

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

О.В. Крюков, А.В. Серебряков (Нижний Новгород)

### Введение

Электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) являются основными установками компрессорных станций (КС) всех магистральных газопроводов (МГ) [1-4]. Концепцией энергосбережения, энергоэффективности и надежности ЭГПА [5-9] определена устойчивая тенденция перехода на частотное регулирование электроприводов на базе высоковольтных преобразователей частоты (ВВ ПЧ) [10-13].

### Основные характеристики ВВ ПЧ

Одним из основных энергетических показателей, характеризующих технический уровень ВВ ПЧ, является степень искажения формы выходного напряжения и тока ПЧ в ЭГПА [14-16]. Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных ПЧ с примыкающими сетями связана с потреблением реактивной мощности на основной частоте и искажениями формы тока в сети. Ограничение потребления реактивной мощности до нормативных  $\cos\varphi$  обычно обеспечивается в ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН) и неуправляемым выпрямителем (НВ). Для активных выпрямителей (АВ) в автономных инверторах тока (АИТ) имеются дополнительные фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ).

Нормы качества электроэнергии установлены ГОСТ 13109-97, который определяет коэффициент искажения кривой напряжения как полный коэффициент гармоник (THD). Нормально допустимые THD сетей 6-20 кВ не должно превышать 5 и 8%. При разложении в ряд кривой напряжения ограничиваются 40-ой гармоникой.

### Имитационные модели ВВ ПЧ

1. Имитационная модель двухуровневого АИН на IGBT в среде Matlab-Simulink [17-20] показана на рис. 1.

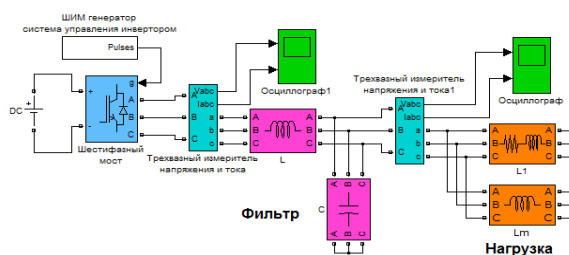


Рис. 1. Модель двухуровневого АИН.

Модель является базовой и состоит из идеального источника постоянного напряжения. ПЧ включает трехфазный АИН с ключами IGBT; встречно-параллельно транзисторам включены диоды - для пропускания индуктивных токов при активно-индуктивной нагрузке в момент коммутации. При скалярном регулировании ПЧ в диапазоне до 10:1, характерном для мощных электроприводов турбокомпрессоров, используется закон управления  $U/f = \text{const}$ . При моделировании использовались значения индексов ШИМ: при частоте инвертора 50 Гц индекс модуляции равен 1; при частоте 30 Гц – 0,6; при частоте 15 Гц – 0,3. Напряжение инвертора при этом меняется

в соответствии с известным выражением  $U_{ab} = 1,73m_d U_d / 2$ , а напряжение источника постоянного напряжения при питании от сети 6 кВ составляет  $U_d = 9798$  В.

2. Имитационная модель двухтрансформаторной схемы ПЧ с низковольтным АИН отличается от модели, представленной на рис. 1, тем, что в нее добавлен блок трансформатора, а напряжение источника принимается равным  $U_d = 1126$  В. Между АИН и АД устанавливается повышающий трансформатор - для согласования инвертируемого напряжения с напряжением машины.

3. Имитационная модель ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT состоит из двух источников напряжения с общей точкой, которые моделируются идеальными. Поэтому она отличается от модели на рис. 1 наличием блока трехуровневого моста. Амплитуда напряжения АИН формируется двумя АИН с  $U_d = 4899$  В.

4. Имитационная модель ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением инверторных модулей (для 11-уровневого АИН) в среде Matlab-Simulink, представлена на рис. 2.

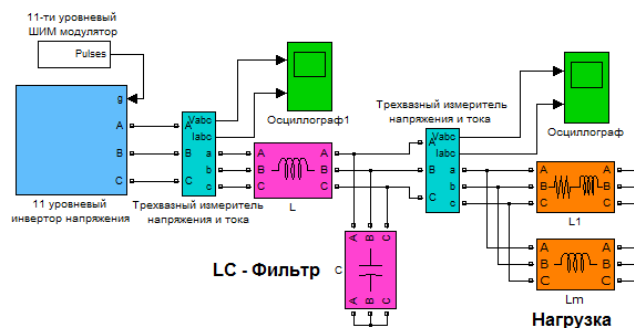


Рис. 2. Модель ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением АИН.

Инвертор состоит из 15 ячеек однофазных двухуровневых АИН, соединенных в звезду по 5 ячеек последовательно в луче, а 11 уровней напряжения достигаются последовательным соединением 5 источников напряжения в каждой фазе плюс нулевое значение. Напряжение каждого из источников  $U_d = 979,8$  В. Остальные элементы модели фильтр, нагрузка, измерительные элементы аналогичны предыдущим моделям.

5. Имитационная модель с ШИМ выпрямителем и ШИМ инвертором тока на SGCT представлена на рис. 3.

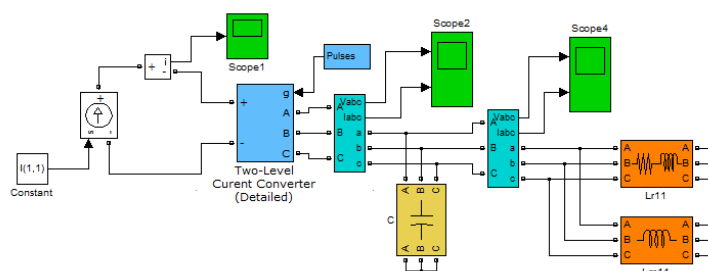


Рис. 3. Модель ПЧ с ШИМ выпрямителем и ШИМ инвертором тока на SGCT

Модель состоит из идеального источника тока, АИТ и  $R-L$  нагрузки  $\Gamma$ -образной схемы замещения АД. Ключи идеальны, САУ АИТ гарантирует отсутствие разрыва цепи тока в момент коммутации. Специальные буферные конденсаторы и С-фильтр параллельно нагрузке необходимы для совместимости АИТ с индуктивной нагрузкой.

**Результаты анализа гармонического состава ВВ ПЧ**

Измерения линейного напряжения  $U_{AB}$ , и тока фазы А, а также спектрального анализа напряжения и тока на выходе ПЧ получены при изменении частоты ШИМ и АИН. Всего получено более 600 осциллограмм [21,22]. Наиболее характерные из них:

1. Результаты моделирования ПЧ с двухуровневым АИН на IGBT представлены в табл. 1. Функции THDU и THDI двухуровневого АИН для различных значений частот инвертора и частот ШИМ для двигателей различной мощности (полный спектр гармоник) даны на рис. 4, а характерные осциллограммы – на рис. 5.

Частота ШИМ: 1000 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
$f_{инв}$ , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,5	197,5	68,58	119,7	197,3	68,58	120,3	197,8
THD I, %	9,7	15,23	9,7	8,6	13,74	9,06	9,74	15,3	9,656

Частота ШИМ: 1500 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
$f_{инв}$ , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,58	120,4	197,4	68,61	120,5	197,4	68,62	120,5	197,4
THD I, %	6,5	10,47	7,15	5,75	9,385	6,573	6,55	10,5	7,143

Частота ШИМ: 2500 Гц

Р ад, кВт	800			1250			3150		
$f_{инв}$ , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	68,67	120,5	197,8	68,67	120,5	197,8	68,68	120,5	197,8
THD I, %	3,92	6,39	4,59	3,46	5,712	4,16	3,948	6,418	4,592

Таблица 2

Значения THD (для гармоник  $n \leq 40$ ) по результатам моделирования 2-уровневого АИН

$F$ ШИМ, Гц	1000			1500			2500		
$f_{инв}$ , Гц	50	30	15	50	30	15	50	30	15
THD U, %	48,57	31	3,2	45,03	0,6	0,8	0,72	1,23	1,5

Таблица 1.

Значения THD двухуровневого инвертора напряжения при полном учете гармоник

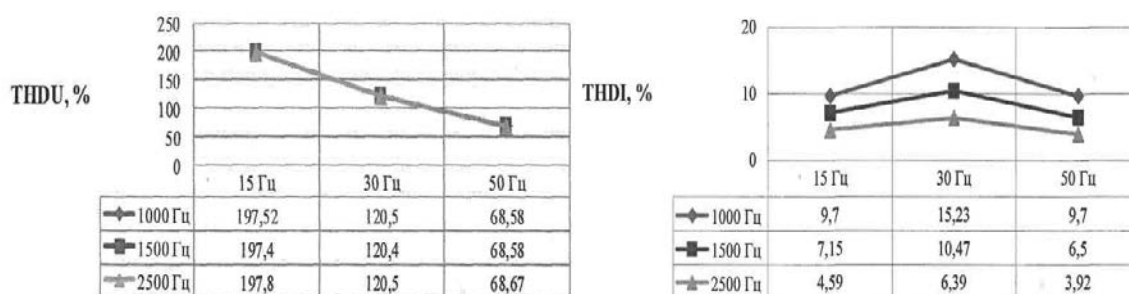


Рис. 4. Зависимости коэффициента гармоник напряжения и тока от частоты инвертора при разных частотах ШИМ ( $P_{ад}=800, 1250, 3150$  кВт).

Исследование гармонического состава выходного напряжения двухуровневого АИН проведено и на частоте ШИМ 2500 Гц. Сравнение полученных результатов с данными табл. 1 показывает, что при снижении выходной частоты и напряжения, гармонический состав напряжения существенно ухудшается. Зависимость THDU напряжения (гармоники  $n \leq 40$ ) двухуровневого АИН для различных значений частот инвертора и ШИМ приведена в табл. 2. Таким образом:

- Гармонический состав двухуровневого АИН без выходного фильтра крайне неблагоприятен. THDU достигает 200 % и использование данных ПЧ без мощного выходного фильтра невозможно. Коэффициент гармоник тока также велик – до 15% при частоте ШИМ 1000 Гц, снижаясь до величины 6,4% при частоте ШИМ 2500 Гц.
- При снижении выходной частоты и напряжения изменяется индекс модуляции, при этом ухудшается гармонический состав. При более глубоком снижении частоты THDU возрастает еще более значительно до 1,5 раз.
- Увеличение частоты ШИМ не сказывается на величине THDU, которая остается чрезмерно высокой даже при ШИМ 2500 Гц. Увеличение ШИМ до 2500 Гц уменьшает коэффициент THDU почти в 100 раз. Коэффициент THDI при росте частоты ШИМ снижается и мало зависит от частоты АИН.

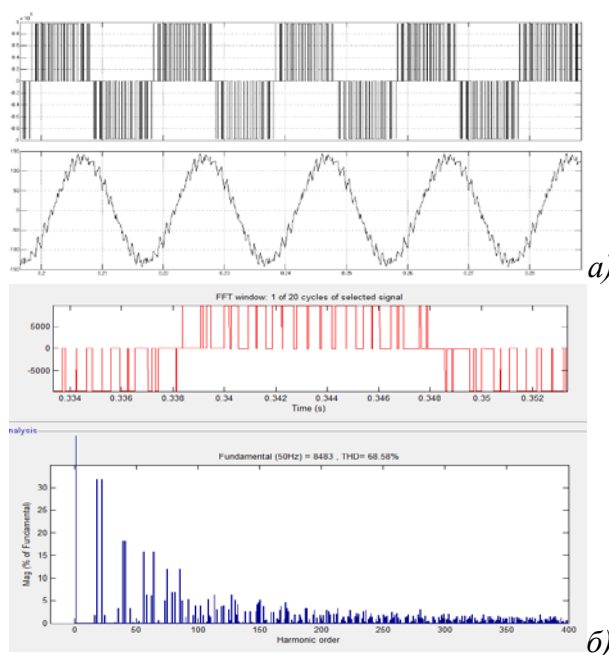


Рис. 5. Двухуровневый АИН без фильтра (при частоте ШИМ 1000 Гц и частоте инвертора 50 Гц): а) напряжение и ток нагрузки; б) напряжение нагрузки и спектр гармоник напряжения

- Гармонический состав напряжения ПЧ не зависит от мощности АД 6,0 кВт. THDI мало зависит от мощности АД для всех вариантов ПЧ.
- Применение синусного фильтра на выходе ПЧ позволяет снизить состав гармоник напряжения и тока: THDU до 4%, тока до 0,5%.

## 2. Результаты моделирования ПЧ с трехуровневым АИН на IGBT или IGCT:

- Искажение кривой выходного напряжения для трехуровневого АИН без фильтров имеет существенно меньшие значения THD по сравнению с двухуровневым инвертором. Характер зависимости THD от выходной частоты ШИМ аналогичен двухуровневым АИН. Величина THD мало зависит от мощности двигателя.

• Применение  $G$ -образного синусного фильтра при частоте ШИМ 1000 Гц позволяет получить допустимые значения ТНД напряжения и тока при изменении выходной частоты во всем диапазоне.

3. Результаты анализа ПЧ с многообмоточным трансформатором и каскадным соединением пяти инверторных модулей (11-уровневый АИН):

• Для каскадных АИН первые всплески гармоник появляются на частотах много выше частот ШИМ.

• Искажение формы тока на выходе 11-уровневого АИН мало, а ТНДИ менее 1 %. С увеличением частоты ШИМ наличие гармоник в токе еще более уменьшается.

4. Результаты анализа двухтрансформаторной схемы с низковольтным АИН:

• При отсутствии фильтра  $k_n$  напряжения очень большой, и использование данной схемы без выходного фильтра невозможно.

• Ступенчатый характер формы выходного напряжения ПЧ связан с тем, что выходной трансформатор имеет схему обмоток  $\Delta/Y$ .

• Применение низковольтного LC-фильтра на выходе АИН позволяет снизить  $k_n$  напряжения и тока до допустимых значений, но требуемая мощность фильтра велика.

5. Результаты моделирования ПЧ с ШИМ на SGCT с C-фильтром:

• Для АИТ характерно большее искажение формы выходного напряжения, чем формы выходного тока. В ПЧ этого типа необходимо использование C-фильтров на выходе ПЧ. Инверторы с ШИМ тока имеют малый диапазон частоты ШИМ.

• Применение выходного C-фильтра с реактивной мощностью 125 % от реактивной мощности АД позволяет иметь нормальные ТНД при частоте ШИМ 500 Гц.

• Увеличение степени компенсации реактивной мощности двигателя улучшает гармонический состав выходного тока и напряжения.

### Литература

1. Пужайло А. Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / Под ред. О. В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТИС, 2010. – 560с.
2. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. 2010. № 12. С. 24-31.
3. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей ГПА // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 33-39.
4. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. № 3 (19). С. 209-212.
5. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций // Автоматизация в промышленности. 2010. № 6. С. 29-31.
6. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С.47-49.
7. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №2. С. 5-10.
8. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. 2013. Т. 74. № 6. С. 1043-1048.

9. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. С.157-163.
10. Крюков О.В. Регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 3. С. 21-24.
11. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. 2014. №6 (707). С. 86-89.
12. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности электроприводных ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 6. С. 39-43.
13. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. С.409-414.
14. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 4. С. 36-38.
15. Серебряков А.В., Крюков О.В. О новых возможностях технологий SMART GRID // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. №2. С.47-48.
16. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2014. № 8 (710). С. 50-56.
17. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления автономными ветроэнергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. 2013. №5. С. 45-49.
18. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными ветроэнергетическими установками // Автоматизация в промышленности. 2009. № 4. С.35-37.
19. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ВЭУ // В сборнике: Материалы конференция «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» МКПУ-2012 // Под ред. С.Н. Васильева и др. – СПб.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. С. 467-469.
20. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В. Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки // Приводная техника. 2012. №4. С. 2-11.
21. Крюков О.В., Хлынин А.С., Белов А.С. Моделирование работы электроприводов газоперекачивающих агрегатов // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. Отв. за выпуск И. В. Гуляев. 2014. С. 414-420.
22. Крюков О.В. Идентификация параметров приводных электродвигателей газовых турбокомпрессоров // В сборнике: Идентификация систем и задачи управления. Труды X Международной конференции. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. 2015. С. 348-367.