

## Коррекция динамических процессов в трехфазных инверторах, работающих на разветвленную нагрузку

ЧАПЛЫГИН Е.Е., МАТВЕЕВ А.Ю.

*Рассмотрены процессы в трехфазных инверторах напряжения с разветвленной нагрузкой, возникающие при скачкообразном уменьшении тока нагрузки. Для снижения резкого увеличения (выбросов) выходного напряжения инвертор переводится в режим рекуперации энергии, продолжающийся до спада до нуля тока конденсатора. Рассмотрены инверторы по схемам «Три однофазных полумоста» и «Инвертор с дополнительным полумостом». Показана высокая эффективность применения режима рекуперации. Получены зависимости значений выбросов напряжения от обобщенных параметров фильтра, позволяющие выбирать их в соответствии с заданным предельным уровнем выбросов выходного напряжения при минимальных токах инвертора, замыкающихся через фильтр, минуя нагрузку.*

**Ключевые слова:** инвертор напряжения, LC-фильтр, динамические процессы, рекуперация энергии

В системах бесперебойного питания потребителей переменным током широко используются инверторы напряжения, формирующие выходное напряжение с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для подавления высокочастотных составляющих ШИМ-последовательности на выходе инверторов устанавливаются LC-фильтры. При работе подобных устройств, часто используемых для питания разветвленной сети потребителей, возможны резкие изменения тока нагрузки, например при подключении или отключении мощных нагрузок. При этом напряжение оставшихся подключенными к инвертору потребителей может содержать значительные провалы или выбросы [1].

При резком сбросе мощной нагрузки энергия, накопленная в реакторе LC-фильтра, передается в конденсатор фильтра, вызывая резкое увеличение напряжения на выходе преобразователя, при этом амплитуда выбросов напряжения может значительно (в несколько раз) превышать амплитуду выходного напряжения в стационарных режимах. Выбросы напряжения могут привести к выходу из строя инвертора и повреждению нагрузки. После сброса нагрузки в выходном напряжении наблюдается модуляция амплитуды с резонансной частотой фильтра, колебания постепенно затухают при рассеянии избыточной энергии на нагрузке. Изменение параметров LC-фильтра позволяет снизить выбросы напряжения только за счет значительного увеличения токов, которые замыкаются через инвертор, минуя нагрузку, в том числе токов холостого хода [1].

Для ограничения выбросов напряжения на выходе инверторов могут устанавливаться варисторы и(или) корректоры динамических процессов в фильтре, предложенные в [2]. Их использование снижает выбросы выходного напряжения за счет

рассеяния избыточной энергии, накопленной в реакторе, в варисторах или резистивных элементах корректора. При резко динамических режимах в нагрузочных цепях уменьшается КПД установки, а в ряде случаев (например при «дребезге» контактов) возможен выход компонентов схемы из строя из-за перегрева.

В [3] для однофазного инвертора предложен иной способ ограничения выброса выходного напряжения, основанный на рекуперации избыточной энергии реактора в источник питания инвертора. Исследования показали, что для эффективного снижения выбросов выходного напряжения длительность режима рекуперации должна быть ограничена — он прерывается при достижении током конденсатора фильтра нулевого значения.

При построении систем бесперебойного питания разветвленной нагрузки трехфазным током используют трехфазные инверторы, к выходу которых могут подключаться как трехфазные, так и однофазные нагрузки. Проблемы, связанные с необходимостью ограничения выбросов напряжения при сбросе мощных нагрузок, имеют ту же физическую природу, что и в однофазных цепях. Целью данной работы является распространение способов снижения выбросов выходного напряжения, предложенных в [3], на трехфазные инверторы с разветвленной нагрузкой.

**Структура силовой части инверторов.** При питании разветвленной сети потребителей используется четырехпроводное подключение с нулевым проводом. При этом инверторы могут быть выполнены по схемам, приведенным на рис. 1.

Схема *Три однофазных полумоста* на рис. 1,а состоит из трех независимо функционирующих однофазных полумостовых инверторов, формирующих

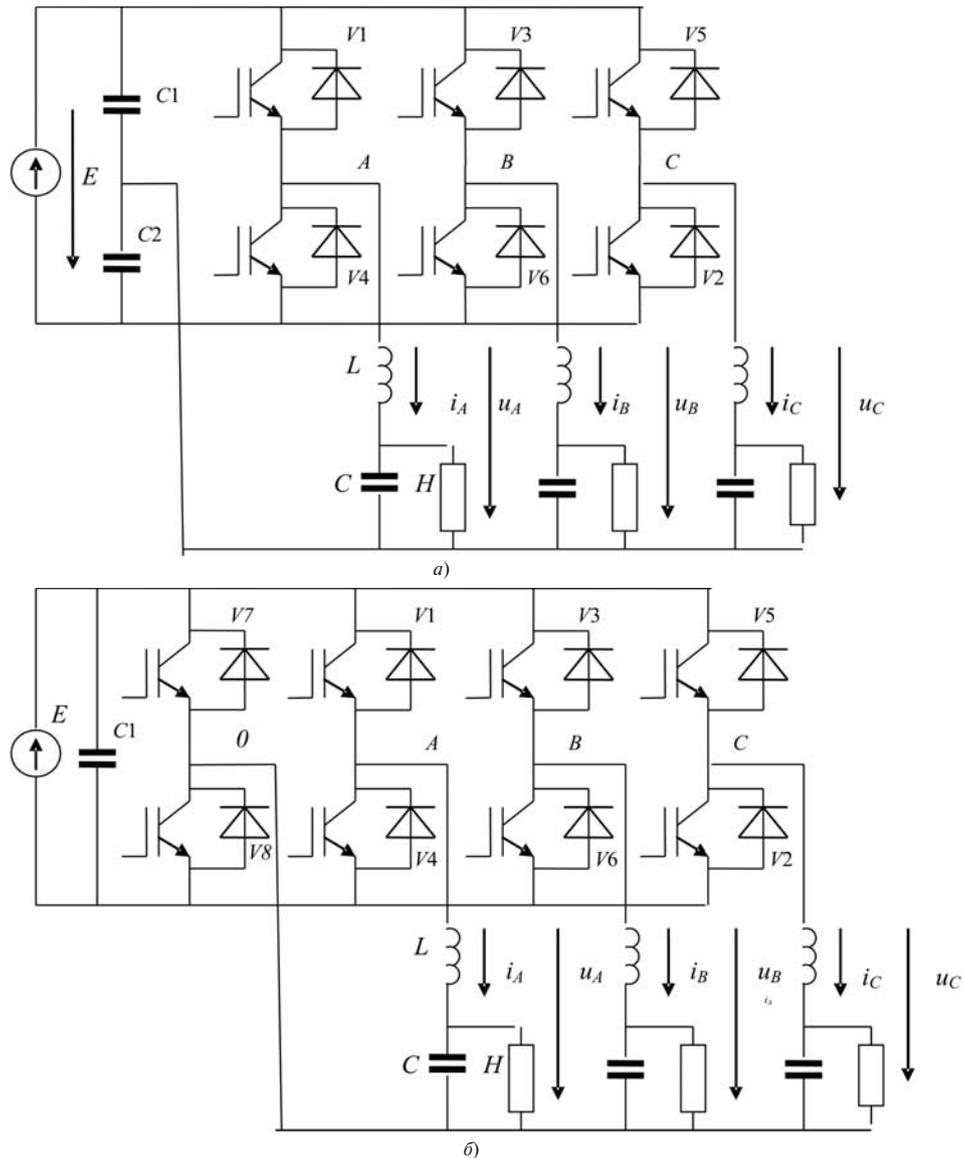


Рис. 1. Схемы инверторов для питания несимметричной нагрузки: а — Три однофазных полумоста; б — Инвертор с дополнительным полумостом

на выходах двухполярную ШИМ-последовательность напряжений. Фазовый сдвиг напряжений разных фаз достигается за счет работы системы управления. Достоинством инвертора является минимальное число управляемых ключей, недостатком — большие затраты на конденсаторы  $C1$  и  $C2$  в цепи постоянного тока, особенно в режимах с значительной несимметрией нагрузки [4].

В схеме *Инвертор с дополнительным полумостом* на рис. 1, б в дополнительном полумосте  $V7$ – $V8$  формируется ШИМ-последовательность с нулевым коэффициентом модуляции. При формировании во всех полумостах инвертора однотипных ШИМ (ШИМ по фронту (срезу) либо двухсторонний ШИМ) фазовые напряжения однополярны на половине периода выходной частоты. Гармонический состав выходного напряжения при реализации двухсторонней ШИМ с модуляцией фронта и среза

импульсов [5] лучше, чем в схеме рис. 1, а, поэтому затраты на реактивные элементы фильтра  $LC$  меньше. К достоинствам схемы рис. 1, б относятся также значительно меньшие затраты на конденсатор в цепи постоянного тока  $C1$  [4], к недостаткам — дополнительные затраты на полумост  $V7$ – $V8$ .

В каждой из фаз инверторов рис. 1, а и б выходное напряжение формируется независимо. Эта независимость процессов в фазах инвертора сохраняется и в динамических режимах, поэтому динамические процессы можно рассматривать отдельно в каждой фазе, т.е. по существу в однофазных схемах.

**Обобщенные динамические параметры фильтра.** Наибольший выброс выходного напряжения происходит при отключении мощной нагрузки в момент, когда ток реактора максимален. Назовем этот режим критическим. При его анализе вос-

пользуемся методом двух гармоник, т.е. 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, расположенными вблизи частоты коммутации. 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.

Обозначим отношение значения выброса выходного напряжения  $dU$  к его амплитуде в стационарном режиме  $U_m$  через  $d$ . Амплитуда выходного напряжения инвертора при сбросе нагрузки в  $(1+d)$  раз больше амплитуды в стационарном режиме. Как показано в [3], значение  $d$  при сбросе нагрузки от номинального значения до режима, близкого холостому ходу, зависит только от обобщенных параметров фильтра:

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

где  $k_{\text{ХХ}}$  — коэффициент холостого хода, равный отношению амплитуды эквивалентной высшей гармоники входного тока фильтра в режиме холостого хода с частотой  $\omega_{\text{ВЫХ}}$  к номинальному току нагрузки;  $K(A)$  — модуль коэффициента передачи фильтра на частоте коммутации  $\omega_{\text{ВЫХ}}$ .

Коэффициент  $k_{\text{Г.К}}$  определяется выбором схемы рис. 1 и разновидностью ШИМ (по фронту/срезу либо двухсторонняя ШИМ). Значение выброса выходного напряжения меньше в инверторах с лучшим гармоническим составом выходного напряжения (меньшим  $k_{\text{Г.К}}$ ), значение  $d$  снижается при увеличении тока холостого хода и коэффициента  $k_{\text{ХХ}}$ . Таким образом, при исследовании динамических режимов в инверторах (рис. 1) независимыми факторами являются только обобщенные параметры фильтра  $K(A)$  и  $k_{\text{ХХ}}$ . Вследствие различия значений показателей качества выходного напряжения  $k_{\text{Г.К}}$  инверторов (рис. 1) при равных  $K(A)$  гармонический состав на выходе фильтра, характеризуемый коэффициентом гармоник  $k_{\text{Г.ВЫХ}} = k_{\text{Г.К}} K(A)$ , будет наилучшим в инверторе рис. 1,б при двухсторонней ШИМ.

**Коррекция динамических процессов в инверторе по схеме Три однофазных полумоста** (рис. 1,а).

Фазное напряжение в этой схеме формируется в каждой фазе независимо от работы других фаз, поэтому можно рассмотреть сброс нагрузки только в одной фазе, например в фазе  $A$ . При работе инвертора в каждой фазе формируется двухполярная ШИМ. При коэффициенте модуляции  $K_M = 0,9$ , характерном для работы инверторов в установках бесперебойного питания, коэффициент гармоник

$k_{\text{Г.К}} = 0,91$ . Анализ проводим на полуволне, в которой формируется положительная часть выходного напряжения фазы  $A$ . Для перехода в режим рекуперации блокируются управляющие импульсы на транзисторы. Сброс нагрузки может произойти во время формирования импульса или паузы. Рассмотрим оба варианта.

*Вариант 1. Сброс нагрузки во время формирования импульса.* В стационарном режиме ток протекает через транзистор  $V1$ . К входу фильтра приложено напряжение  $+E/2$ . В режиме рекуперации управляющий импульс на транзистор  $V1$  блокируется и ток замыкается через диод  $V2$ . К входу фильтра приложено напряжение  $-E/2$ , начинается рекуперация энергии реактора  $L$  в источник питания.

*Вариант 2. Сброс нагрузки во время формирования паузы.* В стационарном режиме подается управляющий импульс на транзистор  $V2$ , но ток проводит диод  $V2$ . К входу фильтра приложено напряжение  $-E/2$ . В режиме рекуперации управляющий импульс с транзистора  $V2$  снимается, ток по-прежнему проходит через диод  $V2$ . К входу фильтра по-прежнему приложено напряжение  $-E/2$ , т.е. продолжается рекуперация энергии реактора  $L$  в источник питания.

Таким образом, при снятии управляющих импульсов с транзисторов инвертора в любом случае проходит (начинается или продолжается) процесс рекуперации энергии, накопленной в реакторе  $L$ .

После завершения рекуперации выходное напряжение модулируется по амплитуде затухающими колебаниями на резонансной частоте фильтра, однако интенсивность модуляции значительно меньше, чем в инверторе, в котором режим рекуперации не используется.

Для исследования процесса рекуперации проведено имитационное моделирование инвертора в базе Matlab-Simulink. Исследовался сброс нагрузки в критическом режиме на 90% номинальной мощности. Частота коммутации 10 кГц ( $A = 200$ ).

Результаты моделирования приведены на рис. 2. На диаграмме рис. 2,а приведены зависимости параметра  $dU$  от обобщенных динамических параметров фильтра, а на рис. 2,б — аналогичный коэффициент  $dU_p$  в режиме рекуперации; на рис. 2,в представлен коэффициент эффективности рекуперации  $k_{\text{ЭФ}} = dU / dU_p$ , на рис. 2,г — зависимость длительности этапа рекуперации  $t_{\text{ОПТ}}$  (мкс). Этап рекуперации продолжается с момента отключения мощной нагрузки до момента снижения тока конденсатора  $C$  до нуля. На рис. 2,д на десяти межкоммутационных интервалах вблизи максимума напряжения представлено выходное напряжение инвертора при отсутствии (пунктир) и осуществлении рекуперации (сплошная линия).

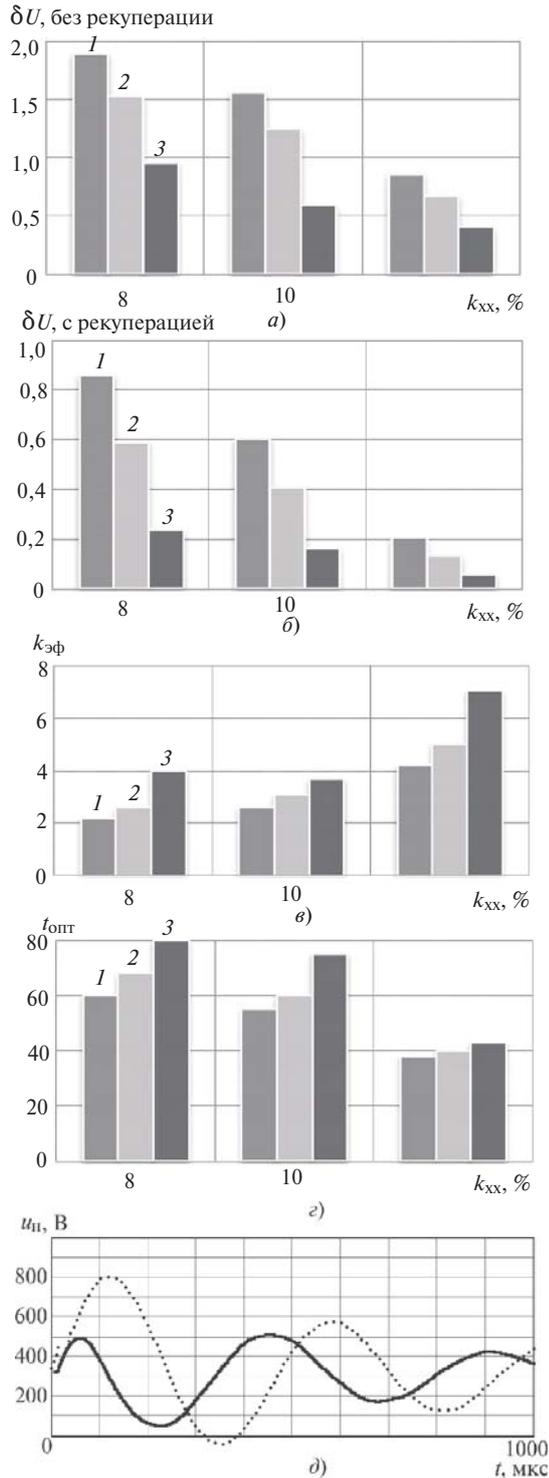


Рис. 2. Динамические параметры схемы на рис. 1,а при сбросе нагрузки в критическом режиме: а –  $dU$ ; б –  $dU_p$ ; в –  $k_{эф}$ ; г –  $t_{опт}$ ; д – выходное напряжение инвертора; 1 –  $K(A)=0,05, A=200$ ; 2 –  $K(A)=0,03, A=200$ ; 3 –  $K(A)=0,01, A=200$

Результаты моделирования позволяют сделать выводы:

ограниченная во времени рекуперация позволяет значительно снизить выбросы выходного напряжения при сбросе мощной нагрузки;

выбор момента на межкоммутационном интервале, во время которого происходит сброс нагруз-

ки, незначительно влияет на значение выброса напряжения;

параметры  $dU$  и  $dU_p$  уменьшаются при увеличении коэффициента холостого хода, эффективность рекуперации при этом возрастает;

для достижения заданного уровня выброса выходного напряжения при осуществлении рекуперации  $d_{p,доп}$  необходимо рассчитывать фильтр на определенный параметр  $k_{хх}$ ;

параметр  $t_{опт}$  слабо зависит от коэффициента передачи  $K(A)$ , длительность режима рекуперации не превышает межкоммутационного интервала;

выброс выходного напряжения снижается, а коэффициент эффективности  $k_{эф}$  увеличивается при уменьшении коэффициента передачи  $K(A)$ .

Коэффициент передачи  $K(A)$  определяется коэффициентом гармоник  $k_{Г,К}$  и требованиями к качеству напряжения на выходе фильтра. Снижение  $K(A)$  ниже требуемого значения позволит уменьшить  $k_{хх}$ , но приведет к увеличению затрат на конденсаторы фильтров и увеличит ток основной гармоники, который замыкается через фильтр, минуя нагрузку. Этот ток протекает через инвертор и в режиме холостого хода его отношение к номинальному току нагрузки равно:

$$k_{хх1} = \frac{k_{хх}}{A k_{Г,К} K(A)} \tag{2}$$

**Коррекция динамических процессов в инверторе по схеме Инвертор с дополнительным полумостом** (рис. 1,б). В связи с независимым формированием выходного напряжения в различных фазах инвертора анализ проводится только для одной фазы. При возникновении динамического режима алгоритм переключения ключей дополнительного полумоста не должен меняться, так как он определяет формирование выходных напряжений других фаз,

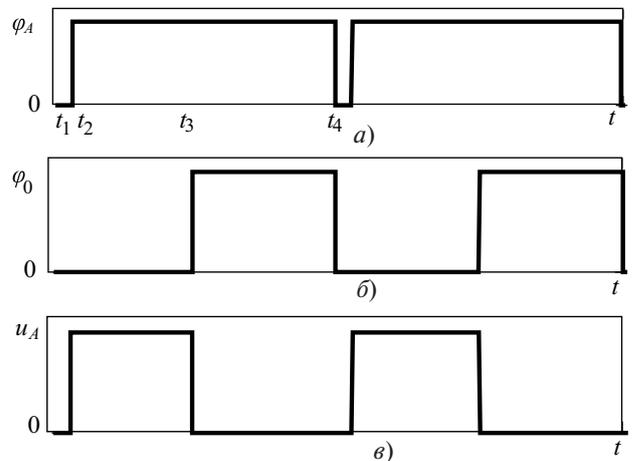


Рис. 3. Диаграммы для схемы Инвертор с дополнительным полумостом: а – потенциал  $j_A$ ; б – потенциал  $j_A$ ; в – выходное напряжение фильтра

которые могут продолжать работу в номинальном режиме, т.е. при проведении режима рекуперации блокировка управляющих импульсов на транзисторы  $V7$  и  $V8$  не осуществляется.

Для определенности рассмотрим ШИМ по фронту. Диаграммы приведены на рис. 3,  $a-v$ . На участке формирования положительного напряжения фазы  $A$  выделены два межкоммутационных интервала в области максимума фазового напряжения на входе фильтра и представлены потенциалы фаз  $j_A$  (рис. 3,  $a$ ) и  $j_0$  (рис. 3,  $b$ ), определенные относительно отрицательного полюса источника питания  $E$ , а также напряжение на входе фильтра  $u_A$  (рис. 3,  $e$ ). При коэффициенте модуляции  $K_M = 0,9$  и модуляции фронта (или среза) импульса коэффициент гармоник  $k_{Г.К} = 1,09$  [5].

При работе схемы возможны три варианта режимов:

**Вариант 1. Сброс нагрузки в начале формирования импульса ( $t = t_2$ ).** В стационарном режиме входной ток фильтра протекает через транзисторы  $V1$  и  $V8$ , к входу фильтра приложено напряжение  $u_A = E$ . В режиме рекуперации блокируется управляющий импульс на транзистор  $V1$  и ток протекает через диод  $V4$  и транзистор  $V8$ . На входе фильтра напряжение  $u_A$  равно нулю — рекуперации не происходит, она начнется только при переключении в дополнительном полумосте при  $t = t_3$ . Однако полезный эффект блокирования управляющего импульса есть, так как не формируется импульс, во время которого в реактор фильтра поступает дополнительная энергия.

**Вариант 2. Сброс нагрузки в начале формирования паузы.** В стационарном режиме управляющие импульсы подаются на транзисторы  $V1$  и  $V7$  (моменты  $t_3 - t_4$ ). Ток протекает через транзистор  $V1$  и диод  $V7$ , на входе фильтра напряжение  $u_A$  равно нулю. При рекуперации блокируют управляющие импульсы на транзистор  $V1$ , ток перейдет на диод  $V4$  и по-прежнему будет протекать через диод  $V7$ , напряжение на входе фильтра равно  $-E$ , происходит рекуперация энергии. Надо отметить, что этот режим является наиболее длительным при сбросе нагрузки в критическом режиме.

**Вариант 3. Сброс нагрузки в начале межкоммутационного интервала ( $t = t_1$ ).** При формировании паузы, когда в стационарном режиме управляющие импульсы подаются на транзисторы  $V4$  и  $V8$ , входной ток фильтра протекает через диод  $V4$  и транзистор  $V8$ . Напряжение на входе фильтра  $u_A$  равно нулю. В режиме рекуперации блокируют управляющие импульсы на транзистор  $V4$ , но, поскольку он обесточен, контур тока не изменяется и напряжение на входе фильтра равно нулю, т.е. рекуперации энергии не происходит, напряжение  $u_A$  на выходе

фильтра такое же, как в номинальном режиме. Рекуперация начнется в момент  $t = t_3$  при переключении в дополнительном полумосте, т.е. через половину межкоммутационного интервала. Полезный эффект заключается в том, что блокируется формирование импульса, во время которого в фильтр поступает дополнительная энергия.

При формировании двухсторонней ШИМ межкоммутационный интервал делится на две части и те же процессы повторяются дважды с зеркальной симметрией. При коэффициенте модуляции  $K_M = 0,9$  коэффициент гармоник  $k_{Г.К} = 0,75$  [5].

Для исследования процесса рекуперации проведено имитационное моделирование инвертора в базе Matlab-Simulink. Исследовался сброс мощной нагрузки на 90% номинальной мощности в критическом режиме.

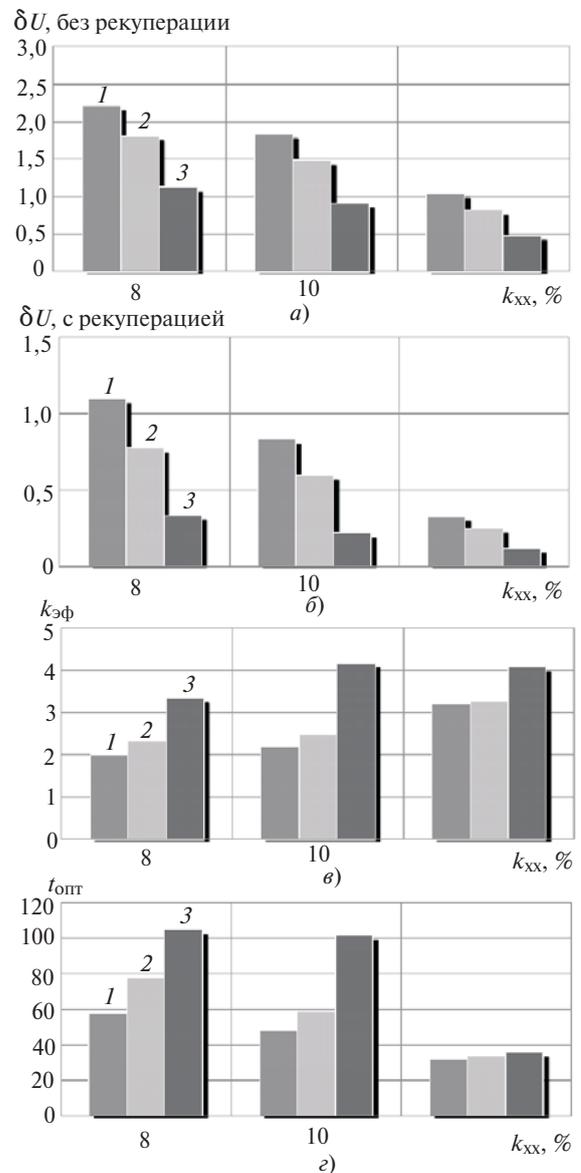


Рис. 4. Динамические параметры на схеме рис. 1, б с ШИМ по фронту при сбросе нагрузки в критическом режиме:  $a - \delta U$ ;  $б - \delta U_p$ ;  $в - k_{эф}$ ;  $г - t_{опт}$ ; 1, 2, 3 — то же, что на рис. 2

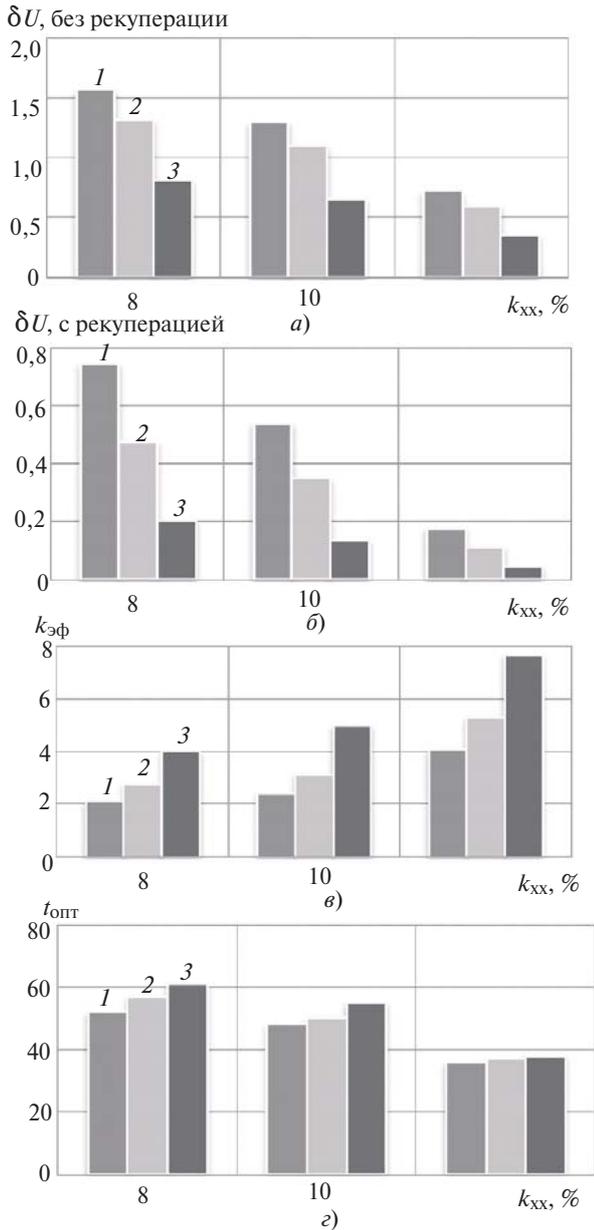


Рис. 5. Динамические параметры на схеме рис. 1,б с двухсторонней ШИМ при сбросе нагрузки в критическом режиме: а –  $dU$ ; б –  $dU_p$ ; в –  $k_{эф}$ ; г –  $t_{опт}$ ; 1, 2, 3 – то же, что на рис. 2 и 4

Результаты моделирования приведены на рис. 4 (модуляция фронта или среза импульса) и рис. 5 (двухсторонняя ШИМ). На диаграммах рис. 4,а и 5,а приведены зависимости параметра  $dU$  от обобщенных динамических параметров фильтра, на рис. 4,б и 5,б — коэффициент  $dU_p$  при осуществлении режима рекуперации; на рис. 4,в и 5,в представлены коэффициенты эффективности рекуперации  $k_{эф}$ , на рис. 4,г и 5,г — зависимости длительности этапа рекуперации  $t_{опт}$  (мкс) от обобщенных параметров фильтра.

Результаты моделирования позволяют повторить все выводы, сделанные при исследовании инвертора по схеме рис. 1,а. Необходимо добавить следующее:

в схеме рис. 1,б значение выброса существенно зависит от момента на межкоммутационном интервале, во время которого происходит сброс нагрузки. На рис. 4 и 5 представлены режимы, соответствующие формированию наибольших выбросов выходного напряжения;

значение выбросов зависит от качества напряжения на входе фильтра; при уменьшении коэффициента  $k_{Г,К}$  выбросы напряжения уменьшаются, увеличивается коэффициент эффективности рекуперации  $k_{эф}$ , поэтому целесообразно в инверторе применять ШИМ с двухсторонней модуляцией, снижая затраты на фильтр.

**Исследование не критических режимов.** Критический режим представляет процессы при формировании максимальных значений амплитуд выбросов выходного напряжения инвертора. При сбросе нагрузки, в моменты, когда входной ток фильтра меньше амплитудных значений, либо при сбросе меньшей мощности в нагрузочной цепи выбросы выходного напряжения уменьшаются. На имитационной модели получены данные (см. таблицу) о выбросах выходного напряжения в не критических режимах. Моделировался инвертор по схеме рис. 1,б с двухсторонней ШИМ, частота коммутации 10 кГц,  $k_{xx} = 0,1$ ,  $K(A) = 0,03$ .

Данные таблицы показывают, что большие выбросы выходного напряжения отмечены на значительной части периода выходной частоты и при меньших значениях мощности отключаемой нагрузки.

Вопросы построения цепей управления для осуществления ограниченной во времени рекуперации

Сброс нагрузки

Коэффициент	Сброс нагрузки					
	В момент максимума входного тока фильтра			В момент, отстоящий на 30° выходной частоты от максимума входного тока фильтра		
	90%, критический режим	60%	30%	90%	60%	30%
$dU$	1,443	0,736	0,382	1,057	0,446	0,125
$dU_p$	0,758	0,382	0,189	0,446	0,189	0,029

ции, рассмотренные в [3], могут быть применены и при реализации трехфазных инверторов.

**Выводы.** 1. Применение ограниченной во времени рекуперации позволяет значительно снизить выбросы выходного напряжения инвертора при внезапном отключении мощной нагрузки.

2. Основные закономерности процессов при использовании однофазного инвертора с однополярной ШИМ [3] и трехфазных инверторов (рис. 1) сохраняются, различия носят количественный характер и связаны с большим значением коэффициента гармоник  $k_{Г,К}$  в трехфазных инверторах, что обуславливает увеличение выбросов выходного напряжения.

3. Эффективное использование режима рекуперации возможно только при целенаправленном выборе элементов фильтра с целью снижения выбросов выходного напряжения инвертора; для этого могут быть использованы данные на рис. 2, 4 и 5.

4. При одинаковых ограничениях на значения выбросов выходного напряжения значение коэффициента холостого хода  $k_{ХХ}$  в трехфазных инверторах (рис. 1) следует выбирать большим, чем в однофазных.

5. Минимальные затраты на фильтр и минимальное значение выбросов выходного напряжения обеспечивает выбор схемы *Инвертор с дополнительным полумостом* (рис. 1,б) при реализации двухсторонней ШИМ.

6. Зависимости значений выбросов напряжения от обобщенных параметров фильтра позволяют вы-

брать параметры фильтра с заданным предельным уровнем выбросов выходного напряжения при минимизации токов инвертора, замыкающихся через фильтр, минуя нагрузку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Ю.К., Воронин П.А., Рывкин С.Е., Чаплыгин Е.Е. Справочник по силовой электронике/Под ред. Ю.К.Розанова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014, 472 с.
2. Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г. Коррекция динамических процессов в выходных фильтрах автономных инверторов напряжения. — Электричество, 2004, № 11, с. 16—24.
3. Чаплыгин Е.Е., Матвеев А.Ю. Коррекция динамических процессов инверторов с разветвленной нагрузкой внутренними средствами. — Электричество, 2013, № 4, с. 50—56.
4. Чаплыгин Е.Е., Калугин Н.Г., Рыбальченко И.Ю. Входные фильтры инверторов напряжения с несимметричной нагрузкой. — Практическая силовая электроника, 2005, вып. 18, с. 28—32.
5. Чаплыгин Е.Е. Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения. — Электричество, 2009, № 8, с. 56—60.

[06.04.15]

*А в т о р ы*: 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 Национального исследовательского университета (НИУ) «МЭИ».

Матвеев Андрей Юрьевич окончил магистратуру НИУ «МЭИ» в 2013 г. Аспирант кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ».

## Correction of Dynamic Processes in Three-Phase Inverters Operating on Branched Load

CHAPLYGIN Evgenii Evgen'yevich (Nationale Research University «Moscow Power Engineering Institute» NR(NRU «MPEI»), Cand. Sci. (Edg.)

MATVEYEV Andrei Yur'yevich, (NRU «MPEI», Moscow, Russia), — Ph.D. Student

*Processes in three-phase voltage inverters operating on branched load that occur during step-like decrease of load current are considered. To suppress a very rapid growth (spike) of output voltage, the inverter is switched to the energy recuperation mode, which continues until the capacitor current decreases to zero. The inverter circuit arrangements «Three single-phase half-bridges» and «Inverter with an additional half-bridge» are considered. A high effect from using the recuperation mode is shown. Dependences of voltage spike values on the generalized filter parameters are obtained, using which the filter parameters can be selected in accordance with the preset limit voltage spike level at the minimal inverter currents closing through the filter in bypass of load.*

Key words: voltage inverter, LC filter, dynamic processes, energy recuperation

#### REFERENCES

1. Rozanov Yu.K., Voronin P.A., Ryzkin S.E., Chaplygin E.E. *Spravochnik po silovoi elektronike/Pod red. Yu.K. Rozanova* (Reference power electronics/Edit. by Yu.K. Rozanov). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2014, 472 p.
2. Chaplygin E.E., Kalugin N.G. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2004, No. 11, pp. 16—24.

3. Chaplygin E.E., Matveyev A.Yu. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 4, pp. 50—56.
4. Chaplygin E.E., Kalugin N.G., Rybal'chenko I.Yu. *Prakticheskaya silovaya elektronika — in Russ. (Practical power electrical engineering)*, 2005, iss. 18, pp. 28—32.
5. Chaplygin E.E. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 8, pp. 56—60.

