов ток дросселя в осциллограммах рис. 6а и рис. 7а увеличен в 50 раз.

В таблице 2 сведены результаты расчетов характерных значений мощностей при трех граничных значениях сетевого напряжения и коэффициента мощности нагрузки. Как следует из результатов (табл. 2), в указанном диапазоне изменения параметров заданная активная мощность нагрузки изменяется в пределах  $-0,15$ – $+0,34\%$  от номинального, что свидетельствует о достаточно точной стабилизации мощности нагрузки.

**Закключение**

В ИБП с двумя режимами работы (инверторный, выпрямительный) с целью минимизации структуры и совмещения функций целесообразно:

- специального ЗВ не применять, а функцию заряда АБ возложить на инвертор, выполнив его обратимым;

- придать СП (выполняющему функцию переключения нагрузки от сети) функцию регулирования передаваемой нагрузке мощности.

Показано также, что в последнем случае коммутатор по току не перегружается, т. е. применение данного режима не приводит к ухудшению характеристик ИБП.

**Литература**

1. Исследование путей построения серии агрегатов бесперебойного электропитания для персональных ЭВМ: Отчет НИР. НПО «Транзистор». Ереван. 1990.
2. Адамия Г. Г., Беркович Е. И., Картавых А. С. и др. Статические агрегаты бесперебойного питания. М.: Энергоатомиздат. 1992.
3. Барегамян Г. В. Агрегат бесперебойного электропитания на основе многофункционального преобразователя и регулятора мощности // Энергия. Тбилиси. 2010. №4 (56).
4. Барегамян Г. В., Галустян Р. С., Айрапетян А. С. Исследование многофункционального агрегата бесперебойного питания // Моделирование, оптимизация, управление: Вестник ГИУА. Ереван. 2004. Вып. 7. № 2.
5. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженок И. М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа. 1980.
6. Барегамян Г. В. Оценка качества стабилизации синусоидального выходного напряжения ШИМ-инвертора с управлением по вычисляемому прогнозу // Вестник инженерной академии Армении (ВИАА). 2004. Т. 1. № 2.

**Таблица 2.** Активные мощности в ИБП при разных значениях сетевого напряжения и коэффициента мощности нагрузки при  $\alpha = 20^\circ$

Характерные мощности	v								
	cos φ = 0,6			cos φ = 0,8			cos φ = 1,0		
	0,85	1	1,1	0,85	1	1,1	0,85	1	1,1
$P_{нр}$ , Вт	528,1	528,9	530,5	705	705,1	707,4	883,6	883,6	886,6
$P_{сет}$ , Вт	47,9	469,5	999,4	47,3	468,1	999,6	45,1	460,5	992,5
$P_{АБ}$ , Вт	480,4	60,8	-466	657,9	238,4	-289	838,7	424,5	-103