

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Шавелкин А.А., Белобородько О.А., Мирошник Д.Н.
Донецкий национальный технический университет
vladimir@koe.dgtu.donetsk.ua

In paper the principle of construction of the power circuit of the high-voltage converter of frequency is considered at serial connection of single-phase inverters of a voltage. The principle of control with multilevel formation of a output voltage which combines advantages of peak regulation with a method of pulse-width modulation is offered. Some results of researches executed with use of package Simulink and Power System Blockset are given.

Мощные высоковольтные асинхронные двигатели (АД) широко используются для привода насосов, вентиляторов, дымососов и других установок практически во всех областях промышленности.

Отсутствие регулирования, равно как и использование дросселирования (управление заслонками), обуславливает крайне низкий КПД установок, а соответственно, и значительный перерасход электроэнергии. Мощность АД при этом составляет до 5 МВт и выше.

Решение вопроса энерго- и ресурсосбережения непосредственно связано с применением для регулирования скорости приводных АД высоковольтных преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока при синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), как обеспечивающих наилучшие энергетические показатели работы электропривода.

Высокое напряжение в звене постоянного тока ($U_d=9.8\text{kВ}$) при выходном напряжении 6кВ обуславливает целый ряд проблем с реализацией силовой схемы, как в части выполнения выпрямителя, фильтра (конденсатор), так и автономного инвертора напряжения (АИН). Это вызвано отсутствием высоковольтных полупроводниковых приборов и конденсаторов - в настоящее время IGBT - транзисторы выпускаются на напряжение 4700В, GTO - транзисторы - 6000В. Поэтому только несколько фирм выпускают преобразователи без трансформаторов [1].

Основным схемным решением при реализации частотного электропривода является использование хорошо проработанного варианта низковольтного преобразователя с АИН с ШИМ в сочетании с понижающим трансформатором на входе и повышающим трансформатором на выходе. Очевидно, что при этом преобразователь должен быть рассчитан на ток в несколько тысяч ампер, а это предполагает параллельное соединение силовых IGBT модулей в схеме инвертора. Следует также учитывать, что для повышения энергетических показателей и обеспечения минимальных искажений потребляемого тока используется 12-пульсная схема выпрямления и соответственно трансформатор с двумя комплектами вторичных обмоток. Отношения мощностей входного и выходного трансформаторов по отношению к мощности АД составляют при этом [1] 1.25 и 1.6 соответственно. При этом также трудно избежать установки выходных фильтров с высоковольтными конденсаторами.

Альтернативой к рассмотренному варианту является решение без выходного трансформатора [2] при последовательном соединении нескольких инверторов в каждой фазе преобразователя, отдельные фазы при этом соединяются по схеме Y. Для формирования выходного напряжения используется мультиплексорная многоуровневая ШИМ.

Такой вариант построения силовой цепи был положен в основу исследований проводимых на кафедре электротехники ДонНТУ. Схема силовых цепей преобразователя при линейном выходном напряжении 6000В имеет вид представленный на рис.1. Каждая фаза состоит из шести низковольтных АИН ($U_{z1}-U_{z6}$). Важно отметить, что инвертора однофазные - выполнены по мостовой схеме на четырех IGBT транзисторах. Питаются они через трехфазные диодные выпрямители от изолированных вторичных обмоток входного понижающего трансформатора. Следует отметить, что конструкция входного трансформатора из-за большого числа вторичных обмоток несколько усложняется при практически том же расходе меди (вторичные обмотки рассчитаны на меньший ток). При использовании обычных силовых IGBT- модулей (полумост на двух транзисторах) на ток 400А и напряжение 600В (допустимое напряжение-1200-1700В) схема содержит $3*6*2=36$ модулей, мощность преобразователя при этом составляет порядка 5МВт. В варианте с трансформаторами на входе и выходе при использовании равноценных модулей и той же мощности ток составляет порядка 4000А, соответственно число модулей составит $3*10=30$ (10 модулей параллельно).

При последовательном соединении ток нагрузки проводят всегда все шесть инверторов, а синусоида выходного фазного напряжения получается как сумма напряжений (u_k) каждого из АИН:

$$u_a = U_m \cdot \sin \omega t = \sum_{k=1}^6 u_k \quad (1)$$

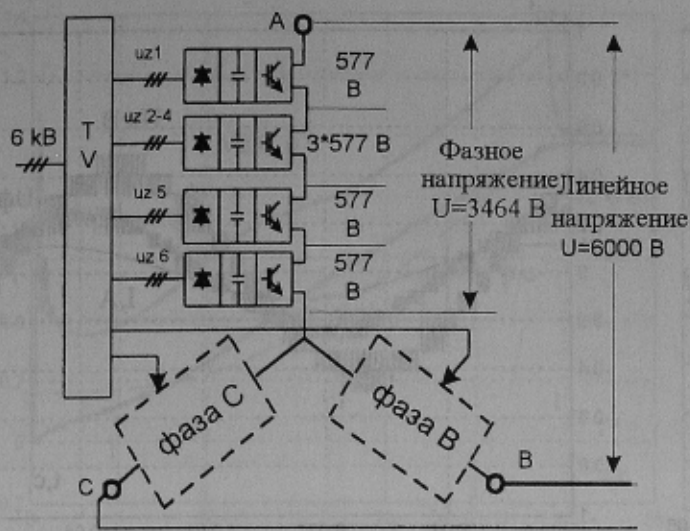


Рисунок 1 - Схема высоковольтного преобразователя

то же время напряжения U_{z2-Uz4} полностью идентичны. Эти факторы в значительной степени упрощают выполнение, как силовой цепи, так и системы управления преобразователем. Для снижения пульсаций выходного напряжения и соответственно улучшения его гармонического состава целесообразно использовать в U_{z6} однополярную модуляцию - осциллограмма выходного напряжения приведена на рис. 2 последней.

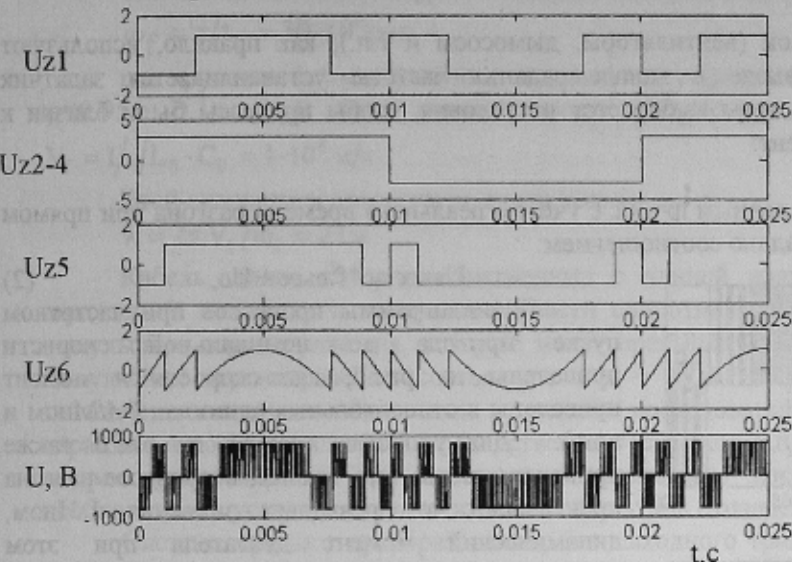


Рисунок 2 - Законы управления инверторами фазы преобразователя U_{z1} , U_{z2-Uz4} , U_{z5} , U_{z6} и выходное напряжение U_{z6}

Важным является также то, что данный способ сочетает в себе достоинства амплитудного регулирования с ШИМ, при этом регулирование выходного напряжения достигается изменением числа ступенек и соответственно амплитуды напряжения при постоянном коэффициенте модуляции. Осциллограмма линейного напряжения и тока при частоте 25 Гц и значении $U=3000В$ приведена на рис. 3, б, откуда видно, что число ступеней в кривой напряжения уменьшилась вдвое.

Для сравнения качества выходного напряжения преобразователя с предложенным алгоритмом управления и обычным ШИМ был произведен гармонический анализ. Он показал, что при частоте 50 Гц пятая гармоника (наиболее выраженная) составляет 2% от основной гармоники, а гармоника с частотой 1050 Гц - 3,6%. При снижении частоты до 25 Гц несколько возрастает седьмая гармоника с 1,1% до 3,1%. Отсюда следует, что гармонический состав со снижением частоты изменяется в незначительной степени.

В то же время для обычного АИН с ШИМ снижение частоты и соответственно напряжения приводит к ухудшению гармонического состава в большей степени - пятая гармоника возросла до 16,6%, тогда как несущая - 37,5%. Последнее объясняется увеличением коэффициента модуляции. Осциллограммы выходного напряжения АИН при частоте 25 Гц приведены на рис. 4 (частота модуляции та же - 1050 Гц).

При моделировании процессов в системе высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в качестве объекта управления исследовался АД типа АЗ-12-52 ($R_{ном}=630кВт$, $U_{ном}=6кВ$), используемый для

Каждое из u_k в (1) может принимать значения $+U_d$, 0 , $-U_d$ ($U_d = U_{фп}/6$ - напряжение в звене постоянного тока), т.е. каждая из полуволн выходного фазного напряжения разделена на 6 уровней. При этом в любой момент времени фазное напряжение

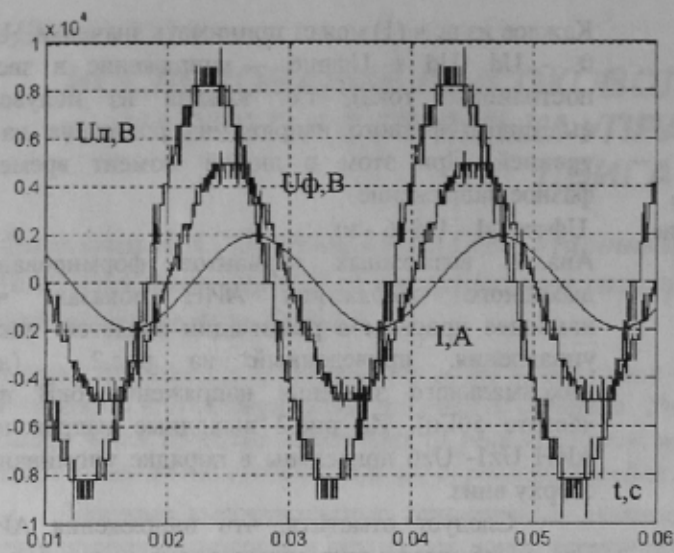
$$U_{ф} = k \cdot U_d - U_d \cdot (6 - k).$$

Анализ возможных вариантов формирования выходного напряжения АИН показал, что наиболее простым в реализации является закон управления, приведенный на рис. 2 (для максимального значения напряжения 6кВ при частоте 50 Гц). На рис. 2 выходные напряжения АИН U_{z1-Uz6} приведены в порядке упоминания сверху вниз.

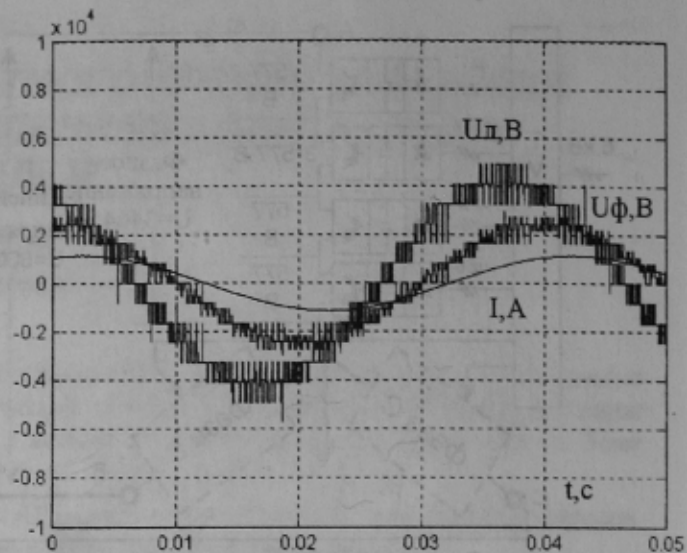
Следует отметить, что напряжения АИН U_{z1-Uz5} имеют прямоугольную форму и только U_{z6} имеет сложную форму, которая для реализации предполагает использование ШИМ. В

Исследования схемы проводились с использованием программного пакета MATLAB 6.1 (приложение Simulink, Power System Blockset). Осциллограммы выходного фазного напряжения и тока, а также линейного напряжения ($U_{л} = 6 кВ$, частота $f=50Гц$) полученные путем моделирования схемы преобразователя, приведены на рис. 3, а. Частота модуляции при этом составляет 1050 Гц.

Как видно из рис. 3, а форма выходного напряжения практически синусоидальна. Полуволна выходного линейного напряжения содержит 12 ступеней, фазного - 6. Таким образом размах высокочастотных пульсаций линейного напряжения составляет 1/12 от амплитуды (707В), в то время как в обычном ШИМ инверторе (с выходным трансформатором) с синусоидальной модуляцией размах пульсаций линейного напряжения составляет $U_d = 6000/0.612 = 9804В$, что почти в 14 раз выше.



а)



б)

Рисунок 3 – Напряжение и ток на выходе преобразователя при частотах: а)- 50Гц; б)-25Гц

привода мельничного вентилятора. Параметры модели и исходные данные выбраны в соответствии с [3]. Момент сопротивления на валу АД задавался соотношением:

$$M_c = M_{ном} \cdot (0.15 + 0.85 \omega / \omega_{ном}).$$

Для приводов со «спокойной» нагрузкой (вентиляторы, дымососы и т.п.), как правило, используют разомкнутые системы регулирования. На входе в канале задания частоты устанавливается задатчик интенсивности, а темп нарастания задания частоты выбирается из условия, чтобы процессы были близки к установившимся. При этом динамический момент:

$$M_{дин} = J_{пр} \cdot (d\omega/dt) < M_{ном}.$$

Время разгона привода $t_p \geq t_{пр}$ выбрано равным $t_p = 30$ с с учетом реального времени разгона при прямом пуске АД $t_{пр} = 12$ с [3]. Выходное напряжение задано соотношением:

$$U_{вых} = c \cdot f^2_{вых} + U_0, \quad (2)$$

Осциллограммы процессов при частотном пуске привода до номинальной скорости приведены на рис.5, где скорость и момент приведены в относительных единицах ($M/M_{ном}$ и n/n_0). Для удобства анализа на рис.5 также приведена видно, что ток АД в процессе разгона практически не превышает значения $1.3 I_{ном}$, динамический момент двигателя при этом практически не изменяется и двигателя присутствуют только в момент трогания. По результатам исследований следует отметить, что использование разомкнутой по скорости системы затрудняет наладку системы, поскольку весьма трудно установить оптимальное значение выходного напряжения на начальной стадии

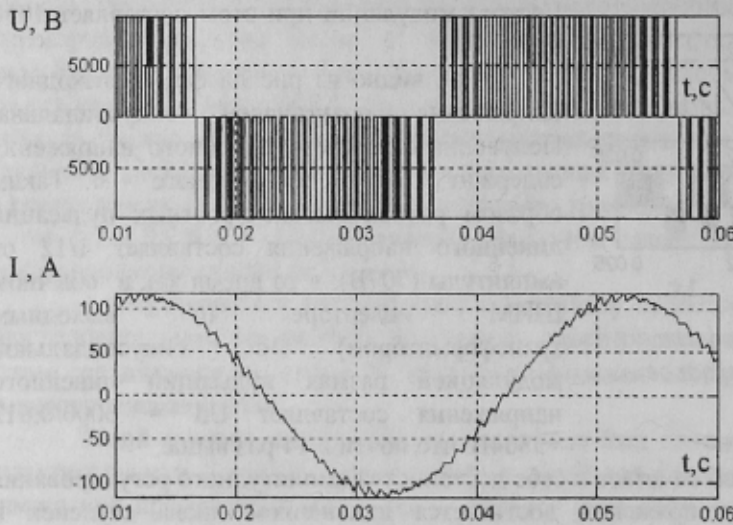


Рисунок 4 – Выходное линейное напряжение и ток АИН с традиционным ШИМ-управлением при частоте 25Гц

пуска, (составляющая U_0 в (2)). Это обусловлено нестабильностью значения момента трогания, что приводит к возможности возникновения бросков тока и момента в начале пуска (рис.5). В связи с чем целесообразно использовать замкнутые по скорости САР, тем более что стоимость установки датчика скорости в сравнении с основным комплектом оборудования мизерна.

Важной проблемой, которую необходимо учитывать при проектировании электропривода является проблема «длинного кабеля» [1], соединяющего преобразователь с АД. Это обусловлено импульсным характером выходного напряжения АИН с ШИМ. Прохождение импульсного напряжения с крутым фронтом обуславливает волновой характер переходных процессов в кабеле, вызывающих появление импульсных перенапряжений на зажимах кабеля. При этом кабель можно рассматривать как однородную линию с распределенными параметрами.

Для питания АД типа АЗ-12-52 [3] используется кабель ААШ8-3*95 с сопротивлением $R_0 = 0.31 \text{ Ом/км}$, $X_0 = 0.078 \text{ Ом/км}$, $C_0 = 0.42 \text{ мкФ/км}$, $L_0 = 0.25 \text{ мГн/км}$, волновое сопротивление которого:

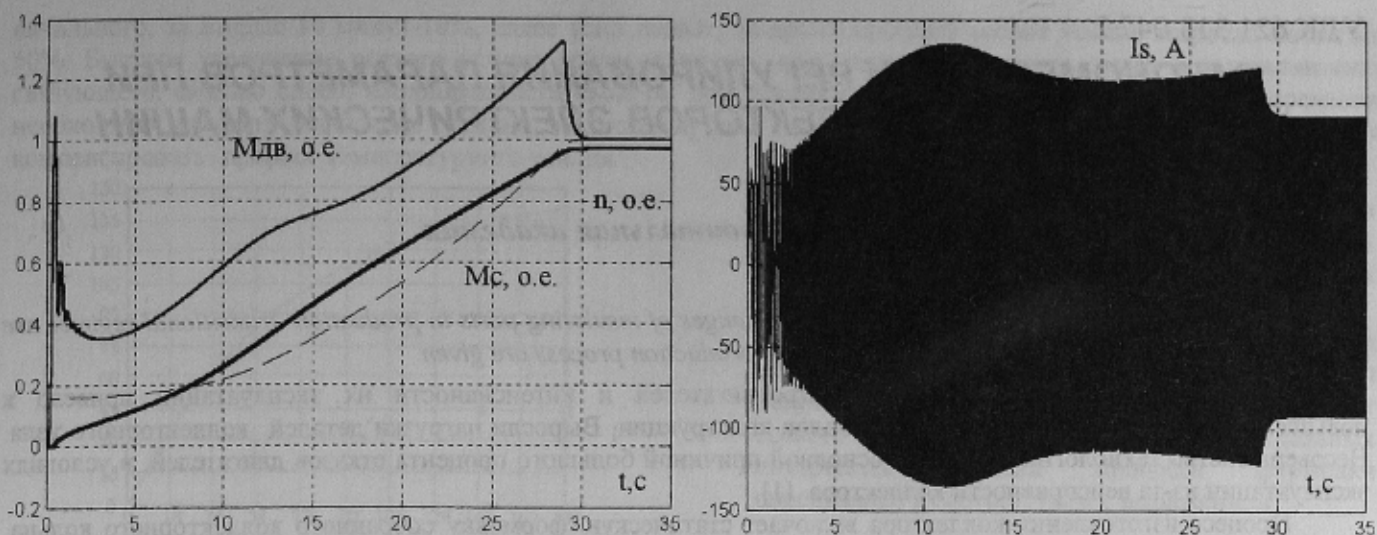


Рисунок 5 – Осциллограммы частотного пуска АД типа А3-12-52 на номинальную скорость

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} = 24.3 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная частота фронта импульса напряжения [1]:

$$\omega_f = \pi/t_f = 30 \cdot 10^6 \text{ рад}^{-1},$$

где крутизна фронта импульса напряжения определяется скоростью переключения IGBT и составляет $t_f = (0.05 - 0.1) \mu\text{с}$. В такой линии скорость распространения высокочастотной волны (фронта импульса)

$$V_f = 1/\sqrt{L_0 \cdot C_0} = 1 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Этой скорости соответствует длина волны:

$$\lambda = 2\pi V_f / \omega_f = 21 \text{ м.}$$

Кабель, длина которого соизмерима с длиной волны, считается «длинным» кабелем. С учетом отраженной волны из-за несогласованности сопротивлений кабеля с нагрузкой на зажимах АД возможны импульсные перенапряжения, которые могут превышать амплитуду импульса вдвое. При обычном варианте импульсные перенапряжения составляют $2U_d = 9804 \cdot 2 = 19608 \text{ В}$. Это значение превышает допустимое значение, в силу чего обязательна установка последовательного силового LC- фильтра на выходе АИН и параллельного RC- фильтра непосредственно у зажимов АД. Вследствие высоких напряжений такие фильтры весьма дорогостоящие. При предложенном способе, когда амплитуда импульсов снижена в 14 раз, необходимость установки дополнительных фильтров отпадает.

Система прямого преобразования, без выходного трансформатора, обеспечивает КПД преобразователя на уровне 98 % и коэффициент мощности 95%, что устраняет необходимость во входном фильтре. При этом соблюдаются нормативные требования для гармонического состава генерируемой энергии.

Выводы

1. Рассмотренный вариант построения схемы высоковольтного ПЧ с последовательным соединением нескольких низковольтных АИН позволяет исключить выходной трансформатор, без существенного увеличения силовых элементов схемы, что благоприятно отразится и на его стоимости.
2. Использование амплитудного многоуровневого формирования выходного напряжения в сочетании с ШИМ позволяет существенно улучшить гармонический состав напряжения и тока АД во всем диапазоне частот, а также устраняет эффект «длинного кабеля», что позволяет исключить необходимость установки выходных фильтров.
3. При построении системы электропривода можно использовать наиболее простые методы «скалярного» управления, при этом желательно замыкать систему по скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корпорация Триол – Современное оборудование и технологии. Каталог продукции и применений 2000г.
2. Energy-saving type Mitsubishi high- voltage inverter. Revised publication, effective May 2000.
3. В.Ф. Сивокобыленко, В.И. Костенко. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. Донецк, 1979.- 110 с.