

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА ТОКА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

Регулируемый электропривод (ЭП) переменного тока является неотъемлемым элементом системы энергосбережения. В значительной степени это касается частотно-регулируемых ЭП большой мощности с высоковольтными асинхронными двигателями. На первый план при этом выходят вопросы качества преобразования энергии и к преобразователю частоты (ПЧ) предъявляются повышенные требования [1]. Для высоковольтного ЭП переменного тока «классическим» решением стало использование каскадных многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ) типа «Perfect Harmony», схема которых достаточно сложна и при напряжении 6 кВ содержит 6 однофазных автономных инверторов напряжения на выходную фазу. Входные цепи содержат 18 выпрямителей с емкостными фильтрами, которые получают питание от трансформатора с 18 комплектами вторичных обмоток.

Более простое и перспективное решение в плане получения выходного синусоидального напряжения возможно на базе автономного инвертора тока (АИТ) с выходным емкостным фильтром при использовании ШИМ [1 – 4]. При этом форма напряжения, близкая к синусоидальной, может обеспечиваться во всем диапазоне регулирования выходной частоты. Известны решения высоковольтных ПЧ (ВПЧ) на базе АИТ [1], которые достаточно успешно конкурируют с МПЧ, например, Power Flex 7000 (фирма «Rockwell Automation»).

Структура силовых цепей ПЧ на базе АИТ в сочетании с активным выпрямителем тока существенно проще, чем у МПЧ. Схема АИТ выполнена на высоковольтных полупроводниковых ключах с большими потерями энергии на переключение. Это ограничивает возможности формирования выходного тока АИТ. Для снижения количества переключений используется избирательная ШИМ [1] с подавлением высших гармоник (5-й, 7-й, 11-й). При этом по данным работы [1] коэффициент гармоник (ТНД) выходного тока АИТ завышен и составляет порядка 5%. Возможности получения более высоких показателей качества выходного тока и напряжения АИТ рассмотрены в работах [3,4] при использовании релейного регулятора для формирования тока нагрузки.

Известные решения применительно АИТ [1 – 4] ориентированы на формирование тока. Вместе с тем, вопрос использования АИТ в режиме источника синусоидального напряжения на данный момент времени изучен недостаточно. Проблема упрощения силовых цепей ВПЧ при соответствии показателей качества выходного напряжения и входного тока стандартам [5] на данное время остается актуальной. Ее решение будет способствовать расширению областей применения ВПЧ. Перспективным является использование ПЧ на базе АИТ и в низковольтном ЭП, где они вполне смогут конкурировать с «классическим» решением на базе двухуровневого инвертора с активным выпрямителем напряжения на входе.

Цель работы. Разработать принципы использования автономного инвертора тока в режиме источника синусоидального напряжения.

При этом следует решить следующие задачи:

- исследовать возможности использования релейного принципа регулирования при формировании выходного напряжения АИТ, разработать соответствующую систему управления АИТ;
- разработать математическую модель и выполнить исследования предложенного решения в двигательном и генераторном режимах работы.

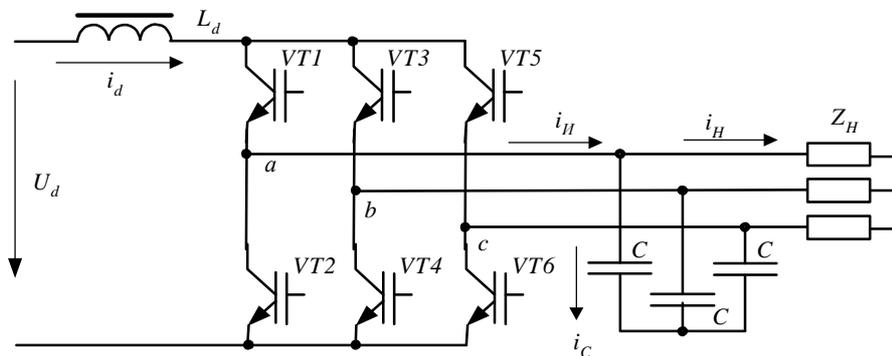


Рис. 1. Структура силовых цепей АИТ

Изложение основного материала. Схема трехфазного мостового АИТ на IGBT (рис. 1) содержит выходной емкостной фильтр высших гармоник, который также обеспечивает коммутацию тока нагрузки при запираии ключей АИТ. Независимо от используемого алгоритма АИТ формирует в выходных фазах токи i_H импульсной формы, которые являются суммой токов конденсатора i_C и нагрузки i_H ($i_H = i_C + i_H$). При пульсирующем выходном токе АИТ емкостной фильтр существенно меняет его режим работы, что усложняет задачу получения синусоидального тока нагрузки.

Предложен принцип управления, обеспечивающий работу АИТ в режиме источника синусоидального выходного напряжения. При этом в системе управления используются три релейных регулятора напряжения в выходных фазах АИТ, для которых задается допустимое отклонение δ выходного фазного напряжения u_ϕ относительно заданного значения $u_{3\text{АД}} = U_{1m} \sin \omega t$. Для положительной полуволны u_ϕ , если $u_\phi < u_{3\text{АД}} + \delta$, то формируется сигнал $P=1$ на включение ключа, обеспечивающий протекание в выходной фазе АИТ тока i_H положительной полярности, в противном случае $P=0$. Для отрицательной полуволны u_ϕ аналогичным образом формируется сигнал N на включение ключа, обеспечивающий протекание в выходной фазе АИТ тока отрицательной полярности.

Формирование импульсов управления ключами АИТ осуществляется в соответствии с первой гармоникой тока i_H (рис. 2, а), которая отстает на угол β от напряжения u_ϕ . При этом учитываются следующие особенности использования схемы АИТ для коммутации тока источника I_d :

- а) нельзя разрывать ток источника – всегда должны проводить ключи в двух или трех плечах моста;
- б) следует исключить КЗ нагрузки, когда замкнуты 3 ключа АИТ, подключающие его выходы к одному из зажимов источника;
- в) при использовании бестоковых пауз (нулевых состояний) для регулирования выходного тока следует замыкать ключи одного из плеч для протекания тока источника.

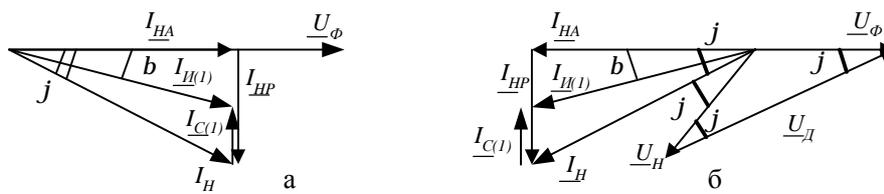


Рис. 2. Векторные диаграммы для выходной фазы АИТ в двигательном (а) и генераторном (б) режимах

Принцип формирования выходного напряжения АИТ иллюстрирует рис. 3, где период выходного напряжения разбит на шесть интервалов ($\tau_1 - \tau_6$). На интервале τ_1 токи в выходных фазах a и c положительны и формируются при отпирании ключей $VT1$ и $VT5$ соответствующими релейными регуляторами (P_a и P_c). Ток в фазе b при этом отрицательный и протекает через постоянно открытый ключ $VT4$. При запираии ключей $VT1$ и $VT5$ отпирается ключ $VT3$ в фазе b , обеспечивая протекание тока источника через ключи $VT3$ и $VT4$.

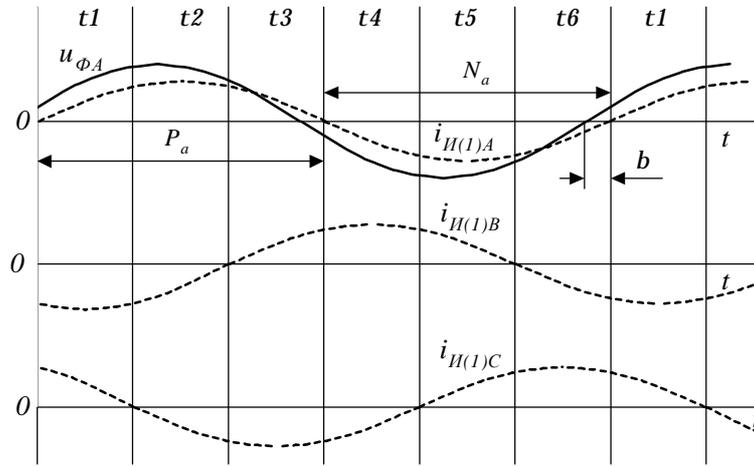


Рис. 3. Принцип формирования выходного напряжения АИТ

Напряжения управления ключами АИТ формируются в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned}
 K1 &= (Pa \wedge t1) \vee t2 \vee (Pa \wedge t3) \vee t5 \wedge (\overline{Pb \vee Pc}), & K2 &= (Na \wedge t4) \vee t5 \vee (Na \wedge t6) \vee t2 \wedge (\overline{Nb \vee Nc}); \\
 K3 &= (Pb \wedge t3) \vee t4 \vee (Pb \wedge t5) \vee t1 \wedge (\overline{Pa \vee Pc}), & K4 &= (Nb \wedge t6) \vee t1 \vee (Nb \wedge t2) \vee t4 \wedge (\overline{Na \vee Nc}); \\
 K5 &= (Pc \wedge t5) \vee t6 \vee (Pc \wedge t1) \vee t3 \wedge (\overline{Pa \vee Pb}), & K6 &= (Nc \wedge t2) \vee t3 \vee (Nc \wedge t4) \vee t6 \wedge (\overline{Na \vee Nb}).
 \end{aligned}$$

Значения переменных τ_i , принимающих единичное значение $\tau_i=1$ на соответствующих интервалах ($\tau_1 - \tau_6$), определяются с учетом угла сдвига фаз β выходного тока АИТ $i_{II} = I_{II m(1)} \sin(\omega t - \beta)$ относительно напряжения задания ($u_{\phi A}$) $u_{3AD} = U_{3AD m(1)} \sin(\omega t)$. Следует отметить, что данный алгоритм предполагает минимальное количество переключений ключей, поскольку в течение 1/6 периода выходной частоты переключения отсутствуют и соответствующий ключ АИТ открыт постоянно.

Значение тока I_d на входе АИТ задается исходя из следующих соображений. Минимальное значение I_d , при котором достигается обработка заданного значения выходного напряжения АИТ, определяется первой гармоникой выходного тока $I_{d \min} = I_{II m(1)}$. Этому соответствует коэффициент модуляции по амплитуде $\mu=1$ и минимальное количество переключений ключей АИТ. При этом напряжение на входе АИТ U_d – максимальное, его значение можно определить исходя из равенства активной мощности на входе и выходе АИТ (потерями энергии в схеме АИТ пренебрегаем)

$$P_d = U_d \cdot I_d = 3U_{\phi} \cdot I_{II(1)} \cos\beta \quad \text{и} \quad I_{II(1)} = \frac{I_{II m(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}.$$

$$\text{Отсюда} \quad U_d = \frac{3}{\sqrt{2}} U_{\phi} \cos\beta = 2.12 U_{\phi} \cos\beta.$$

Если на входе АИТ используется трехфазный мостовой выпрямитель, то $U_d=2.34U_{\phi C}$ ($U_{\phi C}$ – фазное напряжение сети переменного тока). Таким образом, реализация преобразователя частоты на базе АИТ возможна при прямом подключении к сети без трансформатора и имеется возможность некоторого увеличения напряжения АИТ.

При $I_d > I_{d \min}$ коэффициент модуляции μ уменьшается при неизменном значении $I_{II m(1)}$ и увеличении длительности бестоковых пауз. Таким образом, система адаптивна по заданию I_d и не требует точного расчета значения тока I_d , как это осуществляется в известных системах с работой в режиме источника тока. Это же можно отметить и по отношению к значению угла β – система сохраняет работоспособность, разве только, при некотором ухудшении формы напряжения. Вместе с тем, при снижении μ частота переключения ключей f_M возрастает, что приводит к увеличению потерь энергии в них.

Следует отметить, что замыкание ключей одного плеча АИТ в бестоковых паузах приводит к увеличению мгновенного значения тока i_d . В свою очередь это способствует увеличению длительности пауз и дальнейшему увеличению тока i_d . Таким образом, система регулирования неустойчива и склонна к увеличению тока в звене постоянного тока при постоянных значениях выходного тока и напряжения. Это предполагает необходимость стабилизации значения I_d с использованием замкнутой системы автоматического регулирования.

Частота переключения ключей АИТ также определяется заданным значением отклонения δ и возрастает при его уменьшении. И здесь нужен разумный компромисс между достигаемым качеством выходного напряжения (достигается при уменьшении δ), выбором значения I_d и частоты переключения ключей. При снижении амплитуды выходного напряжения напряжение U_d на входе АИТ пропорционально снижается – потери переключения в ключах уменьшаются, соответственно значение отклонения δ можно снижать.

Скорость изменения выходного напряжения АИТ определяется емкостью конденсатора выходного фильтра. Естественно, можно уменьшить емкость конденсатора, но это опять же приведет к увеличению частоты переключения ключей АИТ.

Применительно ВПЧ при использовании высоковольтных ключей частота f_M должна быть минимальной, для низковольтных ключей с малыми потерями переключения ограничения по частоте не являются определяющими.

Моделирование предложенных решений. Моделирование выполнено при использовании программного пакета MATLAB. Разработана математическая модель, которая включает в себя (рис.4): трехфазный мост на IGBT; идеальный источник тока с входом задания I_d ; активно-индуктивную нагрузку (Load); выходной емкостной фильтр (filtr); систему управления (SU), а также комплект измерительных приборов (на рис.4 не показан). Устанавливаются частота ($f_{ВЫХ}$) и амплитуда выходного напряжения (U_m), отклонение δ (delta), угол β (faza).

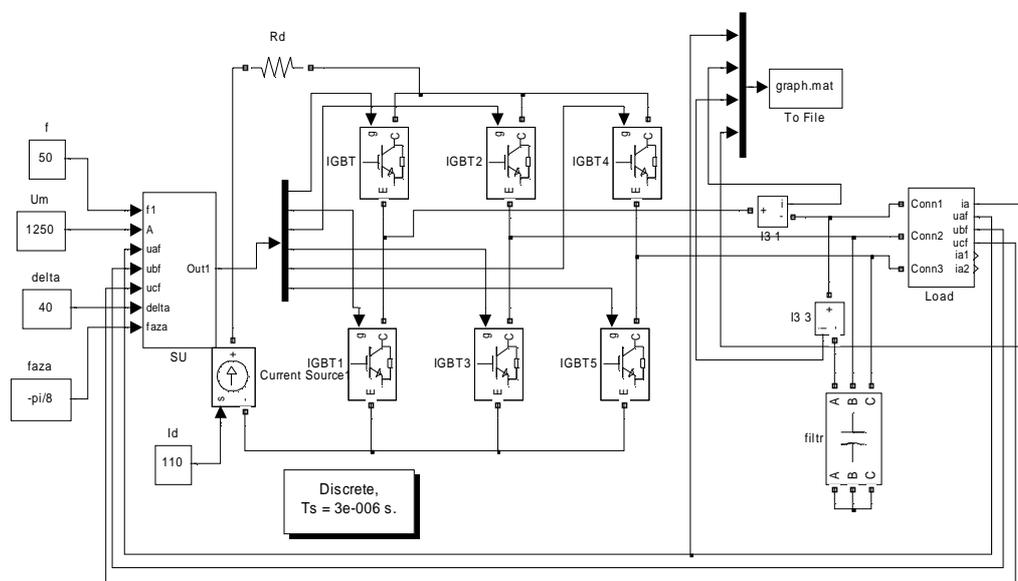


Рис. 4. Модель для исследования АИТ

Моделирование выполнялось для двигательного (с передачей энергии в нагрузку) и генераторного режимов работы АИТ. В двигательном режиме исследовалась работа на RL – нагрузке. В генераторном режиме последовательно с нагрузкой вводится идеальный источник напряжения U_d . Параметры его выбраны в соответствии с векторной диаграммой на рис. 2, б. При этом сопротивление нагрузки Z_H , ток i_H , напряжение U_ϕ и реактивный ток нагрузки i_{HP} остаются неизменными. Активный ток нагрузки i_{HA} изменяет направление на противоположное. С учетом этого значение напряжения $U_d = 2U_\phi \cos \phi$, фаза равна ϕ . Величина угла при этом $\beta + 180^\circ$.

В процессе исследований рассматривалась отработка АИТ выходного напряжения при различных значениях параметров схемы и настройке релейного регулятора напряжения. В табл. 1 приведены показатели работы схемы АИТ при RL - нагрузке с $Z_H=10$ Ом, $\cos \phi=0.8$, емкости фильтра $C=90$ мкФ (47% от значения емкости фильтра необходимой для компенсации реактивной мощности нагрузки при частоте 50 Гц) и различных значениях тока I_d на входе АИТ при частоте выходного напряжения 50 Гц. При частоте выходного напряжения $f_{ВЫХ}=50$ Гц значение угла $\beta=21,5^\circ$ (задавалось значение $\beta=\pi/8=22,5^\circ$). Заданное значение $U_m=1250$ В, $\delta=40$ В. Полученное значение $I_{d\text{мин}}=106$ А. Коэффициент гармоник (THD) определялся при учете гармоник с порядком до 40. Для сравнения в работе [4] достигается $THD_i=1,56\%$.

В процессе исследований рассматривалась отработка АИТ выходного напряжения при различных значениях параметров схемы и настройке релейного регулятора напряжения. В табл. 1 приведены показатели работы схемы АИТ при RL – нагрузке с $Z_H=10$ Ом, $\cos \phi=0.8$, емкости фильтра $C=90$ мкФ (47% от

значения емкости фильтра необходимой для компенсации реактивной мощности нагрузки при частоте 50 Гц) и различных значениях тока I_d на входе АИТ при частоте выходного напряжения 50 Гц. При частоте выходного напряжения $f_{ВЫХ}=50$ Гц значение угла $\beta=21.5^\circ$ (задавалось значение $\beta=\pi/8=22.5^\circ$). Заданное значение $U_m=1250$ В, $\delta=40$ В. Полученное значение $I_{d\min}=106$ А. Коэффициент гармоник (THD) определялся при учете гармоник с порядком до 40. Для сравнения в [4] достигается $THD_i=1.56\%$.

Также в табл.1 приведены данные при $f_{ВЫХ}=25$ Гц. Из условия $U/f=const$ задавалось значение $U_m=625$ В ($Z_H=5$ Ом, $\cos\varphi=0.8$).

Значение угла $\beta=33.5^\circ$ (задавалось значение $\beta=34^\circ$). Коэффициент гармоник определялся для гармоник с порядком до 80. Существенное значение на гармонический состав напряжения и тока АИТ оказывает заданное отклонение δ . Аналогичные результаты были получены и для генераторного режима работы АИТ. Также исследования выполнены по оценке влияния отклонения заданного значения β относительно реального значения. Результаты приведены в табл.2. Система сохраняет работоспособность, но при ухудшении гармонического состава выходного напряжения. Причем, в двигательном режиме к существенному ухудшению выходного напряжения приводит заниженное значение β , а в генераторном ухудшение проявляется в меньшей степени.

Осциллограммы выходного напряжения АИТ (u_ϕ), токов i_H , i_U , i_C , напряжения на входе АИТ u_d при $f_{ВЫХ}=50$ Гц приведены на рис. 5.

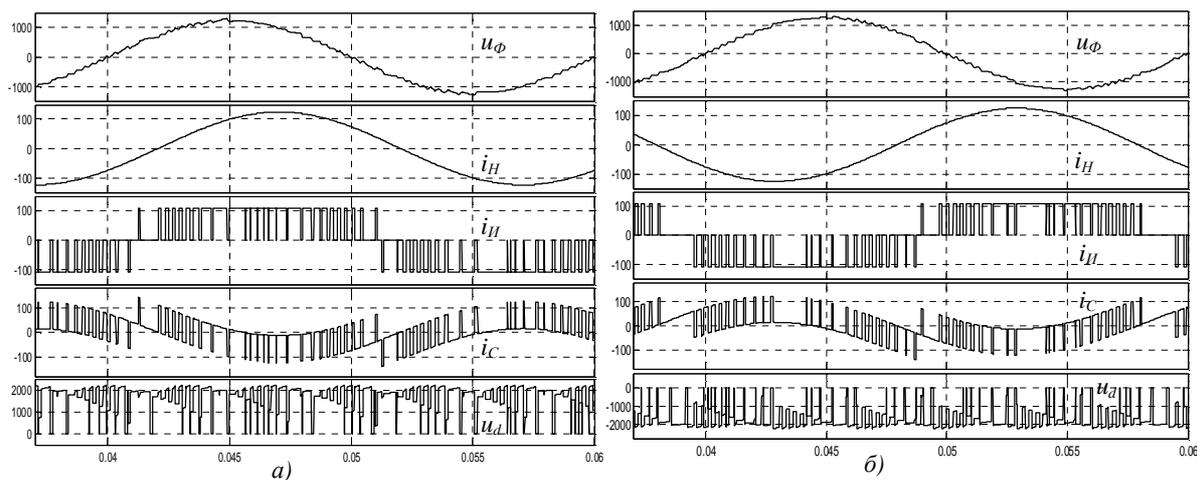


Рис. 5. Осциллограммы напряжений и токов АИТ при $f_{ВЫХ}=50$ Гц: а) двигательный режим; б) генераторный режим

Моделирование при использовании на входе АИТ источника напряжения подтвердило предположение о неустойчивости системы без стабилизации тока I_d .

Выводы

Предложенный принцип управления обеспечивает работу АИТ в режиме источника синусоидального напряжения. При этом гармонический состав выходного напряжения АИТ соответствует стандартам [5] во всем диапазоне регулирования выходного напряжения и частоты. Предметом дальнейших исследова-

Таблица 1

Результаты моделирования

δ , В	$f_{ВЫХ}$, Гц	I_ϕ , А	f_M , Гц	THD_{U_s} , %	THD_{i_s} , %	$U_\phi/U_{Зад}$, %
Двигательный режим						
40	50	100	450	3.37	1.07	95
		106	650	3.17	0.57	98
		110	1200	1.92	0.37	99
		140	1650	1.84	0.25	99.36
40	25	120	1200	4.18	0.48	97.6
20	25	120	2200	1.86	0.2	99
Генераторный режим						
40	50	100	450	3.62	1.07	1.03
40	50	106	650	2.25	0.46	1.01
40	50	110	1100	1.89	0.39	1.009
40	50	140	1700	1.75	0.23	1

Таблица 2

Результаты моделирования

I_ϕ , А	β , °	THD_{U_s} , %	THD_{i_s} , %
Двигательный режим			
110	-4.5	8.37	2.41
110	-9	5.57	1.52
110	-30	1.69	0.24
110	-36	2.58	0.49
Генераторный режим			
110	4.5+180	5.21	1.15
110	9+180	3.79	0.61
110	30+180	2.17	0.48
110	36+180	5.8	1.59

ний является разработка структуры системы автоматического регулирования применительно асинхронного электропривода.

Список литературы

1. Лазарев Г. Преобразователи для частотно-регулируемого электропривода / Г.Лазарев //Силовая Электроника.- 2008.- №8(132).- С.14-23.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты/ Р.Т. Шрейнер// – Екатеринбург: УРО РАН.- 2000. – 654 с.
3. Волков А.В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией/А.В.Волков, А.И. Косенко// Техн. електродинаміка.- Київ: ІЕД НАНУ.- 2008.- Тематичний. вип., Ч.1.- С.81-86.
4. Волков А.В. Исследование энергетических показателей асинхронного электропривода на основе автономного инвертора тока/ А.В.Волков, А.И. Косенко// Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К: “Техніка”. – 2011.- №(03) 79. – С. 40-41.
5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Рекомендовано до друку: проф. Івановим О.Б.