



# Содержание

<b>1</b>	<b>Предисловие</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Структура автономного источника электроэнергии</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Работа преобразовательного комплекса и СВУ</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Преобразователь аккумулятора</b>	<b>11</b>
4.1	Силовая часть преобразователя.....	11
4.2	Модель преобразователя аккумулятора.....	12
<b>5</b>	<b>Преобразователь генератора</b>	<b>16</b>
5.1	Структура силовой части.....	16
5.2	Система управления .....	17
5.2.1	Структура системы.....	17
5.2.2	Особенности временной дискретности управления .....	18
5.2.3	Компенсатор дискретности.....	20
5.2.4	Вычислитель угла потока ротора .....	22
5.2.5	Наблюдатель угла ЭДС .....	28
<b>6</b>	<b>Вращающиеся координаты и перекрёстные связи</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Преобразователь сети</b>	<b>37</b>
7.1	Преобразование координат $ABC \Rightarrow dq0$ .....	37
7.1.1	Преобразования координат симметричной системы ....	37
7.1.2	Преобразования координат несимметричной системы	41
7.2	Автономный преобразователь с нулевой точкой.....	44
7.2.1	Структура силовой части преобразователя.....	44
7.2.2	Выбор параметров фильтров.....	45

7.2.3	Структура системы управления преобразователя .....	47
7.2.4	Модель автономного преобразователя .....	49
7.2.5	Модель преобразователя с нелинейной нагрузкой.....	52
7.2.6	Модель однофазного преобразователя .....	56
7.3	Инвертор, ведомый сетью .....	60
7.3.1	Определение фазового угла сети (ФАПЧ).....	60
7.3.2	Активный выпрямитель .....	63
7.3.3	Однофазный инвертор, ведомый сетью .....	69
7.3.4	Компенсация несимметрии сети.....	71
<b>8</b>	<b>Заключение</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>Перечень моделей</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>Список литературы</b>	<b>78</b>

# 1 Предисловие

---

Хитрые европейцы отказываются от атомной энергетики и засеивают поля ветряками.

У нас газа и солярки много, поэтому в полях колосятся хлеба, а «на севере диком» молотят дизели, а кое-где и газотурбинные установки. Однако умеренный интерес к ветрякам всё-таки есть.

В общем – «широкий простор для мечты и для жизни» открывают грядущие года специалистам-преобразовательщикам.

Именно на них человечество возлагает свои надежды...

Именно они знают, как из вращения пропеллера или вала турбины получить электроэнергию и преобразовать её в нужный вид.

В представленном ниже сочинении описан один из подходов к проектированию преобразовательных комплексов для автономных источников электроэнергии. Такие источники могут формировать свою, локальную электрическую сеть или подключаться к внешней, глобальной электрической сети, отдавая в неё энергию.

Данный подход в основном применим к преобразователям для ветрогенераторных и газотурбинных установок.

В принципе его можно творчески использовать применительно к преобразователям для дизельгенераторов и даже солнечных батарей.

Также материал может быть полезен и тем, кто занимается источниками бесперебойного питания и корректорами коэффициента мощности.

«Америки» мы не открываем. Приведенная ниже информация в основном базируется на анализе зарубежных источников литературы.

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧИТАТЕЛЮ:**

---

- Предполагается, что читатель знаком с принципами векторного управления (а если нет - см. источник [1] в списке литературы).
  - Прежде чем приступить к разделам 4, 5 и т.д., предлагаем читателю ознакомиться с общей постановкой вопроса и прочесть разделы 2 и 3. Это даст понимание логики построения книжки.
- 

*Выражаем сердечную благодарность доценту МЭИ, к.т.н. Александру Михайловичу Полякову за ряд ценных замечаний, сделанных в процессе работы над публикуемым материалом.*

***С наилучшими пожеланиями читателю,  
Ю.Н. Калачёв  
А.Г.Александров***

## 2 Структура автономного источника электроэнергии

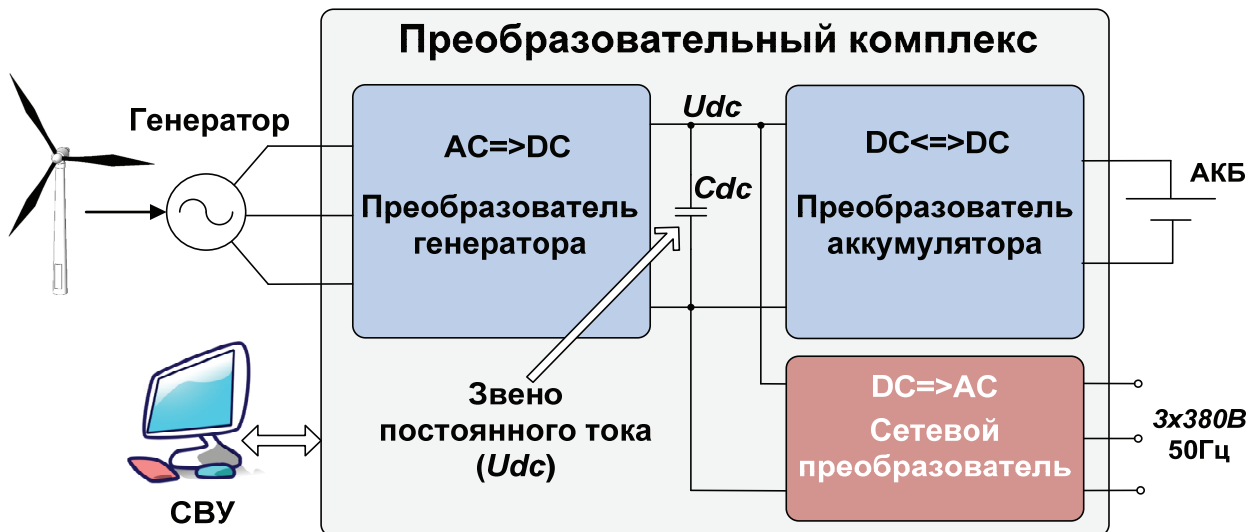


Рис.1

Составными частями рассматриваемого автономного источника электроэнергии (Рис.1) являются:

- первичный источник энергии (ветряк, турбина и т.д.)
- генератор (например - синхронный, он сидит на валу первичного источника и преобразовывает механическую энергию вращения в электрическую)
- аккумулятор (накапливает энергию и иногда ею делится)
- преобразовательный комплекс (объединяет вышеперечисленные устройства и обеспечивает их совместное функционирование)
- система управления верхнего уровня (СВУ, обеспечивает управление комплексом и общую логику его работы).

Преобразовательный комплекс осуществляет двойное преобразование энергии ( $AC \Rightarrow DC \Rightarrow AC$ ).

Состоит преобразовательный комплекс из трёх преобразователей:

- преобразователя энергии генератора (преобразователь генератора)
- преобразователя энергии аккумуляторный (преобразователь аккумулятора)
- сетевого преобразователя.

## 3 Работа преобразовательного комплекса и СВУ

---

Преобразовательный комплекс под управлением СВУ решает следующие задачи:

- преобразование энергии генератора (в рассматриваемом случае синхронного) и передача её в звено постоянного тока.
- преобразование напряжения звена постоянного тока ( $U_{dc}$  на Рис.1) в формат выходной электрической сети (220В или 380В, 50 Гц)
- обеспечение баланса отбираемой от генератора и потребляемой выходной сетью энергии с учетом заряда-разряда аккумулятора
- начальный запуск генератора в режиме двигателя от аккумулятора (если требуется).

Очевидно, что эти функции должны выполняться при обеспечении максимального КПД всей системы в целом.

КПД ветро -, дизель -, турбо - генераторных установок определяются различными параметрами их работы.

**Почему-то люди считают**, что скорость вращения пропеллера ветряка зависит только от скорости ветра. Это не совсем так. В автономных системах, при применении преобразователей, на неё влияет еще момент сопротивления на валу генератора. Меняя этот момент, можно менять и скорость.

Например, для конкретной ветрогенераторной установки при определенной скорости ветра можно найти угол поворота лопастей пропеллера и скорость генератора, соответствующие максимальному КПД установки. Очевидно, что этому режиму



будет соответствовать определённая снимаемая с генератора мощность.

Аналогично для конкретной газотурбинной установки при определённых условиях и мощности нагрузки также существует скорость генератора, соответствующая максимальному КПД турбины.

В подробности определения этой скорости углубляться не будем, дабы не «растекаться мыслью». Будем считать, что она задаётся из СВУ по алгоритмам, написанным специалистами по ветро - и турбо - генераторным установкам по известным им хитрым причинам.

Преобразовательщику достаточно понимать, что для управления процессом генерации энергии с максимальным КПД необходимо управлять скоростью генератора. Эту функцию и выполняет соответствующий преобразователь. В результате, управляя моментом на валу генератора и поддерживая заданную скорость, он превращает силу, вращающую вал, в ток, заряжающий конденсатор звена постоянного тока ( $C_{dc}$ ).

Напряжение  $U_{dc}$  на этом конденсаторе стабилизируется в зависимости от типа выходной сети сетевым или аккумуляторным преобразователем.

**Если источник энергии подключается к некой глобальной сети** переменного тока, то для стабилизации напряжения  $U_{dc}$  используется сетевой преобразователь, называемый «инвертор, ведомый сетью». В этом случае аккумулятор в комплексе обычно отсутствует.

**Если же нагрузкой инвертора генератора является автономная сеть**, то напряжение звена постоянного тока обычно стабилизируется на необходимом уровне двунаправленным преобразователем аккумулятора, а преобразователь сети формирует из него нужный стандарт выходного напряжения (например, 220/380 В, 50 Гц).

**За управление мощностью при работе комплекса может отвечать СВУ.** С одной стороны, оно получает от преобразователей информацию о потребляемой сетью энергии, с другой -

управляет режимом работы первичного источника энергии и генератора. Например, в случае с турбиной СВУ может управлять подачей топлива турбины и - с помощью генераторного преобразователя скоростью генератора. Используя эти два канала управления, СВУ **выбирает режим работы газотурбинной установки соответствующий:**

- мощности потребления сети
- максимальному КПД турбины.

Преобразователь аккумулятора (если он есть) находится в буфере и помогает обеспечить баланс мощности в динамике. Если энергии потребляется больше, чем генерится - он разряжается, а если наоборот – то, естественно, наоборот.

Далее мы рассмотрим более подробно все три преобразователя комплекса.