

* * *

Коррекция динамических процессов инверторов с разветвленной нагрузкой внутренними средствами

ЧАПЛЫГИН Е.Е., МАТВЕЕВ А.Ю.

Рассмотрен способ коррекции выбросов выходного напряжения при работе инверторов напряжения на разветвленную сеть потребителей, возникающих при отключении мощной нагрузки. Для снижения выбросов предложено переводить инвертор в режим рекуперации энергии из фильтра в источник питания с ограничением интервала рекуперации во времени. Показана эффективность применения режима рекуперации для улучшения качества выходного напряжения инвертора в динамических режимах.

Ключевые слова: инвертор напряжения, выходной фильтр, динамические процессы, рекуперация энергии

В устройствах бесперебойного электропитания, при использовании нетрадиционных источников питания и в автономных системах электропитания широко применяются инверторы напряжения с выходными LC-фильтрами. Выходное напряжение

A method is considered using which it is possible to inhibit overshoots of a voltage inverter's output voltage generated during its operation on a branched network of consumers when a large load is disconnected. For reducing voltage overshoots it is proposed to switch the inverter in a mode in which the energy stored in the filter is recuperated into the power supply with limiting the recuperation interval of time. A positive effect of using the recuperation mode on the quality of the inverter output voltage under dynamic operating conditions is demonstrated.

Key words: voltage inverter, output filter, dynamic processes, recuperation of energy

формируется методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по синусоидальному закону. При использовании IGBT-транзисторов частота коммутации 10–20 кГц. При работе на разветвленную сеть потребителей нагрузка имеет стохастический

характер с возможными резкими набросами и отключениями мощной нагрузки. При этом в выходном напряжении инвертора вследствие развития переходных процессов в фильтре возникают провалы и выбросы, амплитуда которых может значительно превышать амплитуду этого напряжения. Если провалы имеют кратковременный характер, то выбросы напряжения сопровождаются появлением в выходном напряжении медленно затухающих колебаний, которые могут негативно влиять на работу потребителей, а также приводить к аварийным режимам и повреждению оборудования [1].

Рассмотрим схему однофазного мостового инвертора (рис. 1,а). Появление выбросов выходного напряжения при отключении мощной нагрузки связано с тем, что энергия, накопленная в дросселе L , передается в конденсатор C , что вызывает рост напряжения на нагрузке. Известны два способа ограничения выбросов напряжения.

1. Применение варисторов, шунтирующих нагрузку. Однако варисторы лишь ограничивают амплитуду выбросов, выполняют функцию защиты, но не препятствуют развитию переходного процесса.

2. Применение корректоров динамических процессов в фильтре [1], представляющих собой устройство, подключаемое к выходу фильтра и имитирующее плавное снижение тока нагрузки. Избыточная энергия дросселя рассеивается в резисторе корректора.

Оба способа основаны на рассеянии избыточной энергии, накопленной в дросселе, поэтому при возникновении часто повторяющихся процессов сброса мощности нагрузки их применение приво-

дит к снижению КПД и может вызывать повреждение цепей для вывода энергии за счет их перегрева.

В статье рассматриваются альтернативные способы коррекции динамических процессов в фильтре, осуществляемые внутренними средствами, без введения дополнительных элементов в силовую схему инвертора (рис. 1,а). Вывод энергии из дросселя фильтра осуществляется путем рекуперации части избыточной энергии в источник питания E и не связан с рассеянием энергии в резистивных элементах.

Критический режим. Наибольший выброс выходного напряжения происходит при отключении мощной нагрузки Z_{H2} в момент, когда ток дросселя максимален. Назовем этот режим критическим. При анализе такого режима воспользуемся методом двух гармоник, при этом на входе фильтра учитываются две гармоники: основная с частотой $f_{\text{ВЫХ}}$ и эквивалентная с частотой коммутации $f_{\text{К}} = Af_{\text{ВЫХ}}$ и действующим значением, равным действующему значению группы гармоник с частотами, близкими к частоте коммутации [2]. Качество выходного напряжения оценивается коэффициентом гармоник $k_{\text{Г.К}} = C_{\text{ЭКВ}}/C_{\text{ОСН}}$, где $C_{\text{ЭКВ}}$ и $C_{\text{ОСН}}$ — амплитуды эквивалентной и основной гармоник [2, 3]. Инверторы, работающие на разветвленную сеть, как правило, функционируют при коэффициенте модуляции $k_{\text{МОД}}$, близком к максимальному. При $k_{\text{МОД}} = 0,9$ и формировании однополярной ШИМ $k_{\text{Г.К}} = 0,49$.

Рассмотрим электромагнитные процессы при сбросе нагрузки до режима, близкого к х.х., в критическом режиме на положительной полуволне выходного напряжения (полярность напряжения на конденсаторе показана на рис. 1,а). Расчет прово-

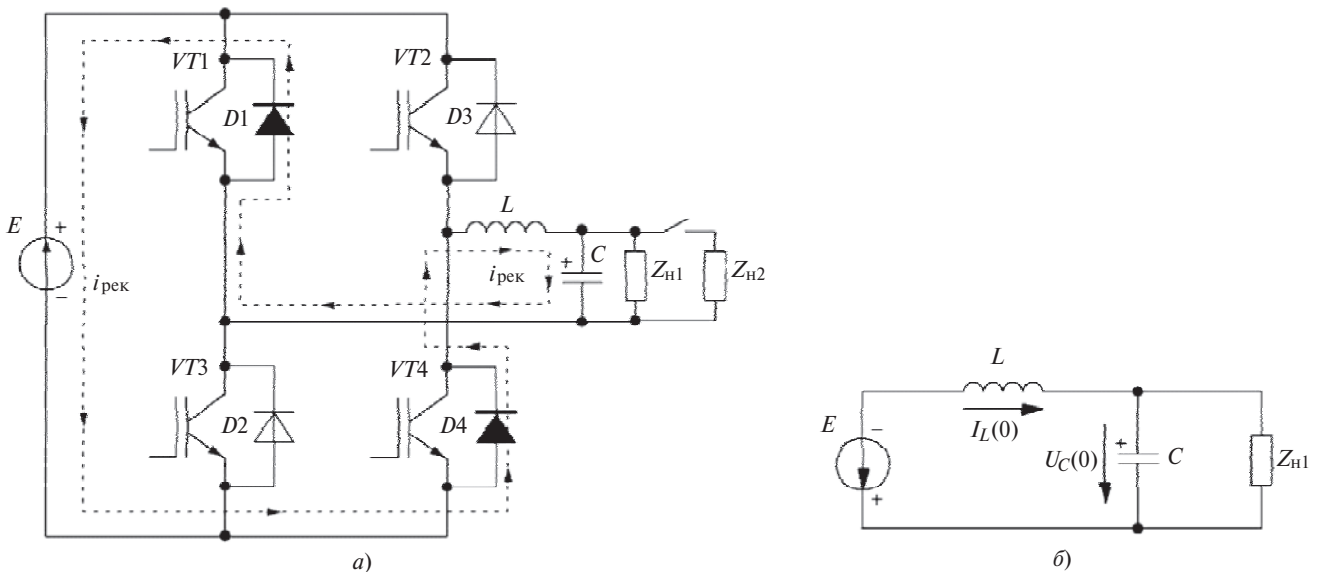


Рис. 1. Схема однофазного мостового инвертора (а) и схема его замещения при рекуперации (б)

дим в нормированном виде, полагая $Z_{H\min} = 1$ Ом, $\omega_{\text{вых}} = 1$ рад/с, в этом случае величины индуктивностей и емкостей безразмерные.

Полагаем, что

$$Z_H = \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}} = Z_{H\min}$$

Перед моментом отключения нагрузки Z_{H1} значение энергии, накопленной в конденсаторе, ток через дроссель и энергия, накопленная в дросселе, определяются как

$$W_C = \frac{CU_m^2}{2};$$

$$I_m = \frac{U_m}{Z_{H\min}} = U_m;$$

$$W_L = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{LU_m^2}{2}.$$

Через четверть периода собственной резонансной частоты фильтра $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}$ энергия из дросселя перейдет в конденсатор (все величины этого момента пометим звездочкой):

$$W_C^* = W_C + W_L = \frac{(C + L)U_m^2}{2} = \frac{C(U^*)^2}{2}.$$

При этом напряжение на выходе инвертора $U^* = U_m + DU$, где DU – величина выброса выходного напряжения инвертора. Отсюда получаем

$$LU_m^2 = 2CU_mDU + CDU^2.$$

Обозначая отношение величины выброса напряжения к его амплитуде в стационарном режиме через $d = DU/U_m$, получаем уравнение

$$Cd^2 + 2Cd - L = 0.$$

Решение этого уравнения относительно d в критическом режиме имеет вид:

$$d = \sqrt{1 + \frac{L}{C}} - 1 = \sqrt{1 + L^2 \omega_{\text{рез}}^2} - 1. \quad (1)$$

Абсолютное значение выброса напряжения равно dU_m , а максимальное напряжение на конденсаторе составляет $(1 + d)U_m$.

Выразим коэффициент d через параметры фильтра. Коэффициент $k_{x,x}$, равный отношению амплитуды эквивалентной высшей гармоники входного тока фильтра с частотой $\omega_{\text{вых}}$ к номинальному току нагрузки, равен

$$k_{x,x} = \frac{k_{Г.К}}{AL}.$$

Резонансная частота фильтра

$$\omega_{\text{рез}} = A \sqrt{\frac{K(A)}{1 + K(A)}},$$

где $K(A)$ – модуль коэффициента передачи фильтра на частоте коммутации $A\omega_{\text{вых}}$.

Подставим эти величины в формулу (1) и получим

$$d = \sqrt{1 + \frac{k_{Г.К}^2 K(A)}{k_{x,x}^2 [1 + K(A)]}} - 1. \quad (2)$$

При отключении мощной комплексной нагрузки в критическом режиме начальные условия процесса изменяются, поскольку напряжение на конденсаторе в момент сброса равно $U_m \cos j$, где j – фазовый угол нагрузки. Поскольку работа с большими углами j нехарактерна для данной области применения, изменение значений d по сравнению с формулой (1) невелико.

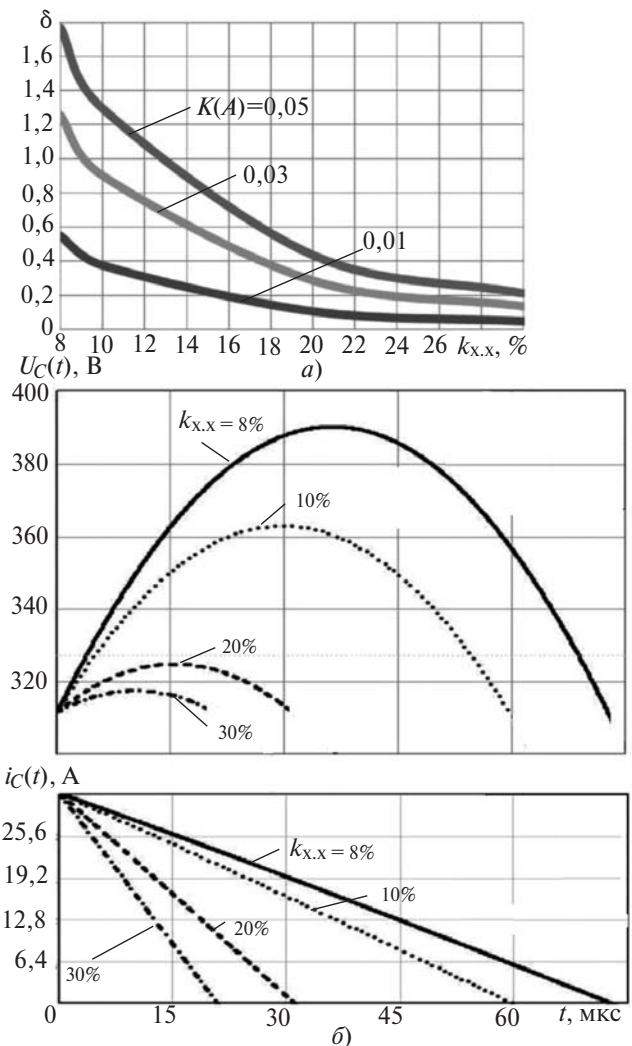


Рис. 2. Критический режим: а – зависимости коэффициента d для инвертора без рекуперации от $k_{x,x}$ при различных значениях $K(A)$ и б – кривые напряжения и тока конденсатора при рекуперации

Значение выброса выходного напряжения не зависит от выбора частоты коммутации, а зависит от $k_{x,x}$ и $K(A)$ приведены на рис. 2,а. Видно, что для снижения значения выброса выходного напряжения необходимо увеличивать коэффициент $k_{x,x}$ и(или) уменьшать коэффициент передачи $K(A)$. Рассмотрим далее возможности осуществления этих сценариев. Ток х.х., обусловленный протеканием высших гармоник тока инвертора через фильтр, не только загружает инвертор в этом режиме, но и протекает через ключи инвертора во всех режимах, вызывая увеличение потерь, увеличиваются и токи через ключи. Поэтому возможности увеличения $k_{x,x}$ выше значений $k_{x,x} = 0,1- 0,15$ ограничены.

При уменьшении значения $K(A)$ снижаются значения высших гармоник в спектре выходного напряжения. Например, при $K(A) = 0,01$ в выходном напряжении инвертора коэффициент гармоник $k_{Г,К} = 0,5\%$, что превосходит значения, предъявляемые к гармоническому составу большинством потребителей. При снижении $K(A)$ увеличиваются затраты на конденсатор фильтра. Увеличивается ток х.х. на основной гармонике, который замыкается через конденсатор, однако этот ток невелик: при $K(A) = 0,01$, $k_{x,x} = 0,1$ и $f_k = 10$ кГц этот ток составляет 1% номинального тока нагрузки, а при $f_k = 20$ кГц его значение равно 5,2%. При снижении $K(A)$ уменьшается резонансная частота фильтра, увеличивается длительность колебательного процесса после сброса мощной нагрузки. В инверторе, в котором стабилизация выходного напряжения достигается за счет обратной связи, снижение резонансной частоты приведет к необходимости снижения быстродействия системы управления.

Таким образом, выбор параметров выходного фильтра обеспечивает в известной степени возможность снижения выбросов выходного напряжения, однако принимаемые решения связаны с перечисленными выше издержками. Кроме того, и в этом случае значение выбросов выходного напряжения может выходить за требования потребителя энергии. Поэтому возможность снижения выбросов напряжения внутренними средствами представляет несомненный интерес.

Интервал рекуперации. Для коррекции динамических процессов в фильтре инвертор в момент отключения мощной нагрузки переводится в режим рекуперации, для этого достаточно снять управляющие импульсы со всех транзисторов. Продолжим рассмотрение критического режима при положительной полувольте выходного напряжения. При $k_{мод} = 0,9$ $E = 1,1U_m$. Схема замещения приведена на рис. 1,б, на рис. 1,а показана траектория проте-

кания токов через ключи инвертора в режиме рекуперации.

Решение дифференциального уравнения, описывающего процессы в схеме рис. 1,б, имеет вид

$$i(t) = i_{уст} + Ke^{-at} \sin(\omega_{св}t + j),$$

где $a = \omega_0 / 2Q$; $\omega_{св} = a\sqrt{4Q^2 - 1}$ — круговая частота свободных колебаний; $Q = R_H \sqrt{L/C}$ — добротность колебательного контура.

Кривые изменения напряжения и тока конденсатора при сбросе мощной нагрузки Z_{H2} до режима, близкого к х.х., приведены на рис. 2,б.

При развитии колебательного процесса в схеме рис. 1,б ток в контуре $i_{рек}$ в момент t_0 станет равным нулю, что означает, что дроссель полностью отдал накопленную в нем энергию. При этом закроются диоды, через которые протекал ток $i_{рек}$. Если в этот момент напряжение на нагрузке $u_H < E$, цепь постоянного тока будет отсечена от фильтра и процесс рекуперации завершится. В противном случае откроются диоды $D2$ и $D3$ и про-

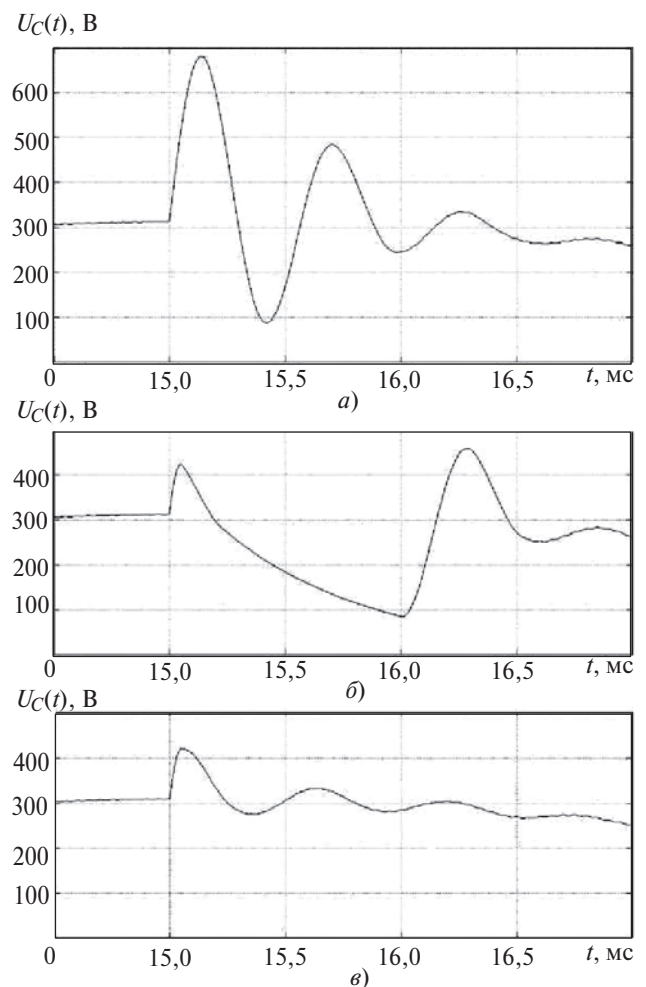


Рис. 3. Кривые напряжения на нагрузке в критическом режиме: а — без рекуперации; б — при неограниченной во времени рекуперации; в — при ограниченной во времени рекуперации

цесс рекуперации продолжится, но в схеме рис. 1,б полярность источника E изменится и процесс рекуперации продолжится при начальных условиях, соответствующих значениям тока дросселя и напряжения на конденсаторе в момент t_0 .

На рис. 3,а приведены кривые изменения выходного напряжения в режиме без рекуперации, на рис. 3,б — кривые при осуществлении неограниченной во времени рекуперации, $k_{x,x} = 0,1$, $K(A) = 0,03$.

Однако протекание процессов при $t > t_0$ не представляет для нас интереса, поскольку сущность предлагаемого метода коррекции динамических процессов заключается в том, что режим рекуперации осуществляется до тех пор, пока ток конденсатора не спадет до нуля, это происходит в момент $t_{\text{опт}} \approx t_0$. В момент $t = t_{\text{опт}}$ ток дросселя равен току нагрузки. Далее при $t > t_{\text{опт}}$ возобновляется функционирование инвертора при формировании на выходе ШИМ-последовательности. На рис. 3,в приведены кривые выходного напряжения при ограниченной во времени рекуперации. Сравнение рис. 3,а и в показывает значительное снижение значения выброса выходного напряжения при применении ограниченной во времени рекуперации. При прерывании режима рекуперации не исключается свободная составляющая процесса, поскольку напряжение на конденсаторе не равно принужденной составляющей. Затухание свободной составляющей определяется значением нагрузки.

Для исследования эффективности применения ограниченной во времени рекуперации для коррекции динамических процессов было проведено имитационное моделирование инвертора в базе Matlab-Simulink. Прежде всего, в результате моделирования установлено, что динамические процессы в фильтре практически не зависят от того, поступает ли на его вход ШИМ-последовательность или только основная гармоника ШИМ-сигнала.

На рис. 4 приведены результаты моделирования инвертора в критическом режиме.

Результаты моделирования критического режима позволяют сделать следующие выводы:

1. Введение режима рекуперации позволяет значительно снизить выбросы выходного напряжения.
2. Эффективность режима рекуперации определяется только параметрами $K(A)$ и $k_{x,x}$ и не зависит от частоты коммутации.
3. Эффективность режима рекуперации может быть оценена коэффициентом эффективности рекуперации $k_{\text{эф}}$ — отношением значения выброса в инверторе без рекуперации к его значению в схеме с рекуперацией, причем $k_{\text{эф}}$ снижается по мере

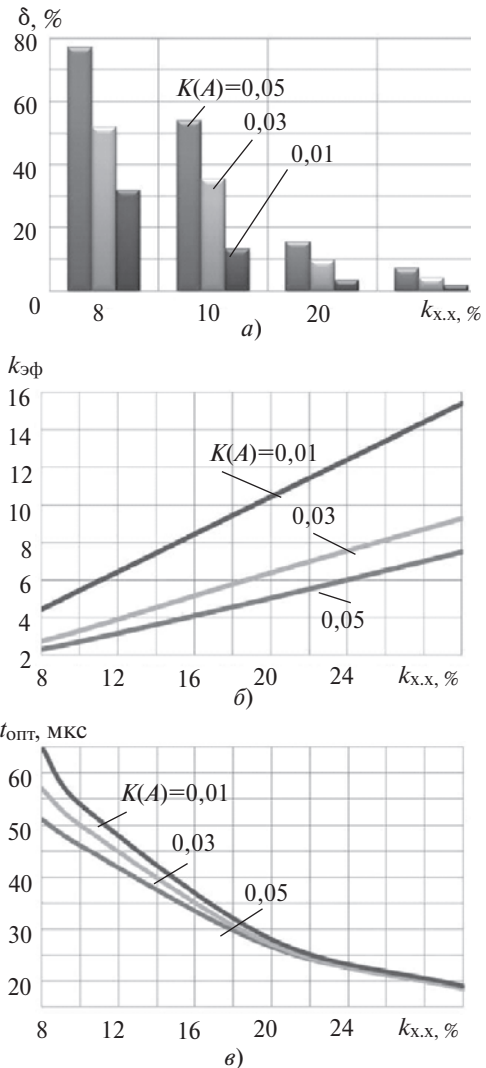


Рис. 4. Результаты моделирования критического режима при ограниченной во времени рекуперации: а — зависимость δ от $k_{x,x}$ при различных значениях $K(A)$; б — зависимость коэффициента эффективности от $k_{x,x}$ при различных $K(A)$; в — зависимость $t_{\text{опт}}$ от $k_{x,x}$ при различных $K(A)$, $A = 200$

роста выбросов напряжения, т.е. для меньших значений $k_{x,x}$ и больших $K(A)$.

4. Оптимальная длительность интервала рекуперации $t_{\text{опт}}$ пропорциональна величине выброса напряжения и обратно пропорциональна частоте коммутации. Отношение $t_{\text{опт}}$ к периоду собственной резонансной частоты контура не зависит от выбора частоты коммутации.

При выборе $k_{x,x} = 0,1$ применение режима рекуперации позволяет снизить относительные выбросы напряжения до $d = 13\%$ при $K(A) = 0,01$ и $d = 54\%$ при $K(A) = 0,05$.

Отметим, что применение режима рекуперации позволяет эффективно снизить выбросы выходного напряжения только в том случае, если при выборе параметров LC -фильтра приняты меры по снижению выбросов.

Исследование не критических режимов. Момент сброса мощной нагрузки является вероятностной величиной, как и значения тока нагрузки инвертора до и после сброса. Рассмотрим сброс мощной нагрузки в момент, сдвинутый от вершины кривой тока на угол ψ , измеряемый на периоде выходной частоты. Полагаем $Z_{H1} \text{ @ } \neq$.

Перед моментом отключения нагрузки Z_{H1} энергия, накопленная в конденсаторе, ток через дроссель и энергия, накопленная в дросселе, определяется как

$$W_C = \frac{CU_m^2 \cos^2 \psi}{2};$$

$$I_m = \frac{U_m \cos \psi}{Z_{H \min}} = U_m \cos \psi;$$

$$W_L = \frac{LI_m^2 \cos^2 \psi}{2} = \frac{LU_m^2 \cos^2 \psi}{2}.$$

В результате передачи энергии из дросселя в конденсатор напряжение на нагрузке увеличится на DU и коэффициент $d = DU / U_m$ равен

$$d^* = \frac{\infty}{\xi} \sqrt{1 + \frac{L}{C} - \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \cos \psi} = \left(\sqrt{1 + L^2 \omega_{\text{рез}}^2} - 1 \right) \cos \psi. \quad (3)$$

Сравнение выражений (1) и (3) показывает, что сброс мощной нагрузки до режима, близкого к х.х., на большей части периода вызывает значительные выбросы выходного напряжения. Эти выбросы могут быть ослаблены при использовании режима рекуперации.

Для исследования эффективности режима рекуперации было проведено имитационное моделирование процессов в инверторе. На рис. 5 приведены некоторые результаты моделирования для выходного фильтра с параметрами $k_{x,x} = 0,1$, $K(A) = 0,03$, частота коммутации 10 кГц, максимальная мощность нагрузки 5 кВт.

На рис. 5,а представлены значения d при различных значениях угла ψ и сбросе тока нагрузки на 60 и 30%. При уменьшении DI выбросы выходного напряжения уменьшаются. Можно отметить, что при уменьшении DI и увеличении выбросов выходного напряжения возрастает коэффициент эффективности режима рекуперации $k_{\text{эф}}$, этот же эффект наблюдался в критическом режиме. На рис. 5,б для тех же режимов показаны значения оптимальной длительности интервала рекуперации $t_{\text{опт}}$. Длительность интервала уменьшается при снижении выброса. На рис. 5,в показаны зависимости $t_{\text{опт}}$ от DI , снятые при различных ψ и сбросе тока нагрузки при работе (до сброса мощности) на $Z_H = Z_{H \min}$. Зависимости имеют близкий к линейному характер.

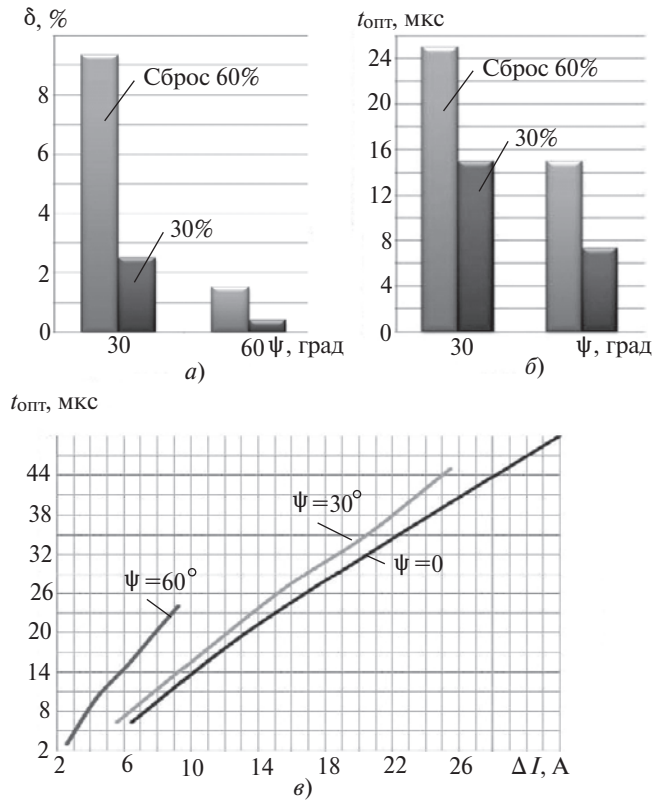


Рис. 5. Рекуперация в не критических режимах: а — зависимость d при ограниченной во времени рекуперации от ψ при отключении различных потребителей; б — зависимость $t_{\text{опт}}$ от ψ при отключении различных потребителей; в — зависимость $t_{\text{опт}}$ от DI и ψ

Вопросы управления. Система управления инвертором при реализации ограниченной во времени рекуперации должна осуществлять следующее:

1. Фиксацию момента сброса тока нагрузки и блокирование работы всех драйверов транзисторов, начиная с этого момента.
2. Прекращение блокирования драйверов при достижении током конденсатора нулевого значения.

Отметим, что все процессы коррекции динамических процессов протекают в течение промежутков времени, меньших периода коммутации ключей.

Момент сброса нагрузки может быть зафиксирован непосредственно датчиком тока нагрузки либо датчиком выходного напряжения. Использование датчика тока предпочтительнее, во-первых, потому что изменение производной тока имеет большее относительное значение, чем изменение напряжения, во-вторых, потому, что датчики тока, как правило, устанавливаются на выходе инверторов для осуществления быстродействующей защиты от режима КЗ в нагрузочной цепи. Изменение производной сигнала датчика тока фиксируется дифференцирующим элементом, и при несовпадении знака производной и полярности формируемо-

го тока включается триггер, осуществляющий блокирование работы драйверов силовых транзисторов инвертора. При равном нулю сигнале с датчика тока конденсатора подается сигнал на триггер, прерывающий блокирование работы драйверов.

Возможно построение параметрического управления с одним датчиком — датчиком тока нагрузки. Этот датчик фиксирует значения тока до и после сброса нагрузки (I_1 и I_2), в системе управления инвертором имеются таймеры, которые фиксируют момент сброса, определяющий угол γ . Вычислитель микропроцессорной системы управления определяет $t_{\text{опт}} = f(I_1, I_2, \gamma)$ и посылает этот сигнал в цепь регулируемой задержки, которая определяет длительность блокирования драйверов. Зависимость $t_{\text{опт}} = f(I_1, I_2, \gamma)$ находится при моделировании динамических процессов в инверторе и заносится в ПЗУ в виде таблицы, либо представляется аналитически в виде аппроксимации полиномом.

Для оценки целесообразности параметрического управления процессами коррекции необходима детальная проработка вопросов микропроцессорного управления инвертором, которая даст возможность ответить на вопрос, целесообразно ли ради исключения одного датчика значительно усложнять алгоритм работы системы управления инвертором.

Выводы. 1. При отключении мощной нагрузки на большей части периода выходной частоты появляются значительные выбросы выходного напряжения инвертора и возникает колебательный процесс на резонансной частоте фильтра, значение выбросов зависит от отношения тока х.х. инвертора к номинальному току нагрузки и коэффициента передачи фильтра на частоте коммутации и не зависит от этой частоты.

2. Применение режима ограниченной во времени рекуперации энергии из фильтра в источник питания позволяет значительно снизить выбросы выходного напряжения, эффективность применения режима рекуперации зависит от отношения тока х.х. инвертора к номинальному току нагрузки и коэффициента передачи фильтра на частоте коммутации и не зависит от частоты коммутации.

3. Эффективное использование режима рекуперации возможно только при целенаправленном выборе элементов фильтра с целью снижения выбросов выходного напряжения инвертора.

4. Предложено два способа построения управления процессом рекуперации, в одном из которых требуются датчики тока нагрузки и тока конденсатора, в другом — только датчик тока нагрузки, но этот способ связан со значительным усложнением алгоритма управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г. Коррекция динамических процессов в выходных фильтрах автономных инверторов напряжения. — Электричество, 2004, № 11.
2. Чаплыгин Е.Е., Агудов А.Н., Московка А.А. Анализ инвертора напряжения, работающего на разветвленную сеть потребителей. — Электротехника, 2000, № 4.
3. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения. — Электричество, 2008, № 7.

[24.12.12]

Авторы: Чаплыгин Евгений Евгеньевич окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1965 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование непосредственных преобразователей частоты с замкнутым контуром управления». Профессор кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ».

Матвеев Андрей Юрьевич — магистрант НИУ «МЭИ».

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).