

DriveConstructor

<https://driveconstructor.com/>

Textbook in English and Russian Учебник на английском и русском языках

Original English version by A.V. Matveev Автор исходной версии А.В. Матвеев

Russian translation by S.V. Shirinskii Перевод на русский язык: С.В. Ширинский

2018

Contents

About DriveConstructor

Pumps

Pump types & load curves

Parameters of pumps

Conveyors

Parameters of conveyors

Wind & tidal turbines

Winches & winders

Electric machines

Size and shape of the machine

Power, voltage & speed

Efficiency classes

Cooling

Mechanical design

Insulation classes

Frequency converters

Topologies

Power, voltage & current

Cooling

Filters

Transformers

Power, voltages and ratio

Transformer types

Gearboxes

Types of stages

Combinations of stages

Содержание

Что такое DriveConstructor

Насосы

Типы насосов и их нагрузочные характеристики

Параметры насосов

Конвейеры

Параметры конвейеров

Ветряные и приливные турбины

Лебедки и намоточные устройства

Электрические машины

Габариты и форма машины

Мощность, напряжение и скорость

Классы КПД

Системы охлаждения

Механическая конструкция

Классы изоляции

Преобразователи частоты

Схемы

Мощность, напряжение и ток

Охлаждение

Фильтры

Трансформаторы

Мощность, напряжение и коэффициент трансформации

Типы трансформаторов

Редукторы

Типы ступеней

Комбинации ступеней

Power cables

Grid

Altitude and derating

Ambient and coolant temperatures & rating

Protection

Duties and overloads

Systems

Sizing principles

Variable speed in applications

Energy saving with the help of VSD

Optimal systems

FC influence on the grid

FC influence on the machine

Inertia in the drive train

Силовые кабели

Сеть

Влияние высоты установки над уровнем моря

Влияние температур среды и охладителя

Климатическая защита

Повторно-кратковременные режимы и перегрузки

Системы

Принципы подбора компонентов

Регулирование скорости

Энергосбережение с помощью ПЧ

Оптимизация систем

Влияние ПЧ на сеть

Влияние ПЧ на электрическую машину

Инерция в механической части электропривода

What is DriveConstructor?

DriveConstructor is the online educational software. It was created to support professors teaching design of power conversion systems. It is possible to use the software for sketching solutions for the real world problems, however, it was developed first of all for the educational purposes.

The software together with the Textbook and the Exercise book form the integral online course in power conversion system design. The knowledge can be acquired in a structured way through solving the tasks proposed in the Exercise book.

A task can be for example driving a mechanism, like pump or conveyor, by using electric power from the grid. Such a task requires conversion of the energy from electric into mechanical and the electric machine, being the "heart" of the power conversion system, works as a motor. Another example of a task can be delivering power extracted from the water flow by a tidal turbine into the grid; here conversion is from mechanical energy into electric one and the electric machine works as a generator.

Что такое DriveConstructor?

DriveConstructor – онлайн-инструмент (программа) для самообучения по тематике электропривода, созданный в помощь студентам и университетским преподавателям. Программа может использоваться для поиска решений задач из реальной жизни, но все же следует иметь в виду, что в первую очередь она предназначена для образовательных целей.

Программа вместе с Учебником и Задачником составляют интегральный онлайн-учебный комплекс по системам преобразования энергии и электроприводу. Наиболее удобный путь приобретения знаний с помощью комплекса – решения предложенных задач из Задачника.

Пример задачи – подбор системы электропривода для таких механизмов, как насос или конвейер при заданных параметрах механизма и сети. В такой задаче происходит преобразование электрической энергии в механическую, а электрическая машина будет работать в двигательном режиме. Другой пример задачи – преобразование и передача энергии полученной из потока воды приливной турбиной в сеть. В этом случае происходит преобразование механической энергии в электрическую, а электрическая машина будет работать в генераторном режиме.



The system between the mechanism and the grid can include various components; both electrical, such as frequency converters and transformers, and mechanical, such as gearboxes. The components, put together into the power conversion system, can be called a *drive train* or a *drive system* (this is, by the way, why this online software is called *DriveConstructor*)

Providers of the equipment often call the tasks *Applications*.

In *DriveConstructor* it is possible to design systems for the four applications: pump, conveyor, winch (or winder) and wind (or tidal) turbine. The applications have different load profiles and operational modes.

Navigating through the Textbook and solving the tasks one can learn how to specify the mechanisms and the system components for the proposed applications and how to design *optimal systems*.

Система между механизмом и сетью может включать различные компоненты: электрические, такие как преобразователь частоты или трансформатор, и механические, такие как редуктор. Компоненты, соединенные вместе, образуют систему преобразования энергии или, говоря иначе, систему электропривода.

Поставщики компонентов (оборудования) часто называют задачи «*Применениями*».

DriveConstructor дает возможность проектирования систем для четырех применений: насос, конвейер, лебедка (или намоточное устройство) и ветряная (или приливная) турбина. Эти применения характеризуются отличными друг от друга нагрузочными характеристиками и режимами работы.

Читая учебник и решая задачи из Задачника, можно освоить процесс задания параметров механизмов и системных компонентов для четырех предложенных применений и получить практические навыки оптимизации систем.

Pumps

A pump can be specified by its type and the set of hydrodynamic parameters; rated speed, head, flow, efficiency and density of the fluid it pumps. However, what dimensions the drive system is torque on shaft of the pump and the shaft's rated speed as well how the torque changes with the changing speed.

To configure the drive train for a pump *DriveConstructor* uses four parameters:

1. Required rated torque on the shaft of the pump
2. Rated rotational speed of the pump's shaft
 - variable speed drive allows changing speed the pump operates at, however, a pump is designed for some definite rated speed usually given for any pump in the respective brochure or catalogue
3. Load curve of the pump
4. [Starting torque](#) of the pump

The load curve and [starting torque](#) of the pump depend on the pump's [type](#). There exist many different types of pumps. The most common - centrifugal pump - is presented in Fig.1. Another example - progressive cavity pump - is presented in Fig.2.

Rated torque

Rated torque is calculated from the power and the speed:

$$T=(9.55*P)/n,$$

Насосы

Насосы характеризуются типом и набором гидродинамических параметров: номинальной скоростью, напором, расходом, КПД и плотностью перекачиваемой жидкости. Параметры, которые непосредственно влияют на выбор компонентов системы электропривода – требуемый номинальный момент на валу насоса и номинальная скорость (частота вращения) насоса, а также зависимость момента насоса от скорости - нагрузочная характеристика.

Для конфигурирования системы привода насоса *DriveConstructor* использует четыре параметра:

1. Требуемый номинальный момент на валу насоса
2. Номинальная скорость вращения вала насоса
 - Привод переменной скорости позволяет изменять скорость, с которой вращается насос, однако, насос рассчитан на определенную номинальную скорость вращения, которая обычно указывается в соответствующем буклете или каталоге
3. Нагрузочная характеристика насоса
4. [Пусковой момент](#) насоса

Нагрузочная характеристика и [пусковой момент](#) насоса зависят от [типа насоса](#). Существует множество типов насосов. Наиболее распространенный – центробежный насос – показан на рис. 1. Другой пример насоса – эксцентриковый шнековый насос – показан на рис. 2.

Номинальный момент

Номинальный момент рассчитывают через мощность и частоту вращения:

$$T=(9.55*P)/n,$$

where n is speed in *rpm*, P is power in *kW* and T is torque in *kNm*.

The power can be calculated from pump parameters such as head, flow, efficiency and density of pumped fluid:

$$P = (g \cdot \rho \cdot h \cdot q) / (3.6 \cdot 10^6 \cdot \eta),$$

where P is in *kW*, g is gravity ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), ρ is density of the [pumped fluid](#) in kg/m^3 , η is efficiency of the pump, h is head in *m* and q is flow in m^3/h .

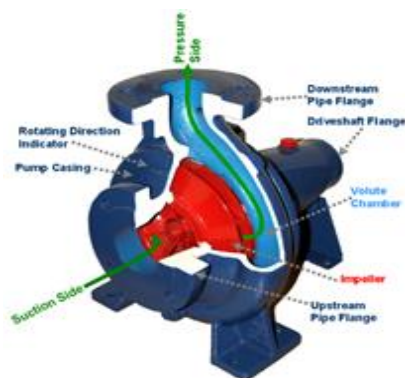


Fig.1. Centrifugal pump.

Рис.1. Центробежный насос.

See also:

- [Pump types & load curves](#)
- [Parameters of pumps](#)

Note that in practice a pump can work at heads and flows lower than the rated ones for which it is designed. Speed and efficiency can then be different from the rated ones as well. So, remember to enter actual head, flow, speed and efficiency.

где n – частота вращения в *об/мин*, P – мощность в *кВт* и T – момент в *кН·м*.

Мощность можно рассчитать через такие параметры насоса, как напор, расход, КПД и плотность перекачиваемой жидкости:

$$P = (g \cdot \rho \cdot h \cdot q) / (3.6 \cdot 10^6 \cdot \eta),$$

где P – мощность в *кВт*, g – ускорение свободного падения ($g = 9.81 \text{ м/с}^2$), ρ – плотность [перекачиваемой жидкости](#) в кг/м^3 , η – КПД насоса, h – напор в *м*, q – расход в $\text{м}^3/\text{час}$.

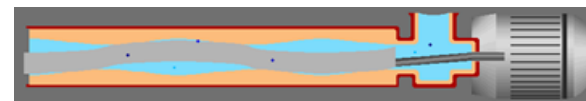


Fig.2. Progressive cavity pump.

Рис.2. Эксцентриковый шнековый насос.

Смотри также:

- [Типы насосов и их нагрузочные характеристики](#)
- [Основные параметры насосов](#)

Следует иметь в виду, что на практике насосы работают при значениях напора и расхода ниже номинальных значений, на которые он был рассчитан. Частота вращения и КПД в этом случае также будут отличаться от номинальных. Поэтому следует задавать реальные значения напора, расхода, частоты вращения и КПД.

Pump types & load curves

Pumps can be classified by their method of the fluid displacement. Two overviews of pump types is presented in Fig. 1 and 4, though there are many alternative overviews and classifications.

There are two basic types of pumps: *positive displacement* and *centrifugal (rotodynamic)*. Load curves (torque-speed characteristics) of these two types of pumps are different:

- Centrifugal pumps have quadratic load curve $T \sim n^2$ (Fig.2)
- Positive displacement pumps have constant load curve $T \sim \text{const}$ (Fig.3)

Quadratic loads are often approximately represented by assuming that the torque required is proportional to the square of the speed, giving rise to the terms square-law load.

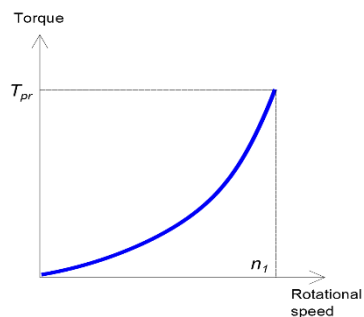


Fig.2. QT curve.

Рис.2. Квадратичная характеристика.

Типы насосов и их нагрузочные характеристики

Насосы можно классифицировать по способу перекачивания жидкости. Два обзора типов насосов представлены на рис. 1 и рис. 4, хотя существуют и другие обзоры и классификации.

Существует два базовых типа насоса: *вытеснительный* и *центробежный*. Нагрузочные характеристики (зависимость момента от частоты вращения) этих двух типов насосов различаются:

- Центробежные насосы имеют квадратичную нагрузочную характеристику $T \sim n^2$ (Рис. 2)
- Вытеснительные насосы имеют постоянную нагрузочную характеристику $T \sim \text{Const}$ (Рис. 3)

Квадратичную нагрузку часто аппроксимируют, предполагая, что требуемый момент пропорционален квадрату скорости, порождая условия квадратичной нагрузки.

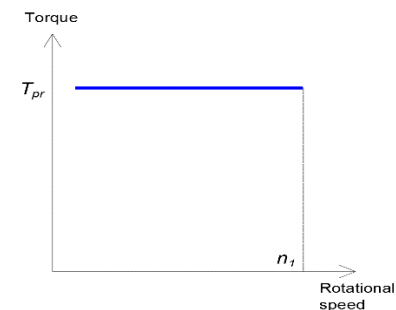


Fig.3. CT curve.

Рис.3. Постоянная характеристика.

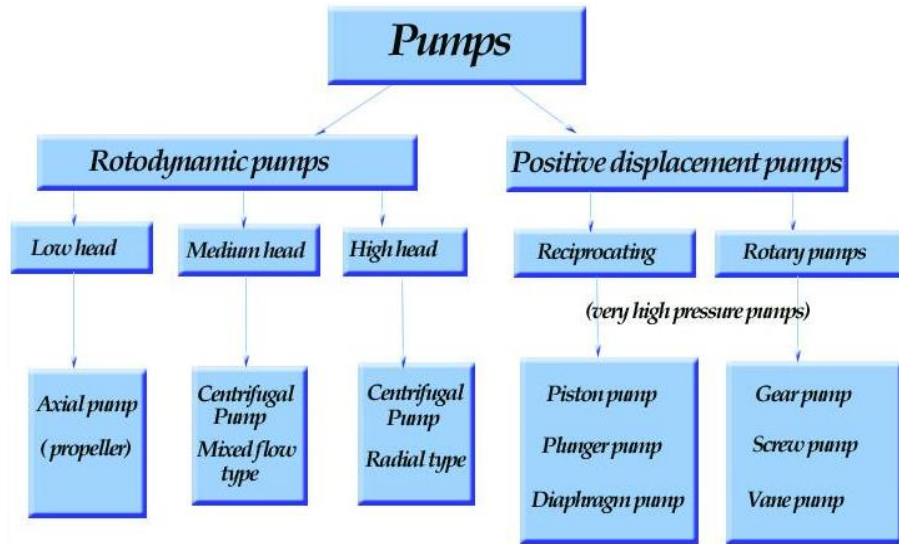
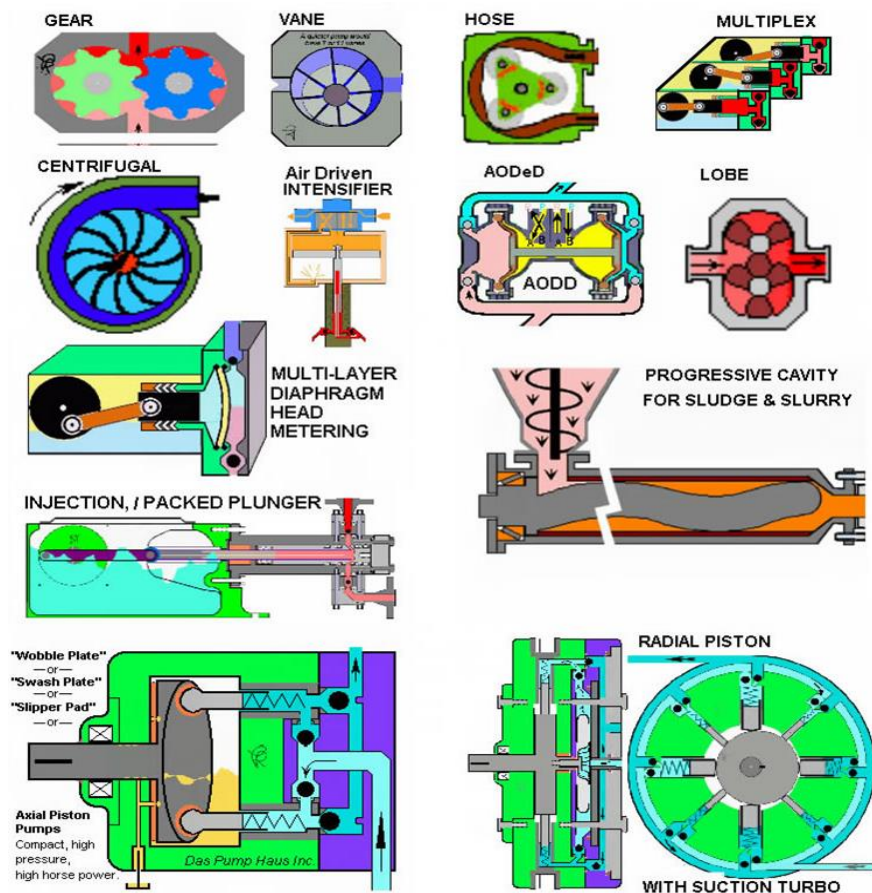


Fig.1. Pump classification.¹
 Рис.1. Классификация насосов.

Rotodynamic pumps	Центробежные насосы
Positive displacement pumps	Вытеснительные насосы
Low head	Малый напор
Medium head	Средний напор
High head	Большой напор
Reciprocating	Возвратно-поступательное движение
Rotary pumps	Вращательное движение
(very high pressure pumps)	Насосы очень высокого давления
Axial pump (propeller)	Аксиальный насос (пропеллер)
Centrifugal pump / Mixed flow type	Центробежный насос / Смешанный поток
Centrifugal pump / Radial type	Центробежный насос / Радиальный поток
Piston pump / Plunger pump / Diaphragm pump	Поршневой насос / Плунжерный насос / Мембранный насос
Gear pump	Шестереночный насос
Screw pump	Винтовой насос
Vane pump	Шиберный насос



Gear	Шестереночный
Vane	Шиберный
Hose	Шланговый
Multiplex	Мультиплексный
Centrifugal	Центробежный
Air driven intensifier	Пневматический усилитель
AODeD	AODeD
Lobe	Лопастной

Multi-layer diaphragm head metering	Дозирующий насос с многослойной головкой диафрагмы
Progressive cavity for sludge & slurry	Насос с прогрессивной полостью для осадка и пульпы
Injection / packed plunger	Впрысковой / нагнетательный насос
Wobble plate / Swash plate / Slipper pad – Axial piston pumps	Качающаяся пластина / шайба / выпускная прокладка – Аксиально-поршневые насосы
Radial piston with suction turbo	Радиальный поршень с турбонаддувом

Fig.4. Pump types with illustrations.²
 Рис.4. Типы насосов с иллюстрациями.

Key parameters of pumps

Head and flow

Rated head and flow are the key characteristic of any pump and is always specified by the pump manufacturer.

The static *Head (H)* of a pump is the maximum pressure it can deliver (height to which the pump lifts the liquid). In *DriveConstructor* this parameter is entered in *m*.

Flow (Q), also referred to as volume flow rate or capacity, is the volume of liquid that travels through the pump in a given time (measured in liter per second or cubic meter per hour). Rated flow is the key characteristic of any pump and is always specified by the pump manufacturer. In *DriveConstructor* this parameter is entered in m^3/h or l/s .

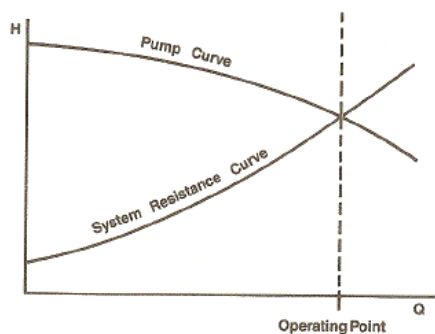


Fig.1. Centrifugal pump.

Рис.1. Центробежный насос.

Основные параметры насосов

Напор и расход

Номинальный напор и расход являются основными параметрами всех насосов и всегда указываются производителем.

Статический *Напор (H)* насоса является максимальным давлением, которое может производить насос (высота, на которую насос может поднять жидкость). В программе *DriveConstructor* этот параметр вводится в метрах.

Расход (Q), также называемый объемный расход или производительность насоса, представляет собой объем жидкости, который проходит через насос за определенное время (измеряется в литрах в секунду или кубометрах в час). Номинальный расход является основной характеристикой любого насоса и всегда указывается производителем. В программе *DriveConstructor* этот параметр вводится в $m^3/час$ или в $л/с$.

Pump curve	Характеристика насоса
System resistance curve	Сопrotивление системы
Operating point	Рабочая точка

Pumped fluid

The fluid pumped by the pump can be chosen from the options presented in the table below. Note that for the same head and flow the power required on shaft of the pump will be higher for fluid with higher density (according to $P=(g*\rho*h*q)/(3.6*10^6*\eta)$). The default fluid is water.

Starting torque ("breakaway" torque)

Real pumps can have a significant static friction or breakaway torque (as shown in Fig. 2, 3), which must be overcome when starting. In some situations, starting torque can be higher than the rated torque even for centrifugal pumps.

In *DriveConstructor* starting torque is defined as the fraction of rated torque T_r . The following values can be chosen: 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.8, 1.9, 2.

Fluid	Density, kg/m ³
water	1000
average oil	920
kerosene	820
milk	1035
sea water	1025
gasoline	720

Перекачиваемая жидкость

Тип жидкости, перекачиваемой насосом, можно выбрать из нескольких вариантов, приведенных в таблице ниже. Обратите внимание, что для одного и того же напора и расхода жидкости мощность, которую надо обеспечить на валу насоса для ее перекачивания, будет выше для жидкости большей плотности (в соответствии с выражением $P=(g*\rho*h*q)/(3.6*10^6*\eta)$). Жидкостью по умолчанию считается вода.

Пусковой момент

Реальные насосы могут иметь существенное статическое трение или начальный момент сопротивления (как показано на рис. 2, 3), который должен преодолеваться при включении насоса. В некоторых ситуациях начальный момент сопротивления может быть выше номинального, даже для центробежных насосов.

В программе *DriveConstructor* начальный момент сопротивления задается в долях от номинального момента T_r . Пользователь может выбирать из следующих значений: 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.8, 1.9, 2.

Жидкость	Плотность, кг/м ³
вода	1000
нефть	920
керосин	820
молоко	1035
морская вода	1025
бензин	720

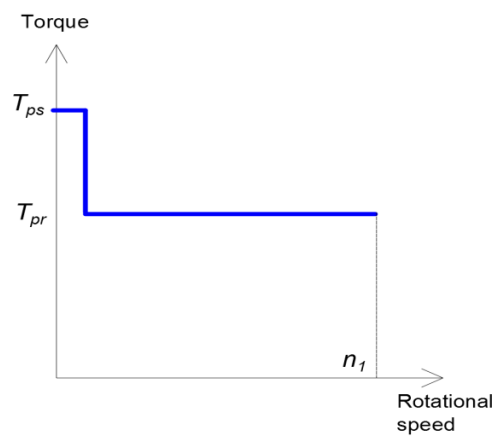


Fig.2. Pump with CT load curve and starting curve.

Рис.2. Насос с постоянной нагрузочной характеристикой и начальным моментом сопротивления.

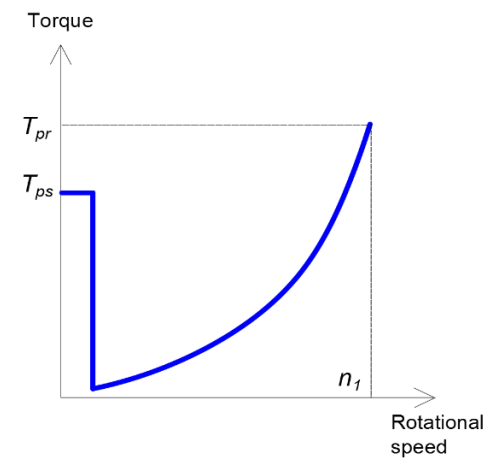


Fig.3. Pump with QT load curve and starting curve.

Рис.3. Насос с квадратичной нагрузочной характеристикой и начальным моментом сопротивления.

Conveyors

Conveyors are used in various industries: metallurgical, petrochemical, mining, glass, brewing, textile, food, printing, furniture, machinery, coal, as well as many others. In a conveyor one or more drums (rollers) can be driven by motor(s). Fig. 1-4 below show designs with one motor per drum. In Fig.5 there are two motors driving the drum. Mutual position of the axle of the driven drum and the motor shaft are defined by the gearbox type. There can be an angle between the axles if bevel gear stage (Fig.4) or worm gear stage (Fig.2) is used.

See also:

- [Parameters of conveyors](#)
- [Duties and overloads](#)

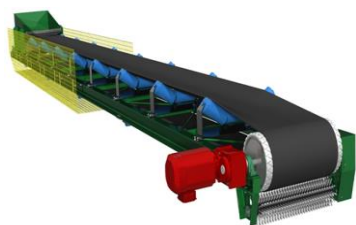


Fig. 1. Puc.1.

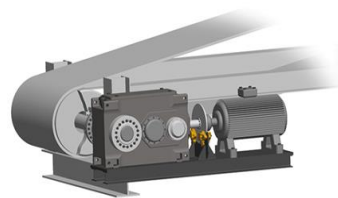


Fig. 2. Puc.2.



Fig. 3. Puc.3.



Fig.4. Puc.4.

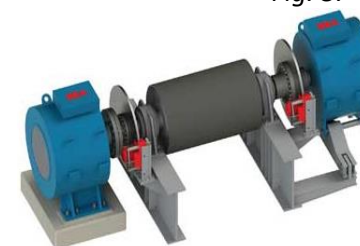


Fig.5. Puc.5.

Конвейеры

Конвейеры используются в разных отраслях промышленности: металлургической, нефтехимической, горнорудной, стекольной, пивоваренной, текстильной, пищевой, полиграфической, мебельной, угольной, в машиностроении, а также в других отраслях. В конвейере один или более барабанов (роликов) приводятся в действие двигателями. На рис. 1-4 ниже показаны варианты с одним двигателем на барабан. На рис. 5. показано два двигателя, вращающих один барабан. Взаимное положение осей вращаемого барабана и вала двигателя определяется типом редуктора. В случае применения в редукторе конической (рис. 4) или червячной зубчатой передачи (рис. 2) оси двигателя и барабана могут быть расположены под углом друг к другу.

Смотри также:

- [Параметры конвейеров](#)
- [Повторно-кратковременные режимы и перегрузки](#)

Benefits of VSD for conveyors

Equipping conveyor with variable speed drive (VSD) (motor and frequency converter) provides a number of advantages:

a) Improving the process controllability

The automatic control system of the frequency converter can maintain constant load or constant speed regardless of the load. Conveyor's control system may be integrated in the automation system of higher level.

b) Energy savings

Load of some conveyors, such as e.g. the belt conveyor at coal mines and ore-processing enterprises are quite difficult to predict because of the varying demand of the transportation. Idling or modes close to it can reach 20-40% of the operating time of the conveyor. The use of VSD provides smooth control of the belt speed, maximizes energy savings under variable loads, regardless of the profile of transport distribution.

c) High starting torque

The frequency converter provides high starting torque (up to 200% of the nominal value). In the event of an emergency stop it is not necessary to unload the conveyor because a high starting torque gives the possibility to even start a fully loaded conveyor.

Преимущества регулирования скорости конвейеров

При оснащении конвейера регулируемым приводом (двигатель плюс преобразователь частоты) появляется ряд преимуществ:

a) Улучшается управляемость процессов

Система автоматического управления преобразователем частоты может поддерживать постоянную нагрузку или постоянную скорость вне зависимости от нагрузки. Система управления конвейером может быть интегрирована в автоматическую систему более высокого уровня.

b) Экономится энергия

Нагрузку некоторых конвейеров сложно предсказать, например, для ленточных конвейеров на угольных шахтах или предприятиях по обогащению руды, что объясняется изменяющимся запросом на перевозку. Длительность холостого хода или близкого к нему режима работы может достигать 20-40% всей продолжительности работы конвейера. Применение регулируемого привода обеспечивает плавное регулирование скорости ленты, максимальную экономию энергии при переменном грузопотоке, независимо от закона распределения грузопотока.

c) Повышается пусковой момент

Преобразователь частоты обеспечивает большой пусковой момент (до 200% от номинального значения). В случае аварийной остановки не обязательно разгружать конвейер, поскольку большой пусковой момент позволит запустить даже полностью нагруженный конвейер.

d) Less wear of the mechanical parts and switching equipment at start

Stepless speed increase when starting the conveyor protects the mechanical parts from wear and prolongs service life. Soft-start is also favorable for the power switching equipment and the mains.

e) Increased line speed

Using a frequency converter allows the conveyor to operate at speeds above par, if required by the process.

f) Load balancing on motors, shaft synchronization

If the conveyor is provided with two or more motors, there is a need for load balancing between the engines and the synchronization of their shafts. Modern frequency converters have a software that allows you to implement these functions.

Parameters of conveyors

In *DriveConstructor* we operate with the type of curves shown in Fig.1. We assume torque is constant in the given speed range. Short-term overload can be specified. Also very short-term overloads for starting the conveyor (breakaway torque) can be specified.

So, one needs to specify:

- minimum and maximum rotational speed of the conveyor drum,
- rated torque,
- overload torque,
- starting (breakaway) torque, and
- conveyor duty

d) Уменьшается износ механических частей и коммутационной аппаратуры при пуске

Плавное повышение скорости при пуске конвейера защищает механические части от преждевременного износа и увеличивает срок службы. Плавный пуск также благоприятен для коммутационной аппаратуры и сети.

e) Увеличивается скорость линии

Применение преобразователя частоты позволяет разгонять конвейер до скоростей выше номинальной, если это требуется по условиям эксплуатации.

f) Улучшается распределение нагрузки двигателей, синхронизация валов

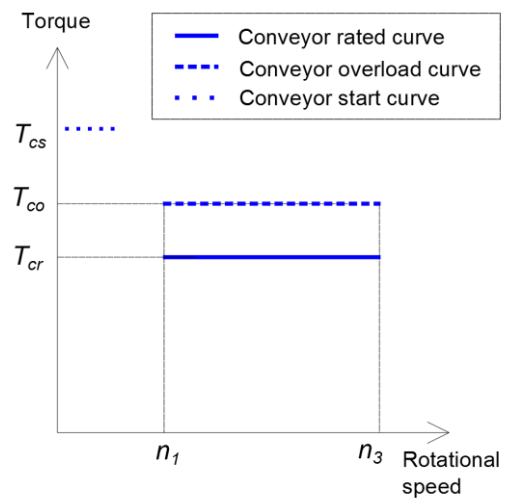
Если конвейер оснащается двумя и более двигателями, возникает необходимость в правильном распределении нагрузки двигателей и синхронизации вращения их валов. Современные преобразователи частоты используют программное обеспечение, которое позволяет реализовать эти функции.

Параметры конвейеров

В программе *DriveConstructor* используются характеристики, показанные на рис.1. Момент считается постоянным в каждом заданном диапазоне скоростей. Можно задать кратковременную перегрузку. Также можно задать очень краткую перегрузку при пуске конвейера (пусковой момент).

Таким образом, для описания конвейера необходимо задать:

- минимальную и максимальную частоту вращения барабана конвейера,
- номинальный момент,
- перегрузочный момент,
- пусковой момент
- цикл работы конвейера



rated curve	номинальная характеристика
overload curve	перегрузочная характеристика
start curve	пусковая характеристика

Fig.1.
Puc.1.

Wind and tidal turbines

Drive train of WT in most cases include a gearbox and a generator (Fig.1,a). The gearbox and the generator can be mechanically integrated (Fig 1,b).

Direct drives are usually bulky and heavy (Fig.2). There are, though, special designs usually based on integration with the WT structure (Fig.2,b), in order to reduce weight. In *DriveConstructor* we focus on geared solutions only.

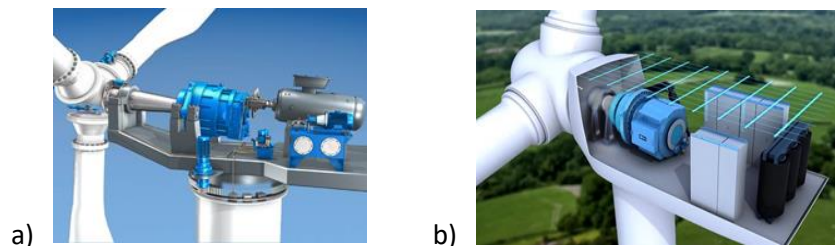


Fig.1. Wind turbines with gearboxes.

Рис.1. Ветряные турбины с редукторами.

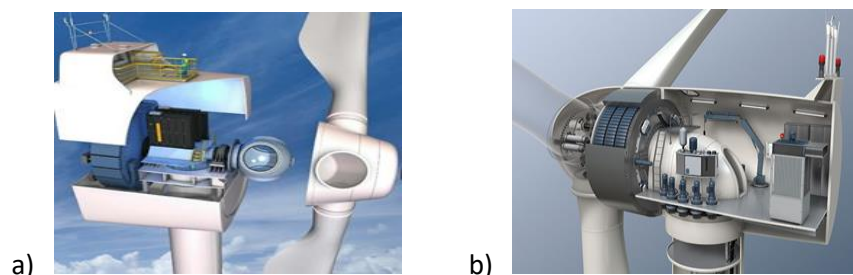


Fig.2. Wind turbines with direct drives.

Рис.2. Ветряные турбины прямого привода.

Ветряные и приливные турбины

Приводной механизм ветряной турбины в большинстве случаев содержит редуктор и генератор (рис.1,а). Редуктор и генератор могут быть механически объединены в одном устройстве (рис 1,б).

Прямой привод обычно получается более объемным и тяжелым (рис.2). Тем не менее, существуют специальные конструкции, обычно интегрированные с ветряной турбиной, которые позволяют снизить вес. В программе *DriveConstructor* рассматриваются только конструкции с редукторами.

Load characteristics

There is theoretical maximum power which is possible to extract following the maximum torque curve shown in Fig. 3-4.

It can be seen that generator speed increases in Region II and is kept almost constant in Region III. However, there should be kept some speed reserve (between n_1 and n_2 in Fig.5) for the overspeed case due to wind gusts.

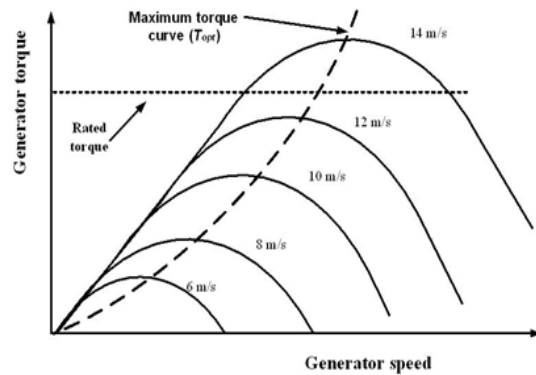


Fig.3. Generator RPM vs torque.

Рис.3. Зависимость момента от частоты вращения генератора.

Нагрузочные характеристики

Существует теоретический максимум мощности, которую можно получить в соответствии с кривой максимального момента на рис. 3-4.

Можно заметить, что скорость генератора возрастает в зоне II и остается практически постоянной в зоне III. Однако, можно предусмотреть некоторый резерв скорости (между n_1 и n_2 на рис. 5) для превышения скорости из-за порывов ветра.

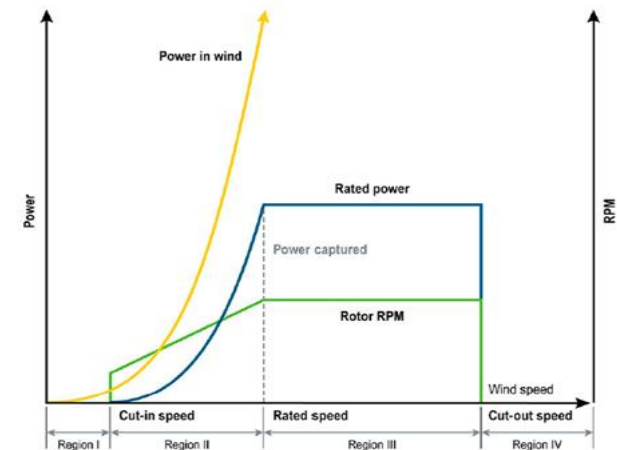


Fig.4. Wind speed vs RPM and power.

Рис.4. Зависимость частоты вращения и мощности от скорости ветра.

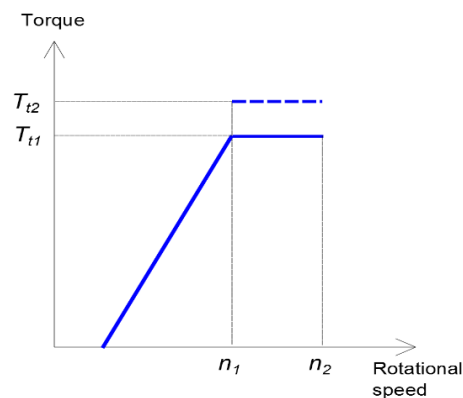


Fig.5. Turbine load curves.

Рис.5. Нагрузочные характеристики турбины.

Parameters of wind (or tidal) turbine

- Rated speed of the propeller (above this speed maximum energy is extracted)
- "Cut off" speed, which is maximum allowed speed (turbine and generator are not run above this speed)
- Rated torque (at this torque maximum energy is extracted)
- Extra torque (torque margin) is needed to prevent runaway of the turbine in case of wind gusts and very strong wind in general.

Параметры ветряных (и приливных) турбин

- Номинальная скорость вращения пропеллера (при превышении этой скорости вращения можно получить максимальную энергию)
- Граничная скорость, т.е. максимально допустимая скорость (турбина и генератора не работают при превышении этой скорости)
- Номинальный момент (при этом моменте получается максимальная энергия)
- Дополнительный момент (запас по моменту) необходим для предотвращения разноса турбины при порывах ветра и вообще при очень сильном ветре.

Winches and winders

In *DriveConstructor* two types of mechanisms are united under the same “application” class; these mechanisms are winches (Fig. 1-2) and winders (Fig. 3-4).

The winches and winders are characterized by the special shape of load curves. The specifics is in changing diameter of the surface on which the material is coiled on. The two extreme states are shown in Fig.5:

- drum without anything coiled/wound on it (D_1)
- last layer of rope or whatever coiled/wound on the drum when there is no more space on it (D_2)

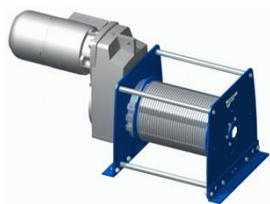


Fig.1. Winch.
Рис.1. Лебедка.



Fig.2. Winch.
Рис.2. Лебедка.



Fig.3. Winder.

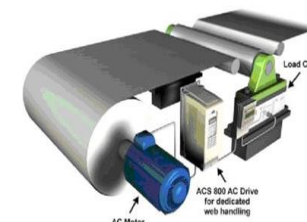


Fig.4. Winder.

Рис.3. Наматывающее устройство. Рис.4. Наматывающее устройство.

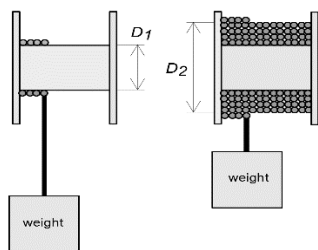


Fig.5. Drum dimensions.
Рис.5. Размеры барабана.

Лебедки и наматывающие устройства

В программе *DriveConstructor* используется два типа механизмов, объединенных в один класс применения, это лебедки (рис. 1-2) и наматывающие устройства (рис. 3-4).

Лебедки и наматывающие устройства характеризуются специальной формой нагрузочных характеристик. Их особенность заключается в изменении в процессе работы диаметра поверхности, на которую наматывается трос. Два крайних состояния показаны на рис.5:

- барабан, на который ничего не намотано (D_1)
- последний слой троса или другого наматываемого материала, на который уже нельзя ничего намотать (D_2)

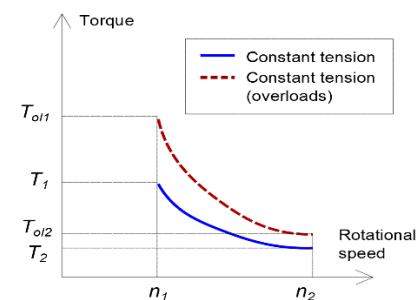


Fig.6. Load curves.

Рис.6. Нагрузочные характеристики.

When the coiling/uncoiling (winding/unwinding) takes place (between the two extreme states) the speed and the torque change in the opposite way. When linear speed and tension are kept constant, then the rated torque curve is like the blue curve in Fig. 6. Possible overloads are presented as the dashed red curve.

Parameters of winches and winders

- Diameter [m] of the drum without anything coiled/wound on it.
- Diameter [m] of the last layer of rope or whatever coiled/wound on the drum when there is no more space on it.
- Rated linear force (tension) [kN] on the line/wire/string/fabric/paper/foil or whatever else is being coiled/wound on the drum.
- Rated linear speed [m/s] of the line/wire/string/fabric/paper or whatever else is being coiled/wound on the drum.
- Expected overload torque as multiple of the rated torque.

В процессе наматывания / сматывания троса (между двумя крайними состояниями) происходит обратное изменение частоты вращения и момента. Если линейная скорость и натяжение троса остаются постоянными, нагрузочная характеристика совпадает с синей кривой на рис. 6. Возможные перегрузки представлены пунктирной красной линией.

Параметры лебедок и наматывающих устройств

- Диаметр [м] пустого барабана.
- Диаметр [м] заполненного барабана.
- Номинальное линейное усилие (натяжение) [кН] троса, провода, нити, бумаги, фольги или другого материала, наматываемого на барабан.
- Номинальная линейная скорость [м/с] троса, провода, нити, бумаги, фольги или другого материала, наматываемого на барабан.
- Ожидаемая кратность перегрузочного момента относительно номинального момента.

Electric machines

Only rotating AC machines with cylindrical cores with inner rotor are included into this version of *DriveConstructor*. It is possible to choose between:

- *SCIM* – Squirrel Cage Induction Machine (Fig.1),
- *SyRM* – Synchronous Reluctance Machine (Fig.2),
- *PMSM* – Permanent Magnet Synchronous Machine (rotor shown in Fig.3).



© 2008 Welch & Partners, Tübingen
scientific multimedia

Fig.1a. SCIM.

Рис.1а. АМ.

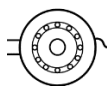


Fig.1b. Icon of SCIM.

Рис.1b. Пиктограмма АМ.



Fig.2a. SyRM.

Рис.2а. СРМ.

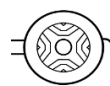


Fig.2b. Icon of SyRM.

Рис.2b. Пиктограмма СРМ.



Fig.3a. Rotor of PMSM.

Рис.3а. Ротор СМПМ.

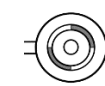


Fig.3b. Icon of PMSM.

Рис.3b. Пиктограмма СМПМ.

SCIM, PMSM and SyRM can be selected for any application and any drive train topology. SyRM are available for quite limited range of powers. So far only LV SyRM products are known, therefore only LV FC can be used to drive SyRM.

Performances of the machines of different types are different. Usually:

- Efficiency (SCIM) < Efficiency (SyRM) < Efficiency (PMSM)
- Cost (SCIM) < Cost (SyRM) < Cost (PMSM)
- Size (SCIM) > Size (SyRM) > Size (PMSM)

Электрические машины

В настоящей версии программы *DriveConstructor* рассматриваются только вращающиеся машины переменного тока с цилиндрическими сердечниками и внутренним ротором. Пользователь может выбрать следующие типы машин:

- АМ – Асинхронная машина с ротором типа «беличья клетка» (рис.1),
- СРМ – Синхронная реактивная машина (рис.2),
- СМПМ – Синхронная машина с постоянными магнитами (ротор показан на рис.3).

АМ, СМПМ и СРМ для любого применения и любой топологии приводного механизма. СРМ доступны лишь для ограниченного диапазона мощностей. В настоящее время известны только низковольтные СРМ, поэтому для питания СРМ можно использовать только низковольтные преобразователи частоты.

Показатели машин разного типа различаются между собой. Обычно:

- КПД (АМ) < КПД (СРМ) < КПД (СМПМ)
- Стоимость (АМ) < Стоимость (СРМ) < Стоимость (СМПМ)
- Габариты (АМ) > Габариты (СРМ) > Габариты (СМПМ)

Size and shape of the machine

Why some machines are long while the other are short? Why they have small or large diameter? One of the possible explanations is proposed below.

The stator and the rotor of the electric machine (Fig.1) interact - there are forces between them (Fig.2). The forces are not uniform and vary in time, however, for simplicity we can represent them as several forces applied to several points on the rotor circumference, as shown for example in Fig.3 (four points in this example). We can also talk about one average circumferential force - the torque producing force – F . Intensity of the stator-rotor interaction can be represented with the help of *tangential tension* F_A – the force acting at the unit of rotor area, $F_A = F/A$, where $A = \pi D_\delta L_a$. F_A is usually lower for smaller machines and higher for larger machines. For machines of a comparable power levels it can be assumed constant.

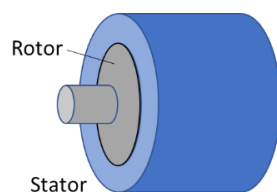


Fig.1. Rotor and stator.
Рис.1. Ротор и статор.

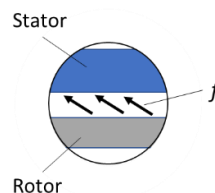


Fig.2. Interaction.
Рис.2. Взаимодействие.

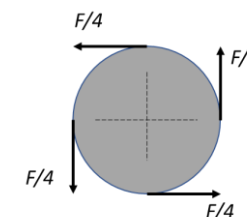


Fig.3. Circumferential forces.
Рис.3. Тангенциальные силы.

Размер и форма машины

Почему некоторые машины имеют «шайбообразную» форму, а другие – наоборот, форму вытянутого цилиндра? Почему диаметр у одних машин больше, а у других – меньше? Одно из возможных объяснений предложено ниже.

Статор и ротор электрической машины (Рис. 1) взаимодействуют посредством электромагнитных сил (Рис. 2). Силы распределены неравномерно вдоль расточки статора и изменяются во времени, но, тем не менее, для простоты мы можем представить их как несколько сил, приложенных к нескольким точкам на поверхности ротора, как показано, например, на Рис. 3 (четыре точки приложения сил в этом примере). Мы также можем говорить о средней силе взаимодействия, создающей момент – F . Интенсивность взаимодействия статор-ротор может быть представлена удельной силой на единицу площади поверхности ротора в зазоре – $F_A = F/A$, где $A = \pi D_\delta L_a$. F_A обычно меньше для машин малой мощности и больше для машин большой мощности. Для машин сравнимой мощности F_A можно принять постоянной величиной.

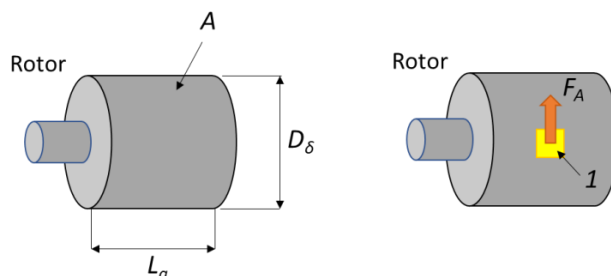


Fig.4. Tangential tension explained.

Рис.4. К объяснению удельной силы.

Active parts of an electric machine – the parts where the currents flow and the magnetic field is alternating, performing the power conversion, form two concentric “rings” as shown in Fig.5. Weight of the active parts can be approximated as $m_a \sim \pi D_\delta h_a L_a g$, where h_a is thickness of the two “rings” taken together and g is an average density of the active parts (close to the densities of iron and copper).

A *Torque* is the product of a *Force* and an *Arm*. Accordingly, we can express torque in the electric machine as $T = F D_\delta / 2 = F_A A D_\delta / 2 = F_A \pi D_\delta^2 L_a / 2$. It is apparent that if a higher torque is required, then increasing D_δ would give much more effect than increasing L_a if we would like to keep moderate the increase in weight of the active parts m_a . The shape in Fig.5(a) is therefore preferable over the shape in Fig.5(b).

Let us note that volume of the rotor ($V_r = \pi D_\delta^2 L_a / 4$) will increase at the same rate as the torque, since it is also proportional to D_δ^2 . It is easy to see that overall volume of the active parts will follow the same trend. At the same time, weight will increase slower, since it is proportional to D_δ .

Активными частями электрической машины называются части, проводящие электрические токи или магнитное поле, изменяющиеся во времени и, таким образом, непосредственно участвующие в преобразовании энергии. Обычно активные части представляют собой концентрические «кольца» как показано на Рис.5. Масса активных частей может быть приблизительно оценена как $m_a \sim \pi D_\delta h_a L_a g$, где h_a – толщина обоих «колец» вместе взятых, а g – средняя плотность активных частей (близкая к плотности стали и меди).

Момент определяется как произведение *Силы* на *Плечо*. Соответственно, мы можем выразить момент как $T = F D_\delta / 2 = F_A A D_\delta / 2 = F_A \pi D_\delta^2 L_a / 2$. Очевидно, что если требуется повысить момент, то увеличение диаметра D_δ даст значительно больший эффект чем увеличение длины L_a , если при этом ставится цель не допустить значительного увеличения m_a . Поэтому форма активных частей на Рис. 5(a) предпочтительна по сравнению с формой на Рис. 5(b).

Заметим, что объем ротора ($V_r = \pi D_\delta^2 L_a / 4$) будет возрастать в той же степени, что и момент, поскольку объем тоже пропорционален D_δ^2 . Легко представить, что объем активных частей будет следовать той же зависимости. В то же время, масса будет возрастать в меньшей степени, поскольку она пропорциональна D_δ .

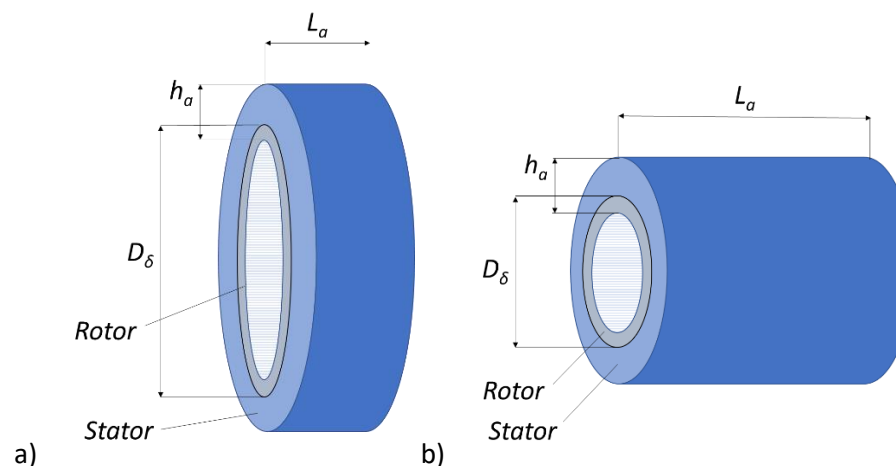


Fig.5. Shape of the active parts.

Рис.5. Форма активных частей.

However, electric machine consists not only of the active parts. It also needs the carrying structure (Fig.6). The carrying structure must accommodate the end-windings sticking out of the active parts. The end-windings take relatively small axial space when the machine is long like in Fig.6(b) and relatively large space in short machines like in Fig.6(a). When the diameter is chosen too high, and the machine gets too short, the end-windings become too large compared to the active parts, which is not a good design.

Weight of the carrying structure can be very roughly approximated as $m_c \sim D_\delta^2 k$, where k is a coefficient. Then the total weight of the machine is $m = m_a + m_c = \pi D_\delta h L_a g + D_\delta^2 k$. When the diameter gets too high the weight of the carrying structure, being proportional to D_δ^2 , can become the dominating part in the overall machine weight.

Another argument against too radical increase of the diameter is the convenience of coupling the machines to other mechanisms, like e.g. pumps, with limited shaft heights.

Электрические машины состоят не только из активных частей. Также необходимы несущие конструкции (Рис. 6). Размер несущих конструкций должен быть достаточен для размещения лобовых частей обмоток, выходящих из активных частей. Лобовые части занимают сравнительно небольшое аксиальное пространство в машинах с большой длиной как на Рис. 6(b) и относительно небольшое пространство в «коротких» машинах с большим диаметром как на Рис. 6(a). Когда диаметр машины очень велик по сравнению с ее длиной, лобовые части становятся слишком большими относительно длины активных частей, что экономически не оправдано.

Масса несущей конструкции может очень грубо быть оценена как $m_c \sim D_\delta^2 k$, где k - коэффициент. В таком случае полный вес машины получается $m = m_a + m_c = \pi D_\delta h L_a g + D_\delta^2 k$. При сильном увеличении диаметра, масса несущей конструкции, которая пропорциональна D_δ^2 , становится доминирующим компонентом в полной массе машины.

Еще один аргумент против радикального увеличения диаметра – удобство присоединения машин к приводным механизмам, таким как например насосы, у которых высоты оси вращения обычно ограничены.

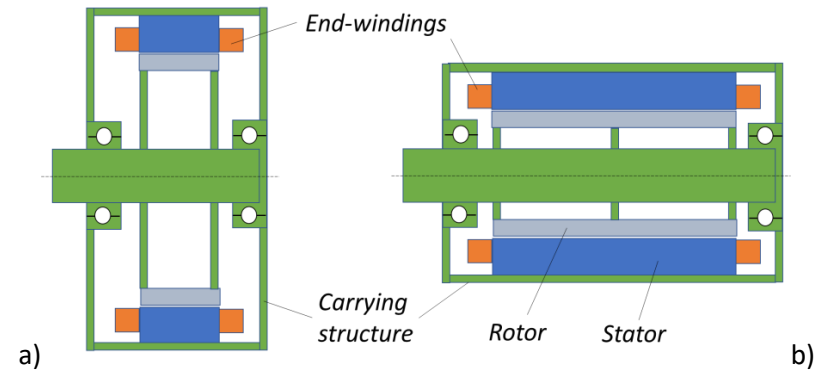


Fig.6. Active parts and carrying structure.

Рис.6. Активные части и несущие конструкции.

Torque is inversely proportional to speed: $T \sim P/n$, where P is power and n is speed. That means the machine with lower rated speed will have higher torque (if power is the same). As we explained above, the machine with higher torque will tend to have larger diameter and volume (size). The illustration is presented in Fig.7.

The machine with low speed will tend to have large diameter and short length, while the machine with high speed will tend to have slim shape (small diameter, axially long). In Fig.8 illustrates the shapes of the machines with the rated speeds different by an order of magnitude.



Fig.7. Sizes of the machines of the same power but of different speed.

Рис.7. Размеры машин одинаковой мощности, но разных скоростей.

Момент обратно пропорционален частоте вращения: $T \sim P/n$, где P – мощность, n – частота вращения. Это означает, что машина с более низкой частотой вращения будет иметь более высокий момент (при той же мощности). Как было объяснено выше, машина с более высоким моментом обычно будет иметь больший диаметр и объем (габариты) – см. иллюстрацию на Рис. 7.

Машина с низкой частотой вращения обычно будет иметь большой диаметр и небольшую длину в направлении оси вращения, в то время как машина с высокой частотой вращения обычно имеет продолговатую форму (небольшой диаметр, большая длина). На Рис.8 показаны формы машин, частоты вращения которых отличаются на порядок.

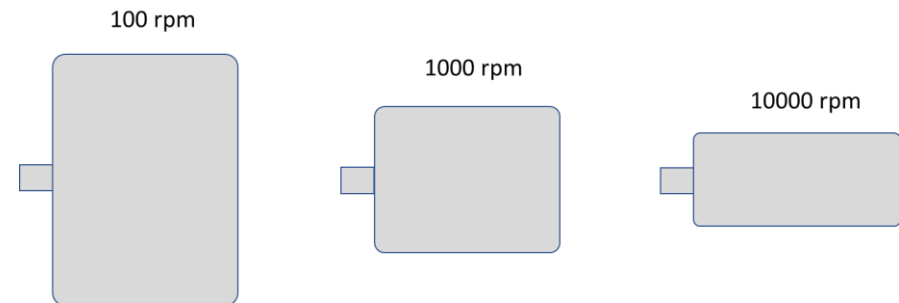


Fig.8. Shapes of the machines depending on speed.

Рис.8. Форма машин в зависимости от скорости.

Efficiency vs weight, size and cost

A machine can be designed in different ways for the same specification. One can use more or less of the active materials (laminated steel, copper, etc). If higher amount of active materials is used, meaning the slots are wider and/or deeper providing more area for the currents to flow and the laminated core provides wider paths for the magnetic flux to pass, then both the copper losses and the iron losses are lower and the efficiency is higher. This is achieved at the expense of the weight, size and cost of the machine. Similar logic can be applied to conclude that the machine with low amount of active materials used will have higher losses and lower efficiency. This trade-off is presented in Fig.9 showing the machines with higher efficiency larger than those with lower efficiencies.

The same trade-offs are reflected in IE classes (IE2, IE3, IE3).

Компромисс между КПД машины и ее размером, весом и стоимостью

Для одной и той же спецификации машина может быть спроектирована по-разному. Можно использовать больше или меньше активных материалов (шихтованный стальной сердечник, медь и т.д.). Если использовать сравнительно большее количество активных материалов, то площадь паза будет больше, создавая более низкое сопротивление току, также ширина зубцов и ярма будет больше, позволяя снизить значения индукции. В результате, потери в меди и потери в стали будут ниже, а КПД – выше. Естественно, это достигается за счет веса, габаритов и стоимости машины. Следуя той же логике, можно прийти к заключению, что машина с меньшим количеством активных материалов будет иметь более высокие потери и более низкий КПД. Данный компромисс представлен на Рис.9, демонстрируя, что машины с более высоким КПД больше размером, чем машины с более низким КПД.

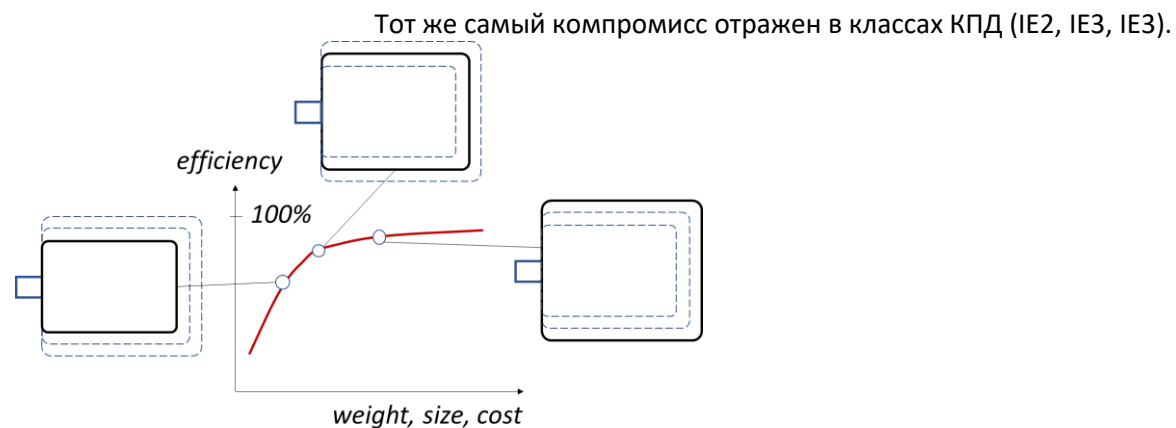


Fig.9. The trade-off.

Рис.9. Компромисс.

Machine type vs size and weight

Some machine types are more compact than other types and can have higher efficiency. For example, machine with permanent magnets (PM synchronous machine - PMSM) will have more compact size than the induction machine because the source of the magnetic field is inside the PMSM in the magnets and it is not required to have extra currents in the stator to create the field. The extra currents do not need extra copper area and do not produce extra losses. This results not only in the compactness but also in higher efficiency as shown in Fig.10.

Going from the size of the active parts to the size of the total machine, including the carrying structure, will not change the relationship.

Зависимость размера и веса машины от ее типа

Некоторые типы машин отличаются большей компактностью и более высоким КПД. Например, синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) более компактны чем асинхронные машины, поскольку магниты являются источником магнитного поля и не требуется передавать энергию для создания поля, повышая токи статора. Повышение токов в статоре требует большей площади пазов и сопровождается потерями. Поскольку в СМПМ передачи энергии для создания поля не требуется, они более компактны и имеют более высокий КПД как показано на Рис.10.

Это соотношение между машинами не изменится, если мы добавим к активным частям несущую конструкцию.

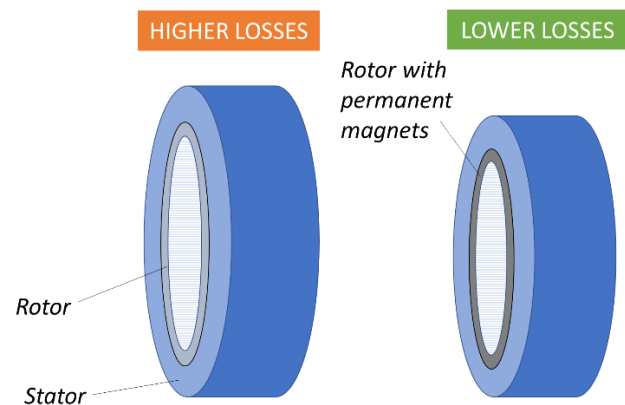


Fig.10. Active parts of the machines of different type.
Рис.10. Активные части машин различных типов.

Key parameters of electric machines

Rated power

Power rating of the electric machines available in *DriveConstructor* is according to IEC 60072-1 which suggests the following preferred ratings (based on a subset of the R40 series) for motors (in kW) and generators (in kVA):

0.06	0.09	0.12	0.18	0.25	0.37	0.55	0.75	1.1	1.5	1.8*	2.2	3*	3.7	4*	5.5	6.3*	7.5	10*	11	13*	15	17*	18.5
20*	22	25*	30	32*	37	40*	45	50*	55	63*	75	80*	90	100*	110	125*	132	150	160	185	200	220	250
280	300	315	335	355	375	400	425	450	475	500	530	560	600	630	670	710	750	800	850	900	950	1000	

Note that asterix-marked powers are "secondary series" ratings and are only to be used in cases of special need.

In *DriveConstructor* we use the following series of powers (in kW): 1.1, 1.5, 2.2, 3, 4, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160, 200, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1250, 1400, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000.

Our list is shorter than the IEC one as we picked up only the most used powers.

Rated voltage

Electric machines may be designed for different supply voltages (from converter or grid). Machines are usually designed for «standard» ranges of rated voltage, e.g. 380-400 V or 650-700 V, as it is easier to connect a «standard» machine to a typical grid or a «standard» frequency converter. In Europe and America the standard ranges are different. In Europe it is usual to differentiate between *LV* (below 1 kV) and *MV* (above 1 kV).

Основные параметры электрических машин

Номинальная мощность

Ряд мощностей электрических машин, доступных в программе *DriveConstructor*, соответствует стандарту IEC 60072-1, который предлагает следующий ряд предпочтительных мощностей (на основе подмножества серии R40) для двигателей (в кВт) и генераторов (в кВА):

Обращаем внимание, что мощности, помеченные звездочкой, относятся ко вторичной серии и могут использоваться только в случае особой необходимости.

В программе *DriveConstructor* используется следующий ряд мощностей (в кВт): 1.1, 1.5, 2.2, 3, 4, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160, 200, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1250, 1400, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000.

Этот ряд короче, чем в стандарте IEC, так как в программе выбраны только наиболее часто используемые значения мощностей.

Номинальное напряжение

Электрические машины могут быть рассчитаны на различное питающее напряжение (от преобразователя или от сети). Обычно машины проектируют на стандартный ряд напряжений, например, 380-400 В или 650-700 В, поскольку это облегчает подключение «стандартной» машины к типичной сети или к «стандартному» преобразователю частоты. В Европе и Америке стандартные ряды напряжений различны. В Европе обычно не различают низкое напряжение НН (ниже 1 кВ) и среднее напряжение СН (более 1 кВ).

In *DriveConstructor* the range of rated voltages to which the machine is designed to operate within can be chosen from the following options: 380-440, 650-700, 3200-3400, 5900-6700, 9000-12000 V. If it is desirable that the voltage is chosen automatically then choose "any". It is assumed that all machines are Y-connected. In practice windings can be reconnected into *D*, but this option is not included.

Machines designed for lower voltage are usually smaller, lighter and cheaper than those designed for MV. This is because of thinner insulation in the slots, which allows putting more copper in the slots and makes heat removal easier.

It is normally not possible to design LV machines for very high powers as currents would become too high and cables would become too thick to be practical. LV machines are normally produced for powers from fractions of kW up to a few MW (in *DriveConstructor* up to 2 MW), MV machines – from about 0,2 MW to 10...20 MW (in *DriveConstructor* up to 5 MW), in some cases up to 100 MW!

Slot designs of LV and MV machines look quite different (Fig. 1 and Fig. 2).

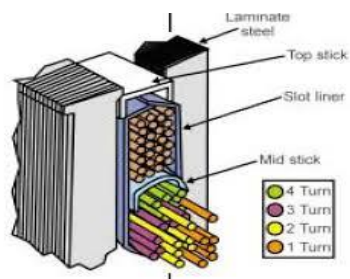


Fig.1. LV slot.

Рис.1. Паз машины низкого напряжения.

В программе *DriveConstructor* ряд номинальных напряжений, на которые рассчитана работа машины, содержит следующие значения: 380-440, 650-700, 3200-3400, 5900-6700, 9000-12000 В. Если надо выбрать напряжение автоматически, следует указать значение «любое». Предполагается, что обмотки всех машин соединены в звезду. На практике обмотки машин могут соединяться и в треугольник, но такой вариант в программе не предусмотрен.

Машины, рассчитанные на низкое напряжение, обычно меньше, легче и дешевле машин, рассчитанных на среднее напряжение. Это объясняется применением более тонкой изоляции в пазах, что позволяет размещать в пазах больше меди и облегчает отвод тепла.

Обычно невозможно спроектировать низковольтную машину очень большой мощности, поскольку токи будут очень велики и для них нельзя будет подобрать достаточно толстые кабели. Низковольтные машины обычно производятся на мощности от долей кВт до нескольких МВт (в программе *DriveConstructor* – до 2 МВт), машины среднего напряжения – на мощности от 0,2 МВт до 10...20 МВт (в программе *DriveConstructor* – до 5 МВт), в некоторых случаях до 100 МВт!

Формы пазов в машинах низкого и среднего напряжения различаются (рис. 1 и рис. 2).

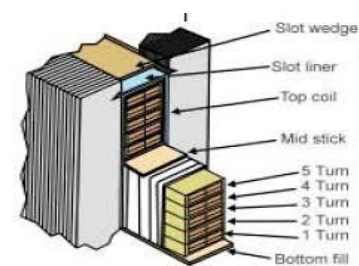


Fig.2. HV slot.

Рис.2. Паз машины среднего напряжения.

Rated synchronous speed

Rated synchronous speed is proportional to supply frequency and reverse proportional to number of poles ($n=120*f/p$). For 50 Hz supply and number of poles 2, 4, 6, 8 and 10 rated synchronous speed is 3000, 1500, 1000, 750 and 600, respectively.

SCIM have slip, so its rated speed is lower than rated synchronous speed by a few percent. SyRM and PMSM have rated speed equal rated synchronous speed.

It is obvious that a machine designed for delivering high power is bigger than a machine designed for delivering low power. It is less obvious that the rated speed the machine is designed for affects its weight, compactness, rotor inertia and cost. However, if the power is fixed, the machine with lower speed will have higher torque ($T \sim P/n$). To be able to provide higher torque the machine has to be larger, heavier and as the consequence more expensive.

Синхронная скорость

Синхронная скорость пропорциональна частоте питающего напряжения и обратно пропорциональна числу полюсов ($n=120*f/p$). Для напряжения с частотой 50 Гц и чисел полюсов 2, 4, 6, 8 и 10 синхронная скорость равна 3000, 1500, 1000, 750 и 600 об/мин соответственно.

АМ имеет некоторое скольжение, поэтому ее номинальная скорость меньше синхронной скорости на несколько процентов. СРМ и СМПМ имеют номинальную скорость равную синхронной скорости.

Очевидно, что машина, спроектированная на большую мощность, будет больше маломощной машины. Менее очевиден тот факт, что номинальная скорость, на которую спроектирована машина, влияет на ее вес, габариты, момент инерции ротора и стоимость. Однако, если взять машины одинаковой мощности, то машина с меньшей скоростью будет иметь больший момент ($T \sim P/n$). Для получения большого момента машина должна быть крупнее, тяжелее и, следовательно, более дорогой.

Efficiency class

The International Electrotechnical Commission (IEC) has developed an internationally applicable testing Standard IEC 60034-2-1 for electric motors and a classification scheme IEC 60034-30-1 with four levels of motor efficiency ("IE-code"):

- IE1 Standard efficiency,
- IE2 High efficiency,
- IE3 Premium efficiency
- IE4 Super premium efficiency.

The IE-code and its efficiency levels create a basic vocabulary for governments to determine the efficiency level for their minimum energy performance standards (MEPS). The European Union sets motor MEPS levels (Directive 640/2009) at IE3 (or IE2 in combination with a variable frequency drive) from 2015 for smaller motors and from 2017 covering also larger motors.

Класс эффективности

Международная электротехническая комиссия (МЭК / IEC) разработала международный стандарт испытаний IEC 60034-2-1 для электродвигателей и схему классификации IEC 60034-30-1 с четырьмя уровнями эффективности (КПД) ("код IE"):

- IE1 – стандартная эффективность,
- IE2 – высокая эффективность,
- IE3 – премиальная эффективность,
- IE4 – супер премиальная эффективность.

Код IE и его уровни эффективности являются основой для правительств, создающих свои уровни эффективности для стандартов минимальной энергетической эффективности (MEPS). Европейский союз устанавливает стандарт минимального уровня эффективности (Directive 640/2009) на уровне IE3 (или IE2 в сочетании с регулируемым электроприводом) начиная с 2015 г. для небольших двигателей и с 2017 г. также и для крупных двигателей.

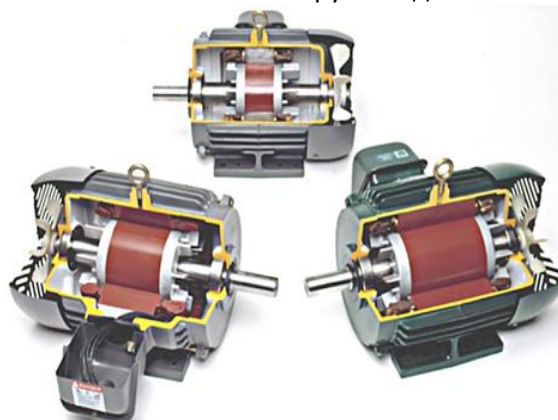


Fig.1. Cut-away of standard, energy-efficient, and premium efficiency motors.

Рис.1. Подборка из стандартного, энергоэффективного двигателя и двигателя премиальной эффективности.

Efficiency value for a certain class depends on power as shown on the diagram in Fig.2.

Efficiency at partial load (e.g. 25%, 50%) is lower than at rated load (100%). High efficiency class motors are larger and heavier, while lower IE class motors are more compact and lighter. Therefore, motors with higher IE class are more expensive.

Уровень эффективности для каждого класса зависит от мощности двигателя как показано на рис.2.

Эффективность двигателя при частичных нагрузках (например, 25%, 50%) меньше эффективности при номинальной нагрузке (100%). Высокоэффективные двигатели крупнее и тяжелее, а двигатели меньших классов эффективности более компактные и легкие. В результате, двигатели более высоких классов эффективности оказываются более дорогими.

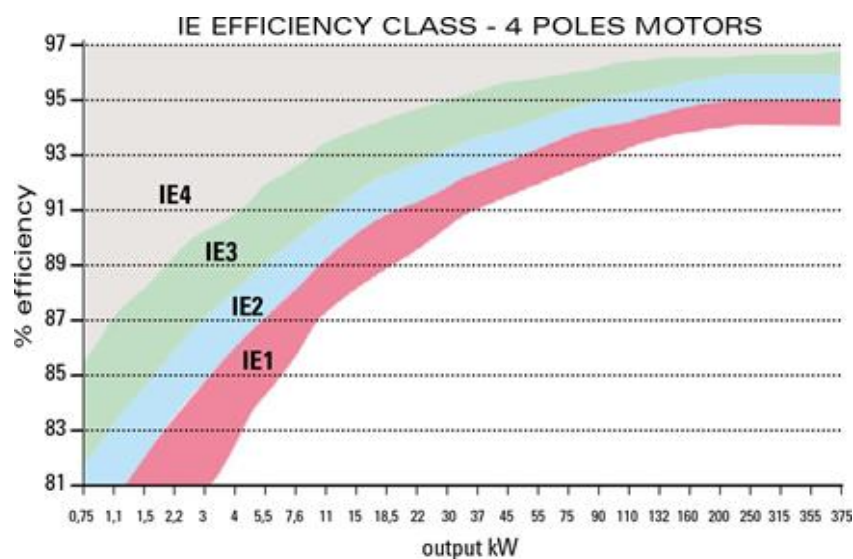


Fig.2.

Рис.2.

Cooling

Cooling arrangements are usually chosen to minimize machine cost. Other factors, such as the availability of cooling water, the need to minimize airborne noise, or space limitations, may influence the eventual choice. There exist many types (classes) of cooling. However, in *DriveConstructor* the choice is limited to the three classes presented below:

- air-cooled self-cooled, designated *IC411*
- air-cooled forced-cooled *IC416* (forced ventilation independent from the shaft)
- water-cooled *IC71W*

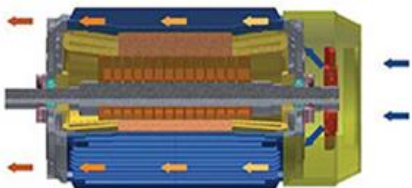


Fig.1. Air-cooled self-cooled, *IC411*.

Рис.1. Естественное воздушное охлаждение *IC411*.

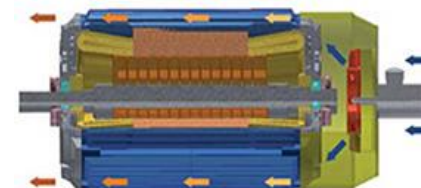


Fig.2. Forced-cooled, *IC416*. Note separate motor for driving the fan.

Рис.2. Принудительное охлаждение *IC416*. Вентилятор вращается отдельным двигателем.

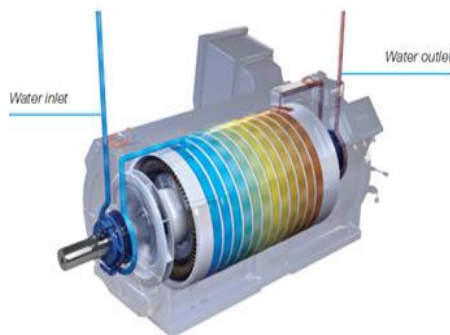


Fig.3. Water-cooled, *IC71W*. Рис.3. Водяное охлаждение *IC71W*.

Охлаждение

Способы охлаждения обычно выбирают так, чтобы снизить стоимость машины. На конкретный выбор способа охлаждения могут также повлиять и другие факторы, как доступность охлаждающей жидкости, требования минимизации аэродинамических шумов или габаритные ограничения. Существует много типов (классов) охлаждения. Однако, в программе *DriveConstructor* пользователь может выбирать из трех следующих способов охлаждения:

- естественное воздушное охлаждение *IC411*
- принудительное воздушное охлаждение *IC416* (принудительная вентиляция безотносительно скорости вращения вала)
- водяное охлаждение *IC71W*

Fig. 4 shows that *IC416* provides more load capacity at low speeds than *IC411*. It is because the independently fed fan motor of *IC416* configuration allows maintaining the cooling air flow independently on the rotor speed.

Water-cooled machines can be 20-40% smaller than air-cooled IP54/55 machines. If cooling water is available, some economies in motor size can be obtained by the use of water-cooling.

Сравнение способов охлаждения на рис. 4 показывает, что *IC416* обеспечивает больший момент при малых скоростях, чем *IC411*. Это объясняется наличием в двигателе *IC416* дополнительного приводного двигателя для вращения вентилятора, обеспечивающего поток охлаждающего воздуха вне зависимости от частоты вращения вала двигателя.

Машины с водяным охлаждением могут быть на 20-40% меньше машин с воздушным охлаждением исполнения IP54/55. При наличии охлаждающей жидкости можно достичь некоторой экономии по габаритам двигателя, выбирая машину с водяным охлаждением.

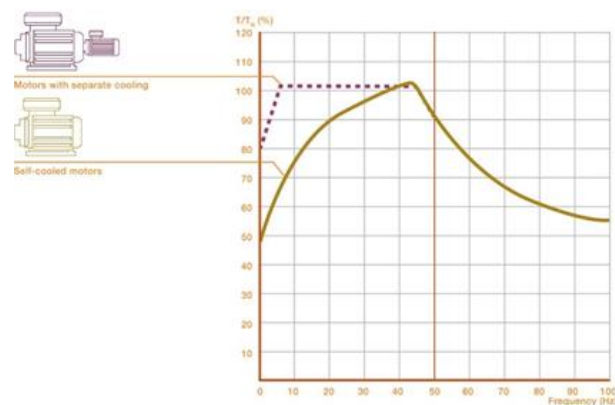


Fig.4. *IC411* vs *IC416*.

Рис.4. Сравнение *IC411* и *IC416*.

Mechanical design

Mounting variants

There are three basic variants of mounting included in *DriveConstructor*: B3 – foot-mounted, B5 – flange-mounted, B35 – machine with both feet and flange. The difference between mounting variants is reflected in price. Flange-mounted machine would have 1-3% higher price and flange&foot-mounted – by 5%, compared to the basic foot-mounted design.

Shaft height

IEC and NEMA has standardized motor dimensions, including shaft height. Standard shaft heights row in mm: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710. If the shaft height of the driven mechanism is set, then it can be beneficial to choose electric machine with the same or close shaft height to simplify coupling of the motor and the mechanism. If the shaft height of the driven mechanism is unknown then for the electric machine “any” can be chosen instead of some concrete value. Shaft height is approximately equal to half the diameter ($h=OD/2$).



Fig.1. Mounting B3.
Рис.1. Исполнение B3.



Fig.2. Mounting B5.
Рис.2. Исполнение B5.



Fig.3. Mounting B35.
Рис.3. Исполнение B35.

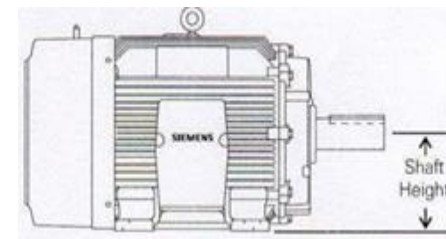


Fig.4. Shaft height illustration.
Рис.4. Высота оси вращения.

Механическая конструкция

Варианты установки двигателя

В программе *DriveConstructor* существует три основных варианта установки: B3 – на лапах, B5 – на фланце, B35 – комбинированное исполнение с лапами и фланцем. Разница в способе установки отражается на цене двигателя. Стоимость двигателя с фланцем на 1-3% выше стоимости двигателя на лапах, а двигатель комбинированного исполнения на 5% дороже двигателя на лапах.

Высота оси вращения

МЭК и NEMA стандартизируют габариты электродвигателей, включая высоту оси вращения. Стандартный ряд высот оси вращения (в мм): 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710. Использование стандартизированной высоты оси вращения механизма и приводного двигателя упрощает соединение валов двигателя и механизма в процессе монтажа всей установки. Если высота оси вращения механизма не известна, в программе можно выбрать значение «любая» вместо подбора конкретного значения. Обычно высота оси вращения равна половине диаметра ($h=OD/2$).

Frame material

The available frame materials are used based on their mechanical strength, density, heat transfer capability, cost, corrosion resistance, etc. In *DriveConstructor* it is possible to choose from Aluminum (AL), Cast Iron (CI) and Steel (S). Some characteristics of the materials in comparison to the others are given below:

- Aluminum
 - vs CI&S: Aluminum is almost two-three times lighter than steel or cast iron but several times more expensive
 - vs CI&S: Aluminum is a better heat conductor than steel or cast iron. The extrusion process enhances aluminum's heat conducting properties by allowing the frame sections to have thinner fins placed closer together. The result is more fins and greater surface area for maximum cooling. So, machines with aluminum frames will be more compact and lighter
 - vs CI&S: Machines with aluminum frames are usually cheaper and easier to install (because they are lighter).

- Cast iron
 - vs AL: Cast iron machines don't have corrosion problems. Their frames are much stronger than aluminum frames, but they are heavier and harder to install.
 - vs S: Cast iron is cheaper than steel

- Steel
 - vs CI: The yield strength of steel is higher than the ultimate strength of cast iron. This makes steel much stronger and

Материал корпуса

Материал корпуса двигателя выбирают на основе его механической прочности, плотности, коэффициента теплопередачи, стоимости, коррозионной стойкости и т.д. В программе *DriveConstructor* можно выбирать из трех вариантов: Алюминий (AL), Чугун (CI) и Сталь (S). Ниже приведены некоторые характеристики этих материалов по сравнению с прочими:

- Алюминий
 - по сравнению с чугуном и сталью алюминий почти в два-три раза легче, но в несколько раз дороже;
 - алюминий имеет большую теплопроводность, чем чугун и сталь. Процесс экструзии при изготовлении алюминиевого корпуса позволяет улучшить теплоотводящие свойства корпуса благодаря формированию более тонких ребер, расположенных теснее на корпусе. В результате на корпусе оказывается больше ребер, а площадь охлаждения увеличивается, способствуя охлаждению. В результате, машины с алюминиевым корпусом получаются меньше и легче прочих;
 - машины с алюминиевым корпусом обычно дешевле и проще в установке благодаря их меньшему весу.

- Чугун
 - по сравнению с алюминием чугун не имеет проблем с коррозией. Такие корпуса прочнее алюминиевых, но машины с ними оказываются тяжелее и сложнее в установке;
 - по сравнению со сталью чугун дешевле.

- Сталь
 - предел текучести стали выше, чем предел прочности чугуна. Это делает стальной корпус более прочным и на 250% более жестким, чем

250% more rigid than cast iron. Cast iron is perceived as a rugged motor frame material because of its bulkiness, when in reality its relatively fragile nature requires 2-2,5 times as much metal to approach the performance of steel. And when it comes to impact loads, steel provides much greater resistance to cracking.

Aluminum frames are usually used up to 60 kW, steel and cast iron frames – to MW level.

чугунный. Чугунный корпус обычно воспринимается как более прочный благодаря своей громоздкости, но в силу большей хрупкости чугуна его требуется в 2-2,5 раза больше для получения тех же свойств, что у стального корпуса. А в случае ударных нагрузок сталь проявляет большее сопротивление растрескиванию.

Обычно алюминиевые корпуса используются в двигателях мощностью до 60 кВт, стальные и чугунные – вплоть до мегаваттного уровня.

Insulation classes

Anyone specifying or using electric machines should have understanding of how the insulation is related to temperature. Three classes of insulation are in common use (with *F* being the most common):

- class *B* - with a maximum operating temperature of 130 °C
- class *F* - with a maximum operating temperature of 155 °C
- class *H* - with a maximum operating temperature of 180 °C

Typically motors are designed for a maximum ambient temperature of 40 °C. The difference between the average winding temperature and any hot spot is limited and it is usual to allow a 10 °C margin for class *B* and *F* insulation and a 15 °C margin for class *H*.

Insulation class	B	F	H
Maximum insulation temperature	130 °C	155 °C	180 °C
Maximum temperature rise	80 °C	100 °C	125 °C

Note that electrical machines are designed for an overall temperature rise to a level that is below the maximum specified for the insulation materials. For example, using class-F insulation:

$$\text{max ambient} + \text{max temperature rise} = 40^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C} = 140^{\circ}\text{C},$$

which gives a thermal reserve of 15 °C. The larger the thermal reserve, the longer the life expectancy of the insulation material.

Классы изоляции

Каждый, кто описывает или использует электрические машины, должен понимать температурную зависимость изоляции. Обычно используется три класса изоляции (самый распространенный – класс *F*):

- класс *B* – имеет максимальную рабочую температуру 130 °C
- класс *F* – имеет максимальную рабочую температуру 155 °C
- класс *H* – имеет максимальную рабочую температуру 180 °C

Обычно двигатели проектируют на работу при максимальной температуре окружающей среды 40 °C. Возможная разница между средней температурой обмотки и температурой наиболее нагретой ее части не должна превышать 10 °C для классов изоляции *B* и *F* и не более 15 °C для изоляции класса *H*.

Класс изоляции	B	F	H
Максимально допустимая температура	130 °C	155 °C	180 °C
Максимальное превышение температуры	80 °C	100 °C	125 °C

Заметим, что при проектировании электрических машин превышение температуры изоляции выбирается меньше максимально допустимого для данной изоляции. Например, для изоляции класса *F*:

$$\text{максимальная температура окружающей среды} + \text{максимальное превышение температуры} = 40^{\circ}\text{C} + 100^{\circ}\text{C} = 140^{\circ}\text{C},$$

что дает запас по температуре в 15 °C. чем больше будет такой запас, тем больше будет ожидаемая продолжительность службы изоляции.

When operating contentiously at the maximum rated temperature of its class, the life expectancy of the insulation is about 10 years. Most machines do not operate at such extreme conditions because an additional safety margin is usually allowed between the calculated load torque requirements and the actual size of the machine chosen for the application. So life expectancy of a machine, which is correctly matched to its load and with suitable safety margins, can reasonably be taken between 15 and 25 years. It is common practice to design machines for class-*B* temperature rise but to actually use class-*F* insulation materials. This provides an extra 20 °C thermal that will extend the life expectancy to more than 20 years. This also means that the machine could be used at higher ambient temperatures of up to 50 °C or more, theoretically up to 65 °C.

Running motors at a reduced temperature will also significantly extend the useful life. For example, a machine operating at 180 °C will have an estimated life of

- only 300 hours with Class *A* insulation
- only 1800 hours with Class *B* insulation
- only 8500 hours with Class *F* insulation
- tens of thousands of hours with Class *H* insulation

При постоянной работе машины с максимально допустимой температурой изоляции ожидаемый срок службы изоляции составляет 10 лет. Большинство машин не работают в таких экстремальных условиях, поскольку при их проектировании закладывается дополнительный запас по температуре, влияющий на выбор размеров машины для заданной нагрузки. В результате, ожидаемый срок службы машины при правильном выборе нагрузки составляет от 15 до 25 лет. Часто машины проектируют из расчета применения изоляции класса *B*, но реально используют изоляцию класса *F*. Это дает дополнительный запас в 20 °C, что продлевает срок службы более чем на 20 лет. Это также означает, что такая машина может эксплуатироваться при температуре окружающей среды до 50 °C и выше, теоретически, до 65 °C.

Работа двигателей при пониженной температуре также существенно продлевает их срок службы. Например, машина, работающая при температуре 180 °C, будет иметь ожидаемый срок службы

- только 300 часов при использовании изоляции класса *A*;
- только 1800 часов при использовании изоляции класса *B*;
- только 8500 часов при использовании изоляции класса *F*;
- десятки тысяч часов при использовании изоляции класса *H*.

Frequency converters

A typical frequency converter (FC) nowadays is a so-called voltage-source type - over 95% of all FC are voltage-source converters (VSC). This FC type has a DC-link with a capacitor bank across (see Fig.1).

The voltage of the supply network with a constant frequency and amplitude is first rectified into DC voltage though with some ripples (Fig.2), and then it is converted into the voltage with the required frequency and amplitude (Fig. 3). Note that the voltage waveform is made of pulses of varying duration, wherein the "fundamental" voltage is sinusoidal.

Some FC theory can be found for example [here](#), [here](#) and [here](#).

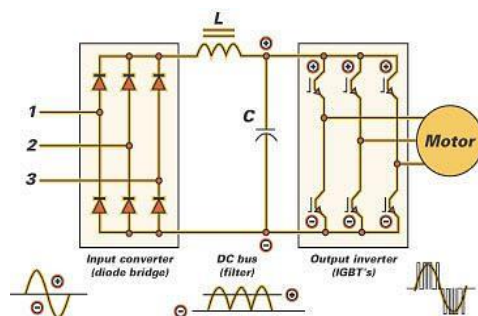


Fig.1. VSC topology.

Рис.1. Схема преобразователя напряжения.

Преобразователи частоты

В настоящее время под преобразователем частоты (ПЧ) понимается преобразователь напряжения – более 95% всех выпускаемых преобразователей являются преобразователями напряжения. Это тип ПЧ имеет шину постоянного тока с подключенным блоком конденсаторов (рис.1).

Напряжение питающей сети, имеющей постоянную частоту и амплитуду переменного напряжения, сначала выпрямляется до напряжения постоянного тока с некоторыми пульсациями (рис. 2) и затем преобразуется в переменное напряжение с требуемой частотой и амплитудой (рис. 3). При этом форма напряжения представляет собой ряд импульсов изменяющейся ширины, образуя синусоидальную «основную» гармонику нужной частоты и амплитуды.

Теоретические основы работы ПЧ можно найти, например, [здесь](#), [здесь](#) и [здесь](#).

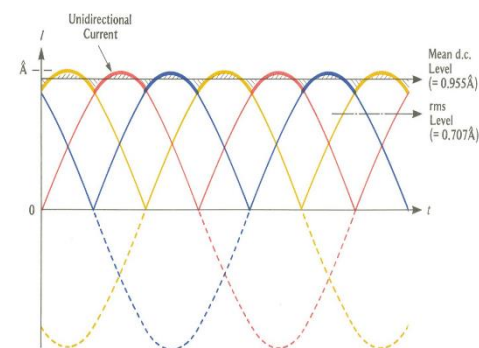


Fig.2. Rectified current in the DC link.

Рис.2. Выпрямленный ток в шине постоянного тока.

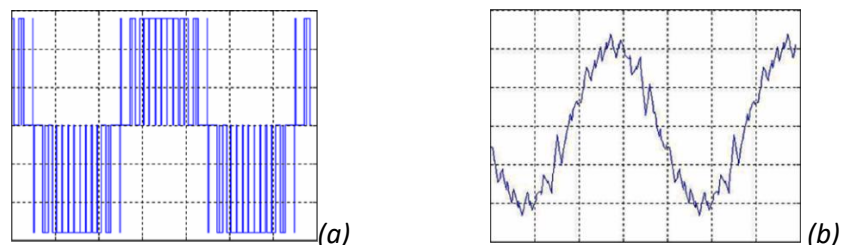


Fig.3. Phase voltage (a) and current (b) at the converter output (machine side).

Рис.3. Фазное напряжение (a) и ток (b) на выходе преобразователя (на стороне двигателя).

FC mounting variant

Small and light FC are usually wall-mounted, while large and heavy are floor-mounted. In Fig.4 the smaller dark-colored FC are for wall-mounting. The larger light-colored FC should be floor-installed. Usually FC above 250 kW can be found in floor-mounted versions only. FC can be wall mounted when powers are below 250 kW. Wall-mounted modules can be convenient in certain cases, e.g. FC can be installed into existing cubicles or when the floor is wet wall mounted design can be the only way. For some powers (usually 200...250 kW) there exists both wall-mounted & floor-mounted versions.

Варианты установки

Небольшие и легкие ПЧ обычно крепятся на стену, в то время как большие и тяжелые устанавливаются на полу. На рис.4 небольшие ПЧ темного цвета предназначены для установки на стену. Более тяжелые ПЧ светлых цветов предназначены для установки на полу. Обычно ПЧ мощностью более 250 кВт имеют только напольное исполнение. ПЧ могут иметь настенное крепление при мощностях ниже 250 кВт. Настенные модули в некоторых случаях оказываются удобнее, например, такой ПЧ может быть установлен в готовом шкафу, также настенное исполнение оказывается единственно возможным в случае мокрого пола. Для некоторых значений мощностей (обычно 200...250 кВт) можно найти как настенное, так и напольное исполнение ПЧ.



Fig.4. Family of frequency converters by Vacon.

Рис.4. Семейство преобразователей частоты от компании Vacon.

FC topologies

FC can be 2-quadrant (2Q) and 4-quadrant (4Q):

- 2Q FC can transfer power only in one direction - from the grid to the electric machine (motor),
- 4Q FC can transfer power not only from the grid to the machine but also from the machine (generator) to the grid.

Usually the operational mode (motoring, generating or both) of the application defines what FC should be chosen, 2Q or 4Q. For example a wind turbine requires 4Q FC with fully-controlled inverter scheme at the grid side. Sometimes operational requirements in applications which typically require 2Q, may require 4Q - for example large fan with high inertia may require considerable braking capability to slow down in reasonably short time.

Схемы управления преобразователей

Преобразователь частоты может иметь 2-квadrантную и 4-квadrантную схему управления:

- 2-квadrантный ПЧ может передавать энергию только в одном направлении – от сети к электрической машине (электродвигателю),
- 4-квadrантный ПЧ может передавать энергию не только от сети к машине, но и от машины (генератора) в сеть.

Обычно режим работы электрической машины (двигательный, генераторный или оба) определяет выбор схемы управления ПЧ. Например, ветровая турбина требует использования 4-квadrантной схемы управления ПЧ с полностью управляемым инвертором на стороне сети. Иногда условия работы установок с типично 2-квadrантной схемой управления требуют перехода на 4-квadrантное управление, например, крупный вентилятор с большим моментом инерции должен обладать тормозным режимом для остановки за разумное время.

FC can be low-voltage (LV) and medium-voltage (MV). LV FC usually have only 2-level (2L) topology, MV – several alternative topologies (3L-NPC, SCHB, etc.). Both the LV and MV topologies can be 2Q and 4Q. The choice of LV or MV is usually defined by the power level, but other features of the application, e.g. long cable can also affect the choice. Some FC require input transformer, some don't.

As in *DriveConstructor* we deal with VSC only, all the topologies included in the software and presented below have "VSC" in the designations.

Converters of 2-level topology

2Q-2L-VSC-6p, 2Q-2L-VSC-12p and 4Q-2L-VSC

2Q FC inventor scheme at the grid side can be 6-pulse («6p») and 12-pulse («12p»). Difference between «6p» and «12p» is in size, weight, cost, efficiency and influence on the grid (THD). 4Q FC is larger, heavier, more expensive and has lower efficiency than 2Q FC. 4Q produce lower THD in the grid. 2-level FC are usually LV.

Note that on Fig.1a motor side of the FC is the right side, while on Fig.1b - left side.

Преобразователи частоты могут быть рассчитаны на низкое напряжение или среднее напряжение. Преобразователи низкого напряжения обычно используют только 2-уровневые схемы, а преобразователи среднего напряжения могут использовать несколько альтернативных схем (3-уровневые 3L-NPC, многоуровневые SCHB, и т.д.). Все схемы ПЧ как низкого, так и среднего напряжения могут иметь как 2-квadrантное, так и 4-квadrантное управление. Выбор уровня напряжения определяется обычно мощностью преобразователя, но также и особенностями применения, например, длинные кабели могут повлиять на выбор. Некоторые ПЧ требуют применения входного трансформатора, некоторые не требуют.

Поскольку в программе *DriveConstructor* используются только преобразователи напряжения, все применяемые схемы содержат аббревиатуру "VSC" в названии.

Преобразователи с 2-уровневой схемой

2Q-2L-VSC-6p, 2Q-2L-VSC-12p and 4Q-2L-VSC

Схема инвертора 2-квadrантного преобразователя частоты на стороне сети может быть 6-пульсной («6p») и 12-пульсной («12p»). Разница между 6-пульсной и 12-пульсной схемами выражается в разном размере, весе, стоимости, КПД преобразователя и его влиянии на сеть (коэффициент нелинейных искажений / THD). 4-квadrантный преобразователь частоты крупнее, тяжелее, дороже и имеет меньший КПД по сравнению с 2-квadrантным. Но он оказывает меньшее влияние на сеть. 2-уровневые преобразователи обычно выполняют на низкое напряжение.

Обратите внимание, что на рис.1а двигатель подключается к преобразователю справа, а на рис.1b – слева (на стороне с управляемыми тиристорами).

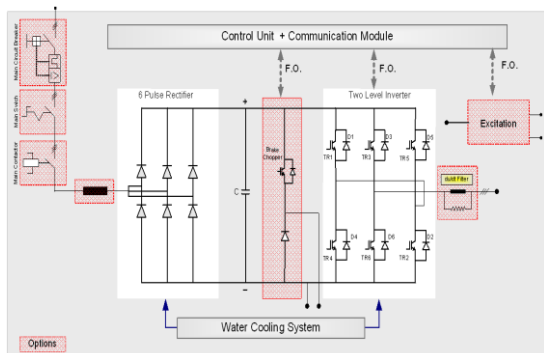


Fig.1a. 2Q-2L-VSC-6p.
 Рис.1а. Схема 2Q-2L-VSC-6p.

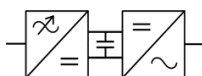


Fig.1b. Icon designation.
 Рис.1b. Пиктограмма.

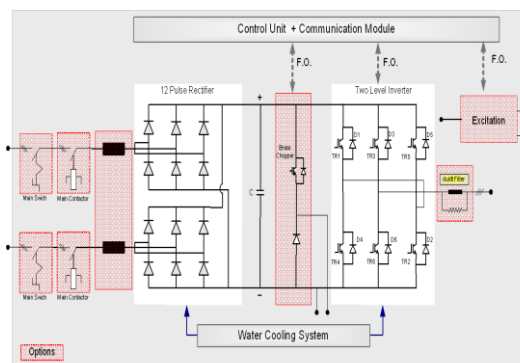


Fig.2a. 2Q-2L-VSC-12p.
 Рис.2а. Схема 2Q-2L-VSC-12p.

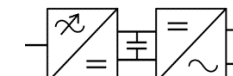


Fig.2b. Icon designation.
 Рис.2b. Пиктограмма.

Converters with 3- and multi-level topologies

2Q-3L-NPC-VSC and 4Q-3L-NPC-VSC

3-level FC are usually MV. NPC stands for Neutral-Point Clamped.

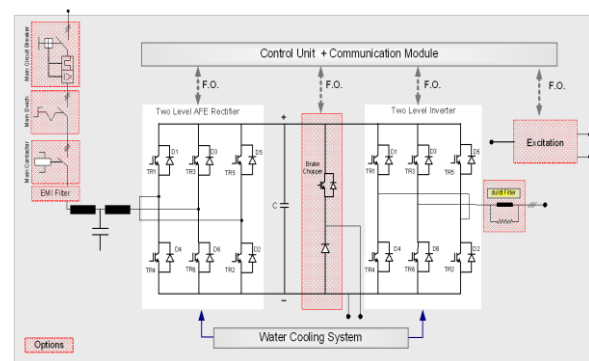


Fig.3a. 4Q-2L-VSC.
 Рис.3а. Схема 4Q-2L-VSC.



Fig.3b. Icon designation.
 Рис.3b. Пиктограмма.

Преобразователи с 3-уровневой и многоуровневой схемами

2Q-3L-NPC-VSC и 4Q-3L-NPC-VSC

3-уровневые преобразователи частоты обычно выполняют на среднее напряжение. Аббревиатура NPC обозначает фиксированную нейтраль (Neutral-Point Clamped).

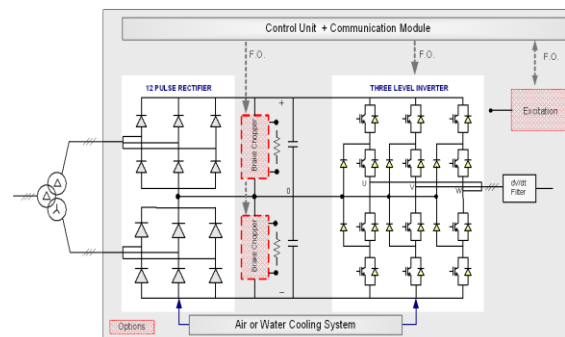


Fig.4a. 2Q-3L-NPC-VSC.
 Рис.4а. Схема 2Q-3L-NPC-VSC.

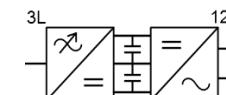


Fig.4b. Icon designation.
 Рис. 4b. Пиктограмма.

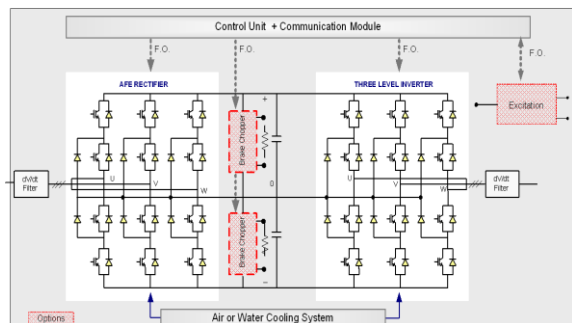


Fig.5a. 4Q-3L-NPC-VSC.
Рис.5а. Схема 4Q-3L-NPC-VSC.

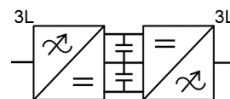


Fig.5b. Icon designation.
Рис. 5b. Пиктограмма.

2Q-ML-SCHB-VSC and 4Q-ML-SCHB-VSC

SCHB stands for Series-Connected H-Bridge.

2Q-ML-SCHB-VSC и 4Q-ML-SCHB-VSC

Аббревиатура SCHB обозначает последовательно включенный мост (Series-Connected H-Bridge).

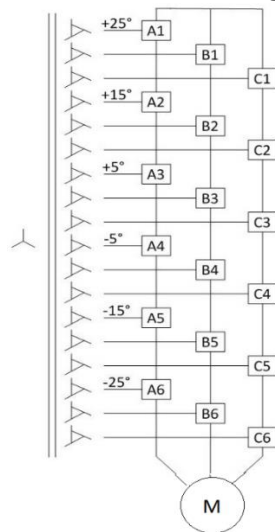


Fig.6a. 2Q-ML-SCHB-VSC topology. Рис. 6а. Схема 2Q-ML-SCHB-VSC.

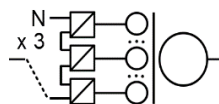
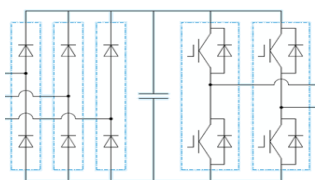


Fig.6b. 2Q-ML-SCHB-VSC cell. Fig.6c. Icon designation.
Рис. 6b. Ячейка 2Q-ML-SCHB-VSC. Рис. 6c. Пиктограмма.

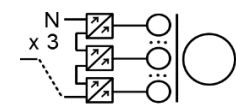
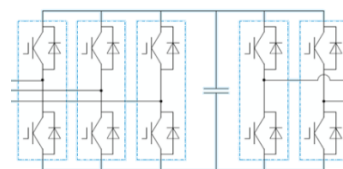


Fig.6d. 4Q-ML-SCHB-VSC cell. Fig.6e. Icon designation.
Рис. 6d. Ячейка 4Q-ML-SCHB-VSC. Рис. 6e. Пиктограмма.

FC power, voltage and current

Rated power

FC are rated according to IEC standard. The series of powers in *DriveConstructor* is 1.1, 1.5, 2.2, 3, 4, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160, 200, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1250, 1400, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 kW. If it is desirable that power is chosen automatically then choose "any" - it is the default setting.

Rated voltage

The same voltage ranges are given both for grid side and machine side of the converter. In *DriveConstructor* the variants to choose from are: 380-440, 650-700, 3200-3400, 5900-6700, 9000-12000 V. If it is desirable that voltage is chosen automatically then choose "any" - it is the default setting.

In *DriveConstructor* 3L-NPC topologies can have voltage rating of 2460 V, 3300 V and 4160 V, while ML-SCHB topologies – 6000 V, 6600 V, 10000 V and 11000 V.

Мощность, напряжение и ток преобразователя

Номинальная мощность

Ряд номинальных мощностей преобразователей частоты соответствует стандарту МЭК. В программе *DriveConstructor* используется следующий ряд мощностей 1.1, 1.5, 2.2, 3, 4, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 160, 200, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1250, 1400, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 кВт. Для автоматического выбора мощности преобразователя можно выбрать значение «любая» — это значение по умолчанию.

Номинальное напряжение

Диапазоны напряжений преобразователя на стороне сети и на стороне машины должны быть одинаковы. В программе *DriveConstructor* можно выбирать следующие значения диапазонов напряжений: 380-440, 650-700, 3200-3400, 5900-6700, 9000-12000 В. Для автоматического выбора напряжения можно выбрать значение «любое» — это значение по умолчанию.

В программе *DriveConstructor* схемы 3L-NPC могут иметь номинальные напряжения 2460 В, 3300 В и 4160 В, в то время как схемы ML-SCHB рассчитаны на напряжения – 6000 В, 6600 В, 10000 В и 11000 В.

Currents

For almost any application it can be expected that load torque will vary with time going up and down. The pattern can be quite unpredictable. As current drawn from the FC is proportional to the load torque, the torque variation determines the current variation. In some application, e.g. pumps, the variation is not significant and can be called "low", while in other applications, e.g. conveyor or winch, the variation can be significant, and, therefore can be called "high". Examples of what can be called "high overloads" and "low overloads" are presented in Fig.1.

Choosing the FC the designer should take this aspect into account. Each FC has certain overload capability determined by several physical limitations such as thermal current and maximum current. The overloads the FC can tolerate will be characterized by a certain amplitude, duration and cycle.

Токи

Практически в любом применении нагрузочный момент может изменяться со временем, то повышаясь, то понижаясь. И кривая изменения момента может быть непредсказуемой. Поскольку ток, потребляемый от преобразователя частоты, пропорционален нагрузочному моменту, колебания момента приводят к колебаниям тока. В некоторых применениях, например, в насосах, такие колебания не очень значительны и могут называться «небольшими», в то время как в других применениях, например, у конвейера или лебедки колебания тока могут быть очень велики, чтобы считаться «большими». Примеры того, что считается большой перегрузкой и небольшой перегрузкой, показаны на рис.1.

При выборе преобразователя частоты следует учитывать этот аспект. Каждый преобразователь имеет определенную перегрузочную способность, определяемую его физическими ограничениями, такими как тепловой поток и максимальный ток. Перегрузки, которые может выдерживать преобразователь, характеризуются амплитудой, длительностью и периодичностью.

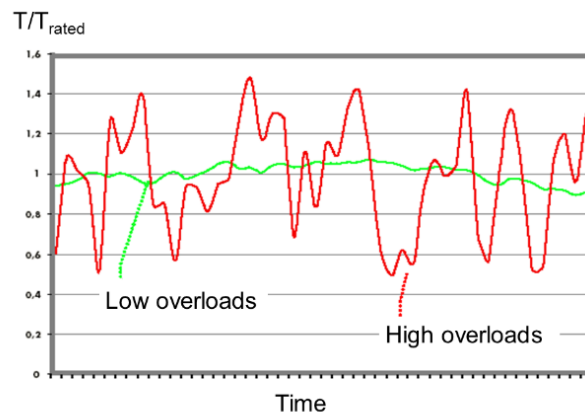


Fig.1. "High overloads" and "low overloads".

Рис.1. Большая перегрузка и небольшая перегрузка.

The same converter can be used for "high overloads (HO)" and "low overloads (LO)" but its rated current in a catalogue will be presented in two variants; I_H and I_L , where I_L is always higher than I_H . The principle is that motor current I_m should be lower than FC current. When choosing FC for LO application, e.g. a pump, I_L should be used and I_L should be higher than I_m . Usually for LO applications acceptable overloads are just 10% and FC current should then handle $1.1 \cdot I_L$. When choosing FC for HO application, e.g. a conveyor, I_H should be used and I_H should be higher than I_m . Usually for HO applications acceptable overloads are 50% and FC current should then handle $1.5 \cdot I_H$.

Explanation is presented in Fig.2. Note I_c , which is rated continuous current, which is not used in practice. Short-term (10 s) high current of up to 200% of I_H is acceptable for any converter.

Один и тот же преобразователь может использоваться при больших перегрузках (HO) и небольших перегрузках (LO), но тогда его номинальный ток будет представлен в каталоге в двух вариантах: I_H и I_L , причем I_L всегда больше I_H . При выборе преобразователя для питания двигателя надо соблюдать принцип, чтобы ток двигателя I_m был бы меньше тока преобразователя. При выборе преобразователя для приложения с небольшой перегрузкой, например, насоса, следует ориентироваться на значение тока I_L и это значение тока преобразователя должно быть больше I_m . Обычно для приложений с небольшой перегрузкой допустимые перегрузки не превышают 10% и в качестве тока преобразователя можно брать $1.1 \cdot I_L$. При выборе преобразователя для приложения с большой перегрузкой, например, конвейера, следует ориентироваться на значение тока I_H и это значение тока преобразователя должно быть больше I_m . Обычно для приложений с большой перегрузкой допустимые перегрузки составляют 50% и в качестве тока преобразователя следует брать $1.5 \cdot I_H$.

Рис. 2 содержит пояснение. Обратите внимание, что ток I_c представляет собой номинальный установившийся ток и его значение не используется на практике. Краткосрочная (10 с) перегрузка по току до 200% от I_H является допустимой для любого преобразователя.

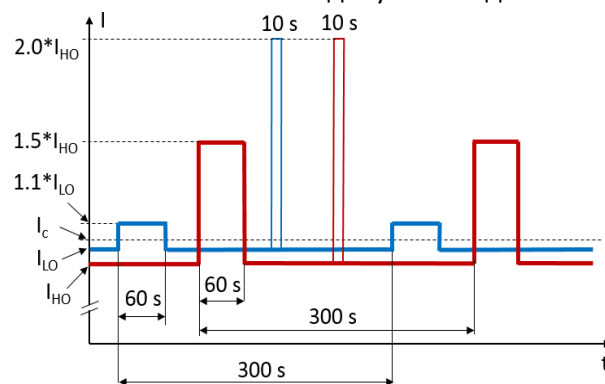


Fig.2. Current overloads of conventional FC.

Рис.2. Перегрузка по току в обычном преобразователе частоты.

FC cooling

Typical efficiency of the low-voltage FC is 98% meaning 2% of converted energy is turned into heat which needs to be removed from the enclosed area. FC can be cooled by moving air and water (air- and liquid-cooling; *AC* and *LC*). The difference between *AC* and *LC*-cooled FC is in size and weight - higher compactness and lower weight can be achieved by use of liquid (water) cooling. *AC* and *LC*(=*WC*) FCs are usually priced on the same level.

Fig.1 depicts a 250 kW low-voltage FC mounted on the wall in an enclosed area such as an electrical room.

With the efficiency of 98% the 250 kW FC will produce 5 kW of heat. To remove the heat from the FC's heatsink a quite powerful ventilation fan should be integrated into the FC enclosure. For the 250 kW power the volume of air pumped through the heatsink should be in the order of 2000-3000 m³/h. Filtering may be required if the environment is dusty or dirty. This can be a maintenance concern.

Охлаждение преобразователей

Обычно КПД низковольтного преобразователя частоты составляет 98%, что означает, что 2% всей преобразуемой энергии выделяется в виде тепла, которое необходимо отводить из замкнутого помещения. Преобразователь можно охлаждать движущимся воздухом или водой (воздушное и жидкостное охлаждение). Разница между воздушным и жидкостным охлаждением выражается в габаритах и весе преобразователя – более компактные и легкие преобразователи можно получить при применении жидкостного (водяного) охлаждения. Способ охлаждения обычно не сказывается на цене преобразователя.

На рис.1 показаны варианты охлаждения 250-киловаттного низковольтного преобразователя частоты, расположенного в замкнутом помещении типа электрощитовой.

При КПД 98% 250-киловаттный преобразователь производит 5 кВт тепла. Для отвода этого тепла с радиатора преобразователя надо встраивать в корпус преобразователя достаточно мощный вентилятор. Объем воздуха, прокачиваемой через вентилятор, должен составлять около 2000-3000 м³/час. В случае загрязненного или запыленного помещения потребуется воздушный фильтр. А для него потребуется периодическое обслуживание.

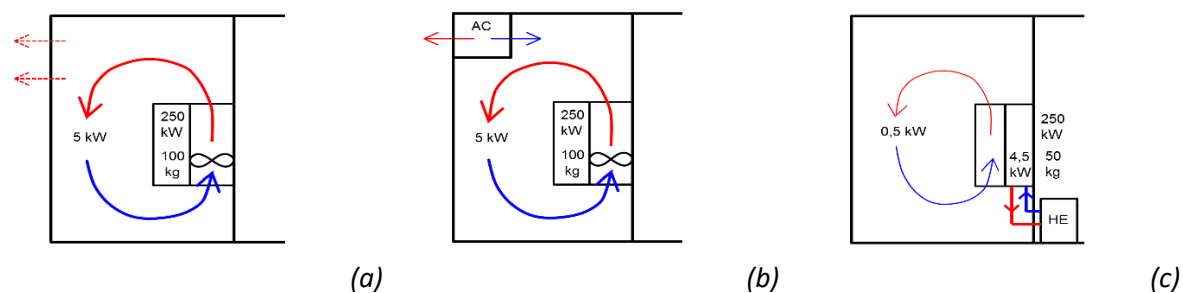


Fig.1. Cooling types.

Рис.1. Способы охлаждения.

If the produced heat is not handled (removed) in some way, eventually the temperature within the enclosed area (ambient temperature for the FC) will increase. Increasing the ambient operating temperature above the maximum design temperature of the FC will cause the FC to overheat which shortens its lifetime and will cause shutdowns. In Fig.1,a the heat is removed in a natural way, e.g. through walls, windows, doors. This is possible if the enclosed area is large (e.g. large production hall). In Fig.1,b the heat is removed with the help of air conditioning. The latter measure can be costly and/or complicated to implement.

Fig. 1,c depicts water-cooled FC with water pipes going to the neighboring room. First, the water-cooled FC is considerably smaller (half the weight of the air-cooled one). Secondly, the heat produced inside the FC due to losses is divided into two parts; 90% is removed from the heat sink by the cooling water and brought away from the enclosed area where the FC is installed, 10% are dissipated within the enclosed area. The 10% of 5 kW of heat make just 500 W, which can be easily dissipated without additional measures like air conditioning. So, the largest portion of heat is removed through the liquid and can be transferred to another media through a heat exchanger as shown in Fig.1,c.

Если каким-либо образом не отводить выделяемое тепло, температура в закрытом помещении (это температура окружающей среды для преобразователя) будет возрастать. Повышение температуры окружающей среды сверх максимального расчетного значения приведет к перегреву преобразователя частоты, что снижает срок его службы и может привести к отключению. На рис.1,а отвод тепла осуществляется естественным способом, например, через стены, окна и двери. Такой способ охлаждения можно применять, если замкнутое помещение достаточно большое, вроде большого производственного цеха. На рис.1,б тепло отводится путем кондиционирования воздуха в помещении. Этот способ может оказаться дорогим и/или сложным при практической реализации.

На рис. 1,с показано водяное охлаждение преобразователя, в котором трубы с водой уходят в соседнее помещение. Такой преобразователь с водяным охлаждением значительно меньше (вес его в половину меньше веса преобразователя с воздушным охлаждением). Тепло, выделяемое в преобразователе в виде потерь энергии, можно разделить на две части: 90% тепла отводится от радиатора охлаждающей жидкостью и уносится за пределы помещения, в котором установлен преобразователь, 10% потерь рассеивается в замкнутом помещении. 10% от 5 кВт потерь составляет всего 500 Вт, что легко рассеивается в помещении без применения дополнительных мер, типа кондиционирования воздуха. Таким образом, значительная часть тепла отводится с помощью жидкости и может передаваться другому теплоносителю через теплообменник как показано на рис.1,с.



Fig.2. Example of cabinet with LC FC.

Рис.2. Пример шкафа преобразователя частоты с водяным охлаждением.

Liquids used in the FC primary cooling loop. Typical: drinking water, demineralized or deionized water, and a water/glycol mixture for freeze protection.

Heat exchangers

If clean cooling water is not available on site, water-to-air or water-to-water heat exchanger may be used, providing clean water. Parameters of the heat exchanger such as size, weight, cost and losses need to be included in the system parameters/ performances when benchmarking alternative systems (cooling solutions). Liquid to liquid (water-to-water) heat exchangers are used when a cooling liquid is readily available. Liquid to air (water-to-air) heat exchangers are used primarily when air conditioning is not desired, or in dusty/dirty environments where air cooled VFD's can be adversely affected by these conditions (plugged heat sinks, electronics covered in dust, complicated maintenance routines. Challenges of water cooling: condensation, electrochemical corrosion (mostly related to HEX).

В качестве жидкостей, применяемых в первичном контуре охлаждения преобразователя частоты, обычно применяются питьевая вода, деминерализованная или деионизированная вода или водно-гликолевая смесь для предотвращения замерзания.

Теплообменники

Если на месте установки отсутствует чистая вода для системы охлаждения, можно применять теплообменники типа вода-воздух или вода-вода, обеспечивая чистоту воды. Параметры теплообменников, такие как размер, вес, стоимость и потери энергии, должны учитываться в общих параметрах системы при сравнении нескольких альтернативных вариантов (способов охлаждения). Теплообменники типа вода-вода применяются, когда охлаждающая жидкость легко доступна. Теплообменники типа вода-воздух изначально ставят там, где кондиционирование воздуха нежелательно или окружающая среда сильно загрязненная или запыленная и где преобразователи с воздушным охлаждением могут пострадать от этих условий окружающей среды (засорение радиаторов, покрытие грязью электроники, усложнение процедур обслуживания). Применение водяного охлаждения создает свои сложности: конденсацию влаги, электрохимическую коррозию (особенно в теплообменнике).

Other factors to consider:

- Relation between cooling and IP
- Audible noise. The large fan is the primary reason air cooled FCs are noisy. There is no large air fan in LC FC, just a very small fans to cool the electronic boards

Также надо учитывать следующие факторы:

- Связь между способом охлаждения и исполнением по способу защиты IP
- Акустический шум. Большой вентилятор является первичным источником шума преобразователя с воздушным охлаждением. В преобразователях с жидкостным охлаждением нет больших вентиляторов, только небольшие вентиляторы для охлаждения электронных плат.

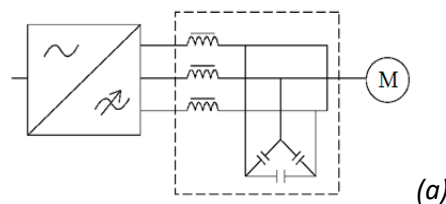
Filters

In many cases FC should be equipped with either input or output filters. Filters can help to solve various EMC issues on both grid side and machine side. However, the pay is extra size, weight, cost and losses. Some MV topologies do not require output filters. In DC it is possible to choose “choke” and “choke+RFI” for input filter and du/dt filter and sin-filter for output filter.ë

Output filters

SIN-filter

The LC filter, called the "sinus filter", "sine-filter" or "sin filter" (Fig. 1) is the most efficient filter in terms of turning the current and voltage waveforms that the FC produces into almost sinusoidal form. Fig. 2 shows an example of the effect of a sin-filter on the shape of the voltage waveform at the FC output. With the use of a sin-filter, virtually all the negative effects described in chapter [FC influence on the electric machine](#) are eliminated, since the machine is powered by voltage and current with a shape very close to sinusoidal.



(a)



(b)

Fig. 1. “Classical” sin-filter topology (a) and product example (b).

Рис.1. Схема (a) и пример исполнения (b) классического синусного фильтра.

Фильтры

Во многих случаях преобразователи частоты должны оснащаться входными или выходными фильтрами. Фильтры помогают решать различные проблемы электромагнитной совместимости как на стороне сети, так и на стороне электрической машины. Платой, однако, становится увеличение размеров, веса, стоимости и потерь энергии. Некоторые схемы преобразователей среднего напряжения не требуют выходных фильтров. В преобразователях частоты можно использовать в качестве входного фильтра обычный или радиочастотный дроссель, а в качестве выходного фильтра – du/dt фильтр или синусный фильтр.

Выходные фильтры

Синусный фильтр

LC-фильтр, называемый также синусным фильтром (рис. 1), является наиболее эффективным фильтром с точки зрения приведения формы напряжения и тока на выходе преобразователя частоты к синусоидальному виду. На рис. 2 показан пример влияния синусного фильтра на форму напряжения на выходе преобразователя частоты. Применение синусного фильтра позволяет устранить практически все негативные эффекты, описанные в главе [Влияние преобразователя частоты на электрическую машину](#), поскольку машина питается током и напряжением практически синусоидальной формы.

Sin-filters have certain drawbacks (largely due to the high inductance value of its chokes):

- The voltage drop in the filter is 3-10%, depending on the manufacturer, the nominal power (current) of the filter and the frequency of the PWM.
- Losses of 0.5-2%. The more power, the lower the relative losses in the filter.
- Displacement of the field weakening point by 1-2 Hz towards low frequencies.
- Significant reduction (up to 20% or more) of the critical moment (overload capacity) of the machine.

Also it should be noted that the sine-filter is quite an expensive device. Its cost can be up to 30-40% of the cost of the FC (at low power - up to 50-70%).

Синусные фильтры имеют определенные недостатки (в основном из-за большой индуктивности их дросселей):

- Падение напряжения на фильтре составляет 3-10% в зависимости от производителя, номинальной мощности (тока) фильтра и частоты ШИМ.
- Потери в фильтре составляют 0.5-2%. Чем больше установленная мощность, тем меньше оказывается доля потерь в фильтре.
- Точка ослабления поля в машине смещается на 1-2Гц в сторону низких частот.
- Значительно уменьшается (до 20% и более) критический момент (перегрузочная способность) машины.

Также надо отметить, что синусный фильтр является весьма дорогим устройством. Его цена может составлять до 30-40% от цены всего преобразователя частоты (в маломощных преобразователях – до 50-70%).

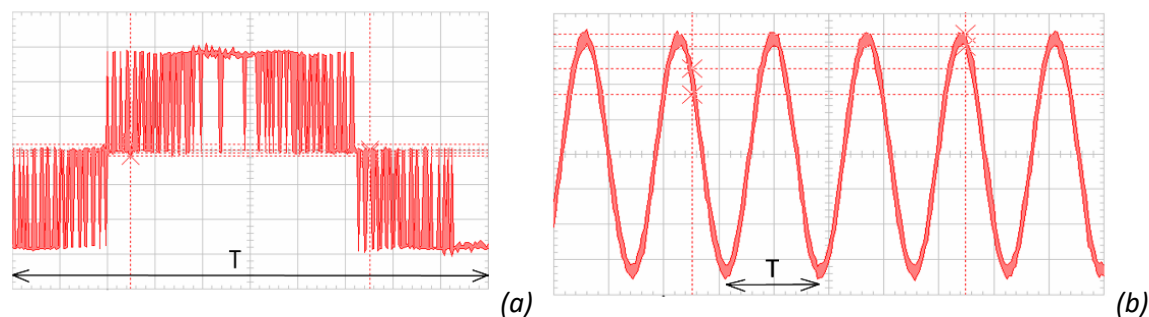


Fig. 2. The voltage waveforms at the input (a) and at the output (b) of the sin-filter. Note different time span on the oscillograms.

Рис.2. Кривые напряжения на входе (a) и на выходе (b) синусного фильтра. Обратите внимание на разный временной шаг двух графиков.

du/dt-filter

Structurally, the du/dt filter is a three-phase choke (Fig. 3,a), and from the point of view of the electric circuit theory it is a concentrated inductive resistance. The inclusion of inductance in the equivalent electrical circuit of the cable

Фильтр du/dt

Конструктивно фильтр du/dt представляет собой трехфазный дроссель (рис. 3,a), а с точки зрения теории электрических цепей – это сосредоточенное индуктивное сопротивление. Включение индуктивности в

increases the wave resistance of the cable line and brings down the reflection coefficient. Thus, the voltage peaks at terminals decreases.

However, the main purpose of du/dt -filters is to eliminate du/dt -effect, i.e. decrease in the rise time of the voltage pulse. In addition, due to the inertial properties of the inductance, the filter also reduces the voltage surge at the leading edge of the pulse (Fig.4). The length of the cable is 30 m. Note different rise time: $dt=220$ ns, $dt=820$ ns.

эквивалентную электрическую цепь кабеля повышает волновое сопротивление линии и снижает коэффициент отражения в линии. Это приводит к уменьшению пиков напряжения на зажимах машины.

Однако, основная цель применения фильтров du/dt заключается в исключении влияния переходных процессов, т.е. уменьшении времени нарастания импульса напряжения. Также, в силу инерционности процессов в индуктивности, фильтр уменьшает перенапряжения на переднем крае импульса (рис.4). Длина кабеля в примере составляет 30 м. Обратите внимание на разницу в длительности нарастания напряжения: $dt=220$ нс, $dt=820$ нс.

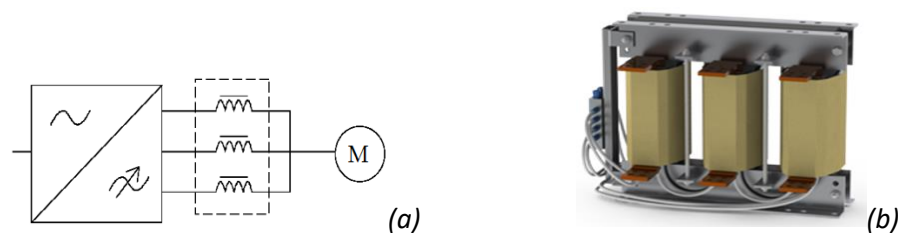


Fig. 3. "Classical" du/dt -filter topology (a) and product example (b).
Рис.3. Схема (a) и пример исполнения (b) классического фильтра du/dt .

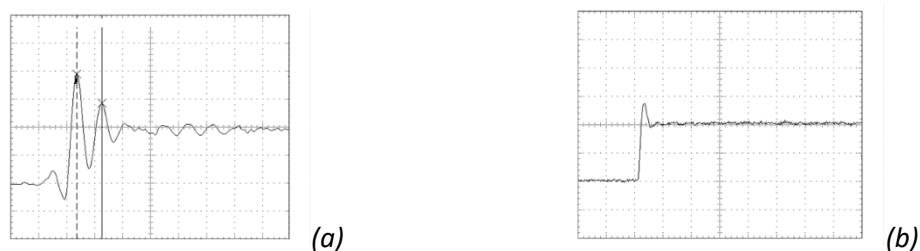


Fig. 4. Voltage pulses at the machine terminals without du/dt -filter (a) and with a filter (b).
Рис.4. Импульсы напряжения на зажимах машины в случае без фильтра (a) и с фильтром du/dt (b).

Common recommendations on the use of du/dt-filters and other measures

To reduce the overvoltages, du/dt-effect and bearing currents, a whole complex of measures is often applied, including both recommendations to machine manufacturers, and the use of various filters, special cables, etc. The measures depend in particular on the voltage level of the mains and on the power (size) of the machine. Different drive manufacturers can offer different measures. One example is presented in the table:

	< 100 kW	>= 100 kW	>= 350 kW
Ur<=500 V	Standard machine	Standard machine + isolated N-bearing	Standard machine + isolated N-bearing + ferrite rings
Ur<=600 V	(Standard machine + du/dt-filter) or Reinforced insulation	(Standard machine + du/dt-filter) or (Reinforced insulation + isolated N-bearing)	(Standard machine + isolated N-bearing + du/dt-filter + 1 ferrite ring) or (Reinforced insulation + isolated N-bearing + ferrite rings)
Ur<=690 V	Reinforced insulation + du/dt-filter	Reinforced insulation + du/dt-filter	Reinforced insulation + isolated N-bearing + du/dt-filter + 1 ferrite ring

Общие рекомендации по использованию фильтров du/dt и другие соображения

Для снижения перенапряжений, уменьшения переходных процессов и подшипниковых токов часто применяют целый комплекс мер, включающих рекомендации производителям электрических машин, использование различных фильтров, выбор специальных кабелей и т.д. Эти меры зависят, в частности, от уровня напряжения в сети и от мощности (габаритов) машины. Различные производители приводов рекомендуют различные меры. Один из примеров приведен в таблице:

	< 100 кВт	>= 100 кВт	>= 350 кВт
Ur<=500 В	стандартная машина	стандартная машина + изолированный N-образный подшипник	стандартная машина + изолированный N-образный подшипник + ферритовые кольца
Ur<=600 В	(стандартная машина + фильтр du/dt) или усиленная изоляция	(стандартная машина + фильтр du/dt) или (усиленная изоляция + изолированный N-образный подшипник)	(стандартная машина + изолированный N-образный подшипник + фильтр du/dt + 1 ферритовое кольцо) или (усиленная изоляция + изолированный N-образный подшипник + ферритовые кольца)
Ur<=690 В	усиленная изоляция + фильтр du/dt	усиленная изоляция + фильтр du/dt	усиленная изоляция + изолированный N-образный подшипник + фильтр du/dt + 1 ферритовое кольцо

Grid filters

Chokes

Influence of presence of the choke and its size on the harmonics injected into the grid is presented in Fig.5 and 6. The graphs show current waveform and the value of current distortion THD(i) as % of nominal current at full load.

Сетевые фильтры

Дроссели

На рис. 5 и 6 показано влияние дросселя и его величины на гармоники, попадающие в сеть из-за работы выпрямителя. На графиках показана форма тока и величина коэффициента гармонических искажений по току THD(i) в % от номинального тока при полной нагрузке.

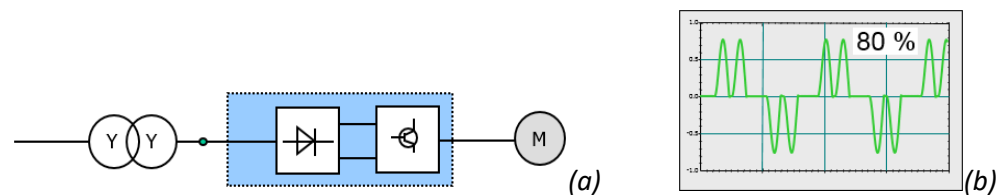


Fig. 5. 6-pulse rectifier without any choke (a) and current waveform for this topology (b).
Рис.5. 6-пульсный выпрямитель без дросселя (a) и форма тока для этой схемы (b).

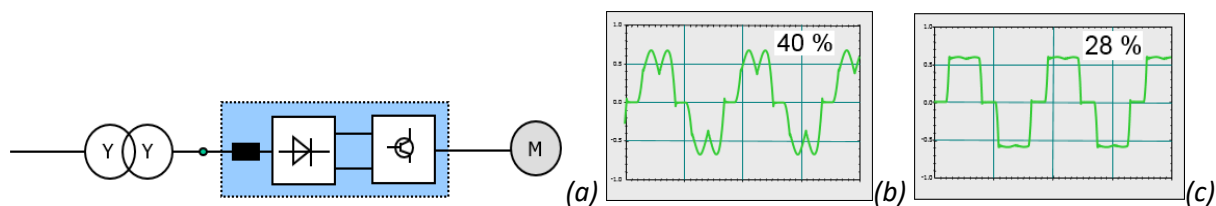


Fig. 6. 6-pulse rectifier with a choke (a) and current waveforms for small choke (b) and big choke (c).
Рис.6. 6-пульсный выпрямитель с дросселем (a) и формы тока для маленького дросселя (b) и большого дросселя (c).

LCL filter

FC with LCL filter between FC and the grid is presented in Fig.7,a. Current waveform is very close to sinusoidal as can be seen in Fig. 7,b.

EMC filters

EMC filters (Fig.8) is destined for emission reduction in MHz range. Example of the effect is presented in Fig.9.

LCL фильтр

Преобразователь частоты с LCL фильтром, включенным между преобразователем и сетью, показан на рис.7,а. Форма тока близка к синусоиде, что показано на рис. 7,b.

Фильтры электромагнитных помех (EMC)

Фильтры электромагнитных помех (рис.8) предназначены для снижения излучения в диапазоне МГц. Пример его работы показан на рис.9.

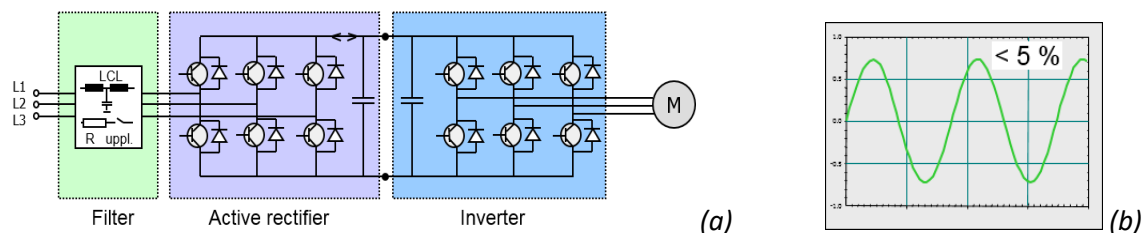


Fig. 7. Topology (a) and current waveform (b).

Рис.7. Схема (a) и форма тока (b).

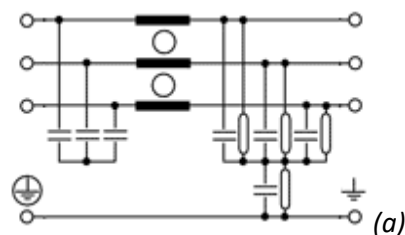


Fig. 8. EMC filters: topology (a), AC side filter product example (b).

Рис.8. Фильтры электромагнитных помех: схема (a), пример фильтра для стороны переменного тока (b).

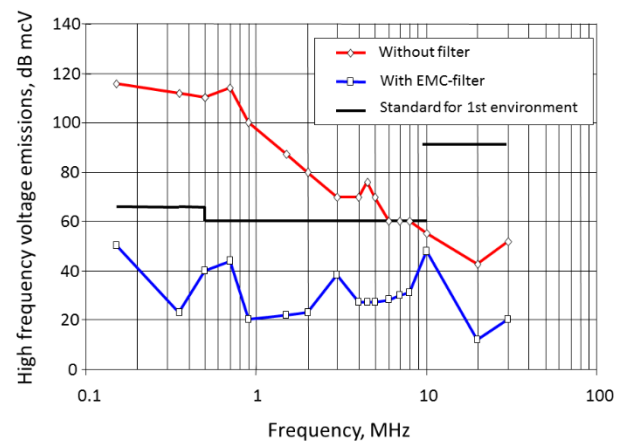


Fig. 9. Effect of use of EMC-filter.

Рис.9. Результат использования фильтра электромагнитных помех.

Transformers

ABB claims that only small frequency converters (FC) can be connected to an LV network without a transformer due to harmonics and EMC requirements. The different FC types are quite diverse in the amount of produced harmonics and so are the networks in their sensitivity. The decision whether to use an individual supply transformer or not must be made case by case.

The supply transformer placed between the grid and the FC covers several different tasks:

- Galvanic isolation between the frequency converter and the feeding network.
- Voltage reduction from the feeding MV or HV network to the FC input level.
- Suppression of harmonics generated by the frequency converter, thus protecting the feeding network from harmonic contamination.
- Protection of ambient and the feeding network against radio-frequency interference produced by the rapidly commutating semiconductors.

Harmonic frequencies increase the mechanical and dielectrical stresses and therefore the supply transformers must be specially designed for this duty.

Key parameters of transformers are [power, voltages and transformation ratio](#).

There exist many [kinds](#) of transformers used with variable speed drives.

Трансформаторы

ABB утверждает, что только маломощные преобразователи частоты могут быть подключены к низковольтной сети напрямую без трансформатора, остальных ограничивают возможные гармонические искажения и требования электромагнитной совместимости. Различные преобразователи отличаются друг от друга по создаваемому спектру гармоник, а сети различаются по чувствительности к гармоническим искажениям. Так что решение о необходимости использования питающего трансформатора должно приниматься отдельно в каждом конкретном случае.

Питающий трансформатор, включаемый между сетью и преобразователем частоты, выполняет несколько функций:

- Гальваническая развязка между преобразователем частоты и питающей сетью.
- Понижение напряжения сети среднего или высокого напряжения до уровня напряжения преобразователя.
- Подавление гармоник, создаваемых преобразователем частоты для защиты сети от гармонического загрязнения.
- Защита окружающей среды и питающей сети от радиочастотного воздействия, создаваемого быстро переключаемыми полупроводниками преобразователя.

Высшие гармоники увеличивают механические и диэлектрические нагрузки, поэтому питающие трансформаторы должны иметь специальные конструкции.

Основными параметрами трансформаторов являются [мощность, напряжения и коэффициент трансформации](#). Существует много [типов](#) трансформаторов, применяемых в регулируемом электроприводе.



Fig.1. Transformer.

Рис.1. Трансформатор.

Power, voltages and transformation ratio

Rated power

For transformer ratings under 10 MVA, IEC 60076-1 suggest preferred values based on the R10 series: 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, and multiples of 10n. For example, the preferred transformer sizes from 500 kVA to 4000 kVA are: 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000.

Voltages at higher voltage (HV) side and lower voltage (LV) side

ABB claims that the VSD supply transformer is usually fed by a medium voltage network, but sometimes the transformer primary voltage may be at the LV level. Feeding from an HV network is also possible but rare. The input voltages in MV drives are from 1 kV to 36 kV. The input voltages in LV drives are usually between 380 V and 900 V, depending on the drive type".

In *DriveConstructor* it is possible to choose not exact values but ranges of values.

Мощность, напряжения и коэффициент трансформации

Номинальная мощность

Для трансформаторов мощностью до 10 МВА стандарт IEC 60076-1 предлагает следующие значения на основе серии R10: 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, и кратные 10. Например, предпочтительные мощности в диапазоне от 500 кВА до 4000 кВА: 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000.

Напряжения на стороне высокого напряжения (ВН) и низкого напряжения (НН)

ABB утверждает, что питающие трансформаторы регулируемого электропривода обычно подключены к сети среднего напряжения, но иногда первичное напряжение трансформатора может быть на уровне низкого напряжения. Питание от сетей высокого напряжения тоже возможно, но такое случается реже. Входные напряжения приводов среднего напряжения лежат в диапазоне от 1 кВ до 36 кВ. Входные напряжения сетей низкого напряжения лежат в диапазоне от 380В до 900В

Voltage (HV)

The ranges can be chosen from the following: 2200-2500, 2500-2800, 2800-3200, 3200-3400, 3400-4100, 4100-4300, 4300-5800, 5800-6800, 6800-9000, 9000-12000 V. Choose range which fits grid voltage. Default setting is «any».

Voltage (LV)

The ranges can be chosen from the following: 380-440, 650-700, 2400-2500, 2900-3100, 3200-3400, 4100-4200, 5900-6700 V. Choose range which fits FC voltage. Default setting is «any».

Transformation ratio

In *DriveConstructor* the ratio is defined by the ranges chosen for the grid side (MaxHV-MinHV) and FC side (MaxLV-MinLV) and the additional adjustments made manually (see the software). The range of ratios is:

- minimum ratio is calculated as $\text{MaxHV}/\text{MinLV}$,
- maximum ratio is calculated as $\text{MinHV}/\text{MaxLV}$.

Then the ratio can be "manually" adjusted within the range between minimum and maximum values.

в зависимости от типа привода.

В программе *DriveConstructor* можно выбирать не конкретное значение, но диапазон напряжений.

Напряжение на стороне ВН

Пользователь может выбирать следующие диапазоны напряжений: 2200-2500, 2500-2800, 2800-3200, 3200-3400, 3400-4100, 4100-4300, 4300-5800, 5800-6800, 6800-9000, 9000-12000 В. Следует выбирать диапазон, соответствующий напряжению сети. По умолчанию стоит значение «любой».

Напряжение на стороне НН

Пользователь может выбирать следующие диапазоны напряжений: 380-440, 650-700, 2400-2500, 2900-3100, 3200-3400, 4100-4200, 5900-6700 В. Следует выбирать диапазон, соответствующий напряжению преобразователя частоты. По умолчанию стоит «любой».

Коэффициент трансформации

В программе *DriveConstructor* коэффициент трансформации определяется выбранными диапазонами напряжений на стороне сети (MaxHV-MinHV) и на стороне преобразователя (MaxLV-MinLV), а также можно регулировать его вручную (см. программу). Диапазон коэффициентов трансформации определяется так:

- минимальный коэффициент трансформации рассчитывается как $\text{MaxHV}/\text{MinLV}$,
- максимальный коэффициент трансформации рассчитывается как $\text{MinHV}/\text{MaxLV}$.

После этого коэффициент трансформации может быть скорректирован вручную в диапазоне от минимального до максимального значения.

Types of transformers

Dry or liquid-filled

Basically, there are two distinct types of transformers: Liquid insulated and cooled (liquid-filled type) and non-liquid insulated, air or air/gas cooled (dry type) - see Fig. 1 and 2. Also, there are subcategories of each main type.

Liquid-filled transformers (also called oil-immersed) are normally more efficient than dry-types, and they usually have a longer life expectancy. Also, liquid is a more efficient cooling medium in reducing hot spot temperatures in the coils. In addition, liquid-filled units have a better overload capability. There are some drawbacks, however. For example, fire prevention is more important with liquid-type units because of the use of a liquid cooling medium that may catch fire. (Dry-type transformers can catch fire, too.) It's even possible for an improperly protected wet-type transformer to explode. And, depending on the application, liquid-filled transformers may require a containment trough for protection against possible leaks of the fluid.



Fig.1. Dry.

Рис.1. Сухой трансформатор.

Типы трансформаторов

Сухой или масляный трансформатор

В принципе различают два основных типа трансформатора: с жидкостной изоляцией и охлаждением (масляные) и с безжидкостной изоляцией и воздушным или воздушно-газовым охлаждением (сухие) – см. рис. 1 и 2. Существуют также и подвиды трансформаторов.

Трансформаторы, заполненные жидким диэлектриком (также называемые масляными трансформаторами) обычно более эффективны, чем сухие трансформаторы и имеют больший срок службы. Также жидкость является более эффективным хладагентом, снижая температуры наиболее нагретых частей обмоток. Вдобавок, маслonaполненные установки имеют лучшую перегрузочную способность. Однако, есть и недостатки. Например, противопожарные меры оказываются более важны для маслonaполненных установок, поскольку жидкий хладагент является пожароопасным. (Сухие трансформаторы тоже могут гореть.) Существует даже возможность взрыва масляного трансформатора. Также, в зависимости от применений, масляные трансформаторы могут потребовать обустройства защитного желоба для защиты от возможных протечек.



Fig.2. Oil.

Рис.2. Масляный трансформатор.

Arguably, when choosing transformers, the changeover point between dry-types and wet-types is between 500 kVA to about 2.5 MVA, with dry-types used for the lower ratings and wet-types for the higher ratings.

Important factors when choosing what type to use include where the transformer will be installed, such as inside an office building or outside, servicing an industrial load.

Dry-type transformers with ratings exceeding 5 MVA are available, but the vast majority of the higher-capacity transformers are liquid-filled. For outdoor applications, wet-type transformers are the predominate choice.

Считается, что при выборе типа трансформатора переход от сухих к масляным трансформаторам происходит в диапазоне мощностей от 500 кВА до 2.5 МВА при том, что сухие трансформаторы используются при малых мощностях, а масляные – при больших.

Важными факторами, влияющими на выбор типа трансформатора, являются место его предполагаемой установки (внутри здания или снаружи) и предназначение (вспомогательный или промышленный трансформатор).

Существуют и сухие трансформаторы мощностью свыше 5 МВА, но абсолютное большинство мощных трансформаторов является масляными. Для наружной установки практически всегда применяются масляные трансформаторы.

Windings

Ordinary transformers have two windings; one primary and one secondary. However, there exist three- or four-winding transformers. ABB says²: “The rectifiers used in low voltage VSDs are usually both 6-pulse or 12-pulse rectifiers, and they may be diode bridges, thyristor bridges or power transistor solutions. The 6-pulse rectifier is supplied by a two-winding transformer and the 12-pulse rectifier needs a three-winding transformer, having two separate secondary windings with 30° phase shift.”

Special converters requiring multiple inputs call for multi-winding transformers like the one in Fig.3.

In *DriveConstructor* there are the following options: «2-winding», «3-winding», «multi-winding».

Обмотки

Обычные трансформаторы имеют две обмотки: одну первичную и одну вторичную. Однако, существуют также трех- и четырех-обмоточные трансформаторы. По сведениям АBB² “Выпрямители, предназначенные для низковольтных регулируемых приводов, используют обычно 6-ти или 12-ти пульсные схемы и могут быть построены на диодных мостах, тиристорных мостах или силовых транзисторах. 6-пульсный выпрямитель получает питание от двухобмоточного трансформатора, а 12-пульсному выпрямителю требуется трехобмоточный трансформатор, имеющий две отдельные вторичные обмотки, смещенные по фазе на 30°.”

Специальные преобразователи с несколькими входами требуют применения многообмоточных трансформаторов вроде того, что показана на рис.3.

В программе *DriveConstructor* можно выбирать из следующих вариантов: «2-обмоточный», «3-обмоточный», «многообмоточный».



Fig.3. Transformer for SCHB converters.

Рис.3. Трансформатор для многоуровневого преобразователя по схеме SCHB.

Cooling type

Where the dissipation of heat is an important factor, the possibility to cool the electrical apparatus with water allows better management with the cooling system.

Integrated or stand-alone

Transformer can be integrated with the frequency converter or be mechanically separated, the latter variant called "stand-alone". Integrated designs are not common. Integration means usually sharing cooling system (heat exchanger, cooling ducts, water piping).

More information can be found [here](#).



Fig.4. Water-cooled transformer.

Рис.4. Трансформатор с водяным охлаждением.

Способ охлаждения

В случае, когда отвод тепла оказывается важным фактором, возможность выбора установок с водяным охлаждением улучшает использование системы охлаждения.

Интегрированный или автономный

Трансформатор может быть интегрирован в преобразователь частоты или быть выполнен механически независимо, последний вариант называется автономным трансформатором. Интегрированные варианты применяются редко. Обычно интеграция подразумевает совместное использование системы охлаждения (теплообменник, охлаждающие каналы, трубопроводы).

Больше информации можно найти [здесь](#).



Fig.5. Non-integrated transformer.

Рис.5. Неинтегрированный трансформатор.

Gearboxes

A gearbox uses combinations of cogwheels to provide speed and torque conversions from a rotating power source to another device. Each gearbox is characterized by *gear ratio* which is defined as the input speed relative to the output speed. Gear ratio can be related to one stage in the gearbox or to the whole gearbox if the latter consists of more than one stage. Overall gear ratio is a product of ratios of all stages. Also overall efficiency is a product of efficiencies of all stages.

In *DriveConstructor* gearbox can have maximum three stages. However, in the real world some gearboxes may have more than three stages.

When choosing a gearbox the designer should remember service factors, take account of the number of starts, impact loading and the like. Typical procedure of gearbox selection includes the following steps:

1. Choose gear type
2. Choose transmission ratio («gear ratio»)
3. Determine the nominal power rating of the gear unit
4. Check for maximum torque, e.g. peak operating, starting or braking torque
5. Check additional forces
6. Check thermal capacity (derating due to ambient temperature)
7. Check mounting (all parts to be lubricated should be lying in the oil or be splash-lubricated)

In *DriveConstructor* this procedure is present in a simplified version.

Редукторы

Редуктор использует комбинацию зубчатых колес для преобразования и передачи скорости и момента от вращающегося источника механической мощности к другому устройству. Каждый редуктор характеризуется *передаточным числом*, которое определяют как отношение входной скорости к выходной. Передаточное число может относиться к одной ступени редуктора или ко всему редуктору, если редуктор имеет несколько ступеней. Общее передаточное число редуктора равно произведению передаточных чисел его ступеней. Также общий КПД редуктора является произведением КПД отдельных ступеней.

В программе *DriveConstructor* редуктор может иметь до трех ступеней. Однако на практике встречаются редукторы и большим числом ступеней.

При выборе редуктора следует учитывать коэффициент использования, число пусков, наличие ударной нагрузки и т.д. Типичная процедура выбора редуктора содержит следующие шаги:

1. Выбрать тип редуктора.
2. Выбрать передаточное отношение («передаточное число»).
3. Определить номинальную мощность редуктора.
4. Проверить максимальный момент, т.е. наибольший момент при работе, пуске или торможении.
5. Проверить дополнительные усилия.
6. Проверить температурные условия (снижение мощности в зависимости от температуры окружающей среды).
7. Проверить условия установки (все части, требующие смазки, должны располагаться в масле или иметь смазку разбрызгиванием)

В программе *DriveConstructor* эта процедура представлена в упрощенном виде.



Fig.1. 1-stage helical gearbox.

Рис.1. 1-ступенчатый косозубый редуктор.

Stage types

Stages may be of different types as is presented below. In one gearbox there can be combined stages of different types.

Helical

Helical stage is presented in Fig.1. Gear ratios for helical gear stage can be in the range of 1,5...10. In *DriveConstructor* we narrow the possibility to choose from to 3...8. Efficiency of helical gear is high – usually between 97 and 98%. In *DriveConstructor* we assume rated efficiency of 98%. This type of gear is cheap to manufacture and has good torque and noise properties, though it is generally expensive and requires many gear stages for large reductions.

Типы ступеней

Ступени редуктора бывают разных типов, описанных ниже. В каждом редукторе могут применяться ступени разных типов.

Косозубая передача

Косозубая передача показана на рис.1. Передаточное число косозубой передачи может лежать в диапазоне от 1,5 до 10. В программе *DriveConstructor* этот диапазон сужен до 3...8. КПД косозубой передачи велик – обычно от 97 до 98%. В программе *DriveConstructor* принято номинальное КПД 98%. Этот тип передачи дешев в производстве, имеет хорошие свойства по моменту и шумам, но в целом такой редуктор получается дорогим и требует нескольких ступеней для получения больших передаточных чисел.



Fig.1. Helical stage.

Рис.1. Косозубая передача.



Fig.2. Worm gear.

Рис.2. Червячная передача.

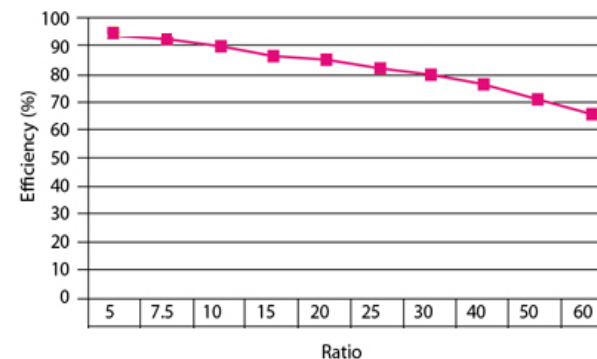


Fig.3. Efficiency of worm gear for different ratios.

Рис.3. КПД червячной передачи для различных передаточных чисел.

Worm gear

Worm stage is presented in Fig.2. Gear ratios for worm stage can be from 5 and up extremely high ratios (100!). In *DriveConstructor* we narrow the possible to choose from to 10...40. Efficiency of worm gears goes down with the increase of the ratio (Fig.3). The possibility to have very high transmission ratios translates into greater cost-effectiveness. Also, worm gears typically ensure quiet, vibration-free operation. They are inherently a right-angle drive. Their typically low efficiency suggests their use for low or middle-to-low power demand applications and/or those featuring intermittent duty. They can be ideal for applications that need to resist reversing.

Червячная передача

Червячная передача показана на рис.2. Передаточное число червячной передачи начинается с 5 и может достигать очень больших значений (100!). В программе *DriveConstructor* этот диапазон сужен до 10...40. КПД червячной передачи снижается с увеличением передаточного числа (рис.3). Возможность получения больших передаточных чисел обеспечивает большую экономическую эффективность таким передачам. Также червячная передача считается тихой, не создающей вибраций. При этом входная и выходная оси передачи расположены по прямым углом. Обычно небольшой КПД червячной передачи предполагает ее использование в маломощных установках или в случае прерывистой нагрузки. Червячные передачи могут быть идеальным решением в случаях, когда требуется предотвращать реверсирование.

Planetary gear

Planetary stage is presented in Fig.4. Gear ratios for planetary stage can be in the range of 3...10. In *DriveConstructor* we narrow the possibility to choose from to 4...8. Planetary gears can handle large reductions and give huge torque capability. They have high efficiency and are very compact. At the same time such gears are expensive to manufacture and can be noisy at high speeds.

Bevel gear

Bevel stage is presented in Fig.5. Gear ratios for bevel stage can be in the range of 1,5...4. In *DriveConstructor* we limit the choice to 2...3.



Fig.4. Planetary stage.
Рис.4. Планетарная передача.

Планетарная передача

Планетарная передача представлена на рис.4. Передаточное число планетарной передачи может лежать в диапазоне от 3 до 10. В программе *DriveConstructor* этот диапазон сужен до 4...8. Планетарные передачи могут обеспечивать большие изменения скорости и передавать большой момент. Они имеют высокий КПД и очень компактны. В то же время планетарные передачи дороги в производстве и могут быть весьма шумными на высоких скоростях.

Коническая передача

Коническая передача представлена на рис.5. Передаточное число конической передачи может лежать в диапазоне от 1,5 до 4. В программе *DriveConstructor* этот диапазон сужен до 2...3.



Fig.5. Bevel stage.
Рис.5. Коническая передача.

Combinations of stages

The stages can be put together in various combinations. Some examples are presented below.

Gearboxes comprising several helical stages (Fig.1) are used generally in heavy-duty applications. They are quite efficient and can have many stages.

In the configuration presented in Fig.2 the input and output shafts are arranged at right angles via a gear set with either intersecting (bevel helical) or non-intersecting (hypoid) axes. The right-angle helical design ensures great space efficiency in terms of width, and provides the primary alternative to worm reducers in applications involving right angle drives. They are characterized by high efficiency and can extend to extremely high reduction ratios (even to 1700:1).



Fig.1. 3 helical stages.
Рис.1. Косозубые ступени.

Комбинации ступеней

Ступени редуктора могут быть собраны в различных комбинациях. Некоторые примеры показаны ниже.

Редукторы с несколькими косозубыми ступенями (рис.1) используются обычно для тяжелых режимов применения. Они весьма эффективны и могут иметь много ступеней.

В конфигурации, представленной на рис.2, входной и выходной валы расположены под прямым углом и соединены через несколько пересекающихся осей (конические, косозубые) или непересекающихся осей (гипоидные). Конструкция косозубой передачи с перпендикулярными осями обеспечивает эффективное использование пространства с точки зрения ширины привода и является первой альтернативой червячным передачам в приводах с перпендикулярными осями. Они характеризуются большой эффективностью и могут обеспечивать очень большие передаточные числа (даже до 1700:1).

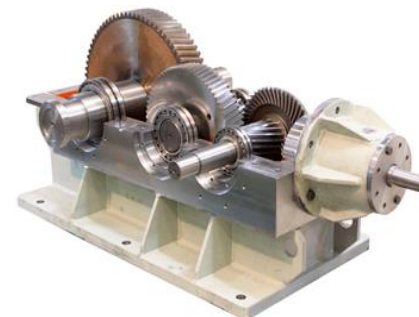


Fig.2. 1 bevel and 2 helical stages.
Рис.2. 1 коническая и 2 косозубые ступени.

Other examples are presented at Fig. 3-5.

Другие примеры показаны на рис. 3-5.

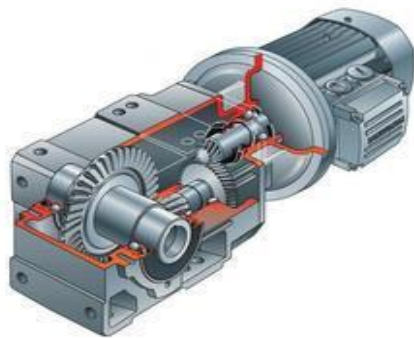


Fig.3. Helical and bevel stages.

Рис.3. Косозубая и коническая ступени.

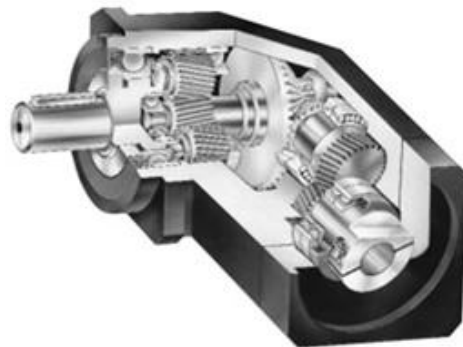


Fig.4. Helical, bevel and planetary stages.

Рис.4. Косозубая, коническая и планетарная ступени.



Fig.5. Helical "inline".

Рис.5. Косозубая соосная передача.

Efficiency of any combination is the product of efficiencies of the stages, therefore, efficiency of several stages is lower than single-stage solution. Fig.6 presents efficiencies of some combinations of stages. Note that lower rpm means higher gear ratio.

КПД любой комбинации ступеней равно произведению КПД этих ступеней, следовательно КПД редуктора с несколькими ступенями всегда ниже, чем у редуктора с одной ступенью. На рис.6 представлены КПД некоторых комбинаций ступеней. Здесь меньшее значение частоты вращения означает большее передаточное число.

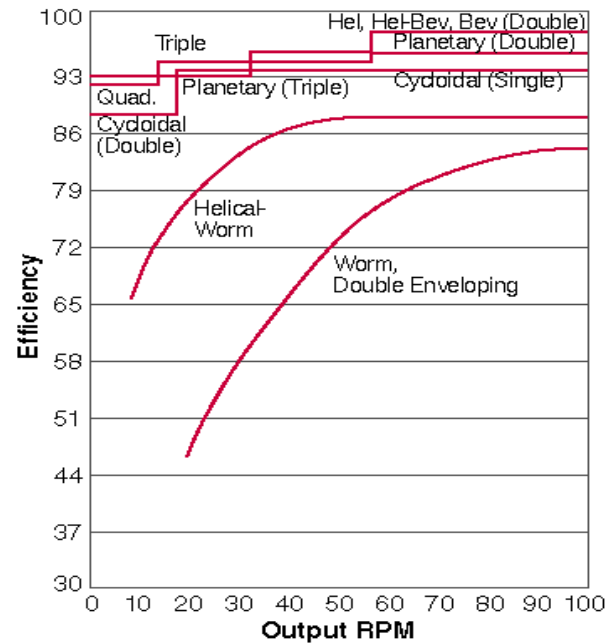


Fig.6. Efficiencies of various combinations.
Рис.6. КПД различных комбинаций ступеней.

Power cables

Cable parameters

Voltage

In *DriveConstructor* voltage rating of a cable is being chosen automatically according to the voltage at the electric machine terminals.

Length

We limit the possible cable length to 5 km, so the range to choose from is 0 to 5000 m.

Cable cross-section

Cables are produced with standard cross-sections of their phase conductors. We can choose from the row: 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2.5, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630, 800 and 1000 mm^2 .

Conductor material

In *DriveConstructor*, as well as in the real life, the choice should be made between copper and aluminum cable. Some arguments are presented below.

Силовые кабели

Параметры кабелей

Напряжение

В программе *DriveConstructor* номинальное напряжение кабелей выбирается автоматически в соответствии с напряжением на зажимах электрической машины.

Длина

Возможная длина кабеля ограничена 5 км, поэтому данное значение можно выбирать в диапазоне от 0 до 5000 м.

Сечение кабеля

Кабели выпускаются со стандартными сечениями фазных проводников. Значения можно выбирать из ряда: 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2.5, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630, 800 и 1000 mm^2 .

Материал проводника

В программе *DriveConstructor*, как и в реальной жизни, можно выбирать между медью и алюминием. Некоторые соображения по выбору материала кабеля представлены ниже.



Fig.1. Medium voltage cables.

Рис.1. Кабели среднего напряжения.

Considering weight and size

For the same conductivity the weight of an aluminum cable will be only 54% of the weight of a copper cable, but the cross-section of the aluminum cable will be higher than that of the copper cable by 56%. So the choice will be a greater cable cross-section or a higher cable weight. Copper cable is thinner but heavier.

Considering cost

Generally speaking, aluminum cable will be cheaper. However, copper cable is more ductile and less susceptible to electrical contact problems. Due to its smaller cross-section, the copper cable will also be easier to install as the stiffness of the cable depends on the square of the cross-sectional area and thus on the fourth power of the diameter. So one should take into account the extra cost and effort involved in installing the less pliable aluminum cables.

Number of runs

The surface of the cable increases not proportionally (actually slower) with increase of the cable's cross-section, therefore, for a thicker cable heat dissipation is less intensive and the current density should be decreased compared to thinner ones. So, in some cases it may be more economical to have two or more parallel thin cables (two or more "runs") with higher current densities than one big cable with lower current density. In *DriveConstructor* it is possible to choose number of runs from the following options: «auto», 1, 2, 4. When "auto" is chosen, *DriveConstructor* will calculate optimal number of runs automatically.

С точки зрения веса и размера

При той же проводимости вес алюминиевого кабеля составляет лишь 54% от веса медного кабеля, но его сечение будет больше на 56%. Так что выбирать надо из большего сечения или большего веса кабеля. Медный кабель тоньше, но тяжелее.

С точки зрения стоимости

Вообще говоря, алюминиевые кабели дешевле. Однако, медный кабель более гибкий и менее подвержен проблемам с электрическими контактами. Благодаря меньшему сечению медный кабель легче устанавливать, поскольку жесткость кабеля зависит от квадрата его сечения, т.е. четвертой степени диаметра. Так что надо принимать во внимание дополнительные стоимость и усилия по установке менее гибких алюминиевых кабелей.

Число параллельных линий

Поверхность кабеля возрастает не пропорционально (медленнее) увеличению сечения кабеля, следовательно, в более толстом кабеле отвод тепла ухудшается и плотность тока должна быть снижена по сравнению с более тонким. Так что, в некоторых случаях может быть более экономичным использовать два или более параллельных тонких кабеля (две или более параллельных линии) с большей плотностью тока, чем один большой кабель с меньшей плотностью тока. В программе *DriveConstructor* можно выбирать число параллельных линий из следующих вариантов: «авто», 1, 2, 4. При выборе "авто" *DriveConstructor* рассчитает оптимальное число параллельных линий автоматически.

Grid

Grid parameters

Voltage

Grid voltage [V] can be chosen from the given options.

Frequency

In the current version of *DriveConstructor* only 50 Hz is possible.

Short-circuit power

Short-circuit power [MVA] can be chosen from the given range. It represents “strength” of the grid. Short-circuit power is used in THD estimation.

Сеть

Параметры сети

Напряжение

Напряжение сети [В] можно выбирать из предлагаемых вариантов.

Частота

В текущей версии программы *DriveConstructor* можно выбрать только частоту 50 Гц.

Мощность короткого замыкания

Мощность короткого замыкания [МВА] можно выбрать из заданного диапазона. Она характеризует устойчивость сети. Мощность короткого замыкания используется при оценке коэффициента гармонических искажений.

Altitude and derating

When equipment is expected to work at high altitudes de-rating factors should be applied when choosing rating of the components. At high altitudes, where there is a reduced atmospheric pressure, the cooling of electrical equipment is degraded due to reduced ability of the air to remove the heat from the cooling surfaces of the machine or transformer or heat-sink of the converter. Different equipment providers give slightly different derating factors. One possible collection of factors is presented in tables 1 and 2. In *DriveConstructor* derating is done automatically when the user sets the right altitude for the components.

Power derating

The coefficient of power derating with altitude k_h is defined as permissible power output in % of rated power.

Влияние высоты установки над уровнем моря

В случае установки оборудования на больших высотах необходимо учитывать снижение мощности при выборе его компонентов. На больших высотах из-за низкого атмосферного давления охлаждение электрического оборудования ухудшается за счет снижения способности разреженного воздуха отводить тепло от охлаждающих поверхностей электрической машины, трансформатора или от радиатора преобразователя частоты. Различные производители оборудования дают несколько различающиеся рекомендации по снижению мощности оборудования. Таблицы 1 и 2 содержат набор таких коэффициентов. В программе *DriveConstructor* снижение мощности производится автоматически при задании пользователем правильной высоты над уровнем моря.

Снижение мощности

Коэффициент снижения мощности с высотой k_h представляет собой допустимую выходную мощность в % от номинальной мощности.

Table 1. Power derating k_h as function of altitude.

Таблица 1. Коэффициент снижения мощности k_h в зависимости от высоты над уровнем моря.

Altitude Высота	Electric machine & Transformer Мощность электрической машины и трансформатора	Frequency converter Мощность преобразователя частоты	Cable Мощность кабеля
1000 m	100%	100%	100%
2000 m	92%	90%	99%
3000 m	84%	85%	96%
4000 m	76%	81%	90%

When the component needs to be de-rated for both temperature and altitude, the de-rating factors given in the respective tables should be multiplied together. When a component, like liquid-cooled FC, has both air- and water-cooled parts, derating should be calculated for both parts of the respective ambient- and coolant temperatures. In addition derating for altitude (if needed) should be implemented. Smallest of the products k_h*k_a and k_h*k_w should be taken as the overall overload.

Temperature of the coolant may help to solve the high-altitude problem for liquid-cooled equipment - it is possible to compensate high altitude with lower temperature of the coolant.

Voltage derating

The coefficient of voltage derating with altitude k_v is defined as permissible voltage in % of rated voltage.

As the cable between the machine and the converter can be long (in special cases up to several km) the altitude can be quite different for the machine and the converter.

В случае, когда мощность компонентов системы должна быть снижена по причине как температуры окружающей среды, так и высоты на д уровнем моря, коэффициенты снижения мощности, взятые из соответствующих таблиц, должны перемножаться. В случае, когда компонент системы, например, преобразователь с жидкостным охлаждением имеет части с воздушным и с жидкостным охлаждением, коэффициенты снижения мощности должны быть рассчитаны для обеих частей на основании температуры окружающей среды и температуры охлаждающей жидкости. Дополнительно (при необходимости) надо учесть снижение мощности из-за высоты. Окончательно применяют наименьшее произведение коэффициентов k_h*k_a и k_h*k_w .

Температура охлаждающей жидкости может помочь решить проблему большой высоты над уровнем моря для оборудования с жидкостным охлаждением – возможно компенсировать снижение мощности из-за высоты снижением температуры охлаждающей жидкости.

Снижение напряжения

Коэффициент снижения напряжения из-за высоты над уровнем моря k_v представляет собой допустимое напряжение в % от номинального напряжения.

Поскольку длина кабеля между машиной и преобразователем может быть велика (в некоторых случаях до нескольких километров), высота над уровнем моря может оказаться различной для разных компонентов системы.

*Table 2. Voltage derating k_v as function of altitude.**Таблица 2. Коэффициент снижения напряжения k_v в зависимости от высоты над уровнем моря.*

Altitude <i>Высота над уровнем моря</i>	Electric machine & Transformer <i>Напряжение электрической машины и трансформатора</i>	Frequency converter <i>Напряжение преобразователя частоты</i>
1000 m	100%	100%
2000 m	90%	100%
3000 m	80%	88%
4000 m	72%	76%

Ambient and coolant temperatures

When the component is expected to work at high ambient temperatures derating factors should be applied when choosing rating of the machine. Different equipment providers give slightly different derating factors. Some variants are presented in the tables 1 and 2. In *DriveConstructor* derating is done automatically when the user sets the ambient- or the coolant temperature for the components.

Ambient temperature

As the cable between the machine and the converter can be long (in special cases up to several km!) the environment can be quite different for the machine and the converter, as well as for other components of the system. The machine for example can be at the open air while the converter in a dry electric room with air conditioning or a container (Fig.1).

Влияние температур окружающей среды и охладителя

Если компонент системы должен работать при высоких температурах окружающей среды, его мощность должна быть снижена при выборе конкретного компонента. Различные производители оборудования дают несколько отличающиеся рекомендации. Таблицы 1 и 2 содержат набор таких коэффициентов. В программе *DriveConstructor* снижение мощности происходит автоматически, когда пользователь указывает реальные температуры окружающей среды и охладителя для компонентов системы.

Температура окружающей среды

Поскольку длина кабеля между электрической машиной и преобразователем частоты может быть велика (в некоторых случаях до нескольких км), условия окружающей среды могут весьма различаться для машины и преобразователя, а также для других компонентов системы. Например, машина может располагаться на открытом воздухе, а преобразователь – в сухой электрощитовой с кондиционированием воздуха или в контейнере (рис.1).



Fig.1. Container from Ingeteam.

Рис.1. Контейнер от Ingeteam.

The coefficient of power derating with ambient temperature k_a is defined as permissible output in % of rated output as function of ambient temperature T_a .

When the component needs to be de-rated for both temperature and altitude, the de-rating factors given in the table should be multiplied together.

Коэффициент снижения мощности в зависимости от температуры окружающей среды k_a представляет собой допустимое значение выходной мощности в % от номинальной мощности в функции от температуры окружающей среды T_a .

В случае необходимости снижения мощности компонента системы одновременно из-за температуры и высоты над уровнем моря, коэффициенты, полученные из таблиц, должны перемножаться.

Table 1. Air-cooled components. Power derating k_a as function of ambient temperature.

Таблица 1. Компоненты с воздушным охлаждением. Коэффициент снижения мощности k_a в зависимости от температуры окружающей среды.

T_a °C	Electric machine & Transformer <i>Электрическая машина и трансформатор</i>	Frequency converter <i>Преобразователь частоты</i>
30	108%	102%
35	104%	100%

40	100%	98%
45	96%	92%
50	92%	84%

Coolant temperature

Temperature of the cooling water at the input of the component cooling circuit. In *DriveConstructor* it can be varied in the range 20...50 °C for EM, FC and transformers. The coefficient of power derating with coolant temperature k_w is defined as permissible output in % of rated output as function of coolant temperature T_w .

Температура охладителя

Температура охлаждающей жидкости на входе системы охлаждения компонента в программе *DriveConstructor* может изменяться в диапазоне от 20 до 50°C для ЭМ, ПЧ и трансформаторов. Коэффициент снижения мощности в зависимости от температуры охладителя k_w представляет собой допустимую мощность в % от номинальной мощности в функции температуры охладителя T_w .

Table 2. Water-cooled components. Power derating k_w as function of coolant temperature.

Таблица 2. Компоненты с водяным охлаждением. Коэффициент снижения мощности k_w в зависимости от температуры охладителя.

T_w , °C	Electric machine & Transformer Электрическая машина и трансформатор	Frequency converter Преобразователь частоты	Transformer Трансформатор
20	110%	105%	105%
30	108%	104%	104%
35	104%	100%	100%
40	100%	92%	100%
45	96%	84%	96%
50	92%	76%	92%

When a component, like liquid-cooled FC, has both air- and water-cooled parts, derating should be calculated for both parts of the respective ambient- and coolant temperatures. In addition derating for altitude (if needed) should be implemented. Smallest of the products k_h*k_a and k_h*k_w should be taken as the overall overload. For example if $k_h=90\%$ and $k_a=80\%$, the product k_h*k_a is $0.9*0.8=0.72$ or 72%.

Temperature of the coolant may help to solve the high-altitude problem. It is possible to compensate high altitude with lower temperature of the coolant.

There is also PWM frequency derating, though this functionality is not included in *DriveConstructor*.

Когда компонент системы, например, преобразователь частоты с жидкостным охлаждением имеет части как с воздушным, так и с жидкостным охлаждением, коэффициент снижения мощности должен быть рассчитан для каждой из этих частей в зависимости от температуры окружающей среды и температуры охладителя. Дополнительно нужно учесть снижение мощности из-за высоты над уровнем моря (при необходимости). Наименьшее произведение коэффициентов k_h*k_a и k_h*k_w должно быть выбрано для определения общего снижения мощности. Например, если $k_h=90\%$ и $k_a=80\%$, произведение k_h*k_a равно $0.9*0.8=0.72$ или 72%.

Температура охладителя может помочь решить проблемы с большой высотой над уровнем моря. Можно компенсировать большую высоту над уровнем моря снижением температуры охладителя.

Существует также необходимость снижения частоты ШИМ, но в программе *DriveConstructor* это не предусмотрено.

Protection

Equipment can be installed in quite demanding environments (e.g. Fig 1).

The IP rating (International Protection) is used to determine the degree of protection provided by an enclosure. It is a standard maintained by IEC 60529. The IP rating is made up of 2 digits.

In *DriveConstructor* everything is simplified to only two protection variants: “low” and “high”.

Защита

Оборудование может располагаться в очень сложных условиях (например, см.рис.1).

Класс защиты IP (International Protection) используют для определения степени защиты, обеспечиваемой корпусом устройства. Класс защиты определяется стандартом МЭК 60529. Класс защиты образован из двух цифр.

В программе *DriveConstructor* все упрощено до только двух вариантов: «низкая степень защиты» и «высокая степень защиты».



Fig.1. Motor at a conveyor.

Рис.1. Электродвигатель на конвейере.

Handy reference table for I.P. ratings								
First characteristic numeral			Second characteristic numeral					
Protection against solid foreign objects			Degree of protection for people against access to hazardous parts with:	Protection against harmful ingress of water			Degree of protection from water	
I.P.	Example	TESTS		I.P.	Example	TESTS		
0		No protection	Non-protected	0		No protection	Non-protected	
1		Full penetration of 50mm diameter of sphere not allowed. Contact with hazardous parts not permitted.	Back of hand	1		Protected against vertically falling drops of water	Vertically dripping	
2		Full penetration of 12.5mm diameter of sphere not allowed. The jointed test finger shall have adequate clearance from hazardous parts.	Finger	2		Protected against vertically falling drops of water with enclosure tilted 15° from the vertical.	Dripping up to 15° from the vertical	
3		The access probe of 2.5mm diameter shall not penetrate.	Tool	3		Protected against sprays to 60° from the vertical.	Limited spraying	
4		The access probe of 1mm diameter shall not penetrate.	Wire	4		Protected against water splashed from all directions – limited ingress permitted	Splashing from all directions	
5		Limited ingress of dust permitted (no harmful deposit).	Dust protected	W I R E	5		Protected against low pressure jets of water from all directions – limited ingress permitted	Hosing jets from all directions
6		No ingress of dust.	Dust tight		6		Protected against strong jets of water eg for use on ship decks – limited ingress permitted	Strong hosing jets from all directions
				7		Protected against the effects of immersion between 150mm and 1m	Temporary immersion	
				8		Protected against continuous submersion at a specified depth.	Continuous immersion	

Fig.2. IP classes.

Рис.2. Исполнения по классам защиты.

Electric machine protection

- “low” is designated IP21/23, meaning protection against solid object with a diameter >12.5 mm and against falling water, but not splashed from all directions.
- “high” is designated IP54/55, meaning protection against dust and against water, coming from any direction.

Totally enclosed air-cooled machines are larger than open-ventilated machines.

FC protection

- “low” is designated IP21/31, meaning protection against solid object with a diameter >12.5 mm and against vertically dropping water.
- “high” is designated IP54/55, meaning protection against dust and against water, coming from any direction.

Operational environment (dust, moist) defines requirements to the enclosure of the FC. FC with higher protection class is more expensive.

Examples

- Machine with IP23 – «drip proof» or «indoor». Predominately used in the refrigeration and compressor industries for their reduced frame size offerings. Are commonly found in environments where dirt and moisture are minimal. They are used in plant rooms and buildings on pumps, fans, blowers and compressors. Drip proof motors are the most cost effective industrial motor because of their design. They maximize ventilation through the motor providing the highest amount of heat dissipation. In turn more

Класс защиты электрических машин

- “низкая степень защиты” соответствует классам защиты IP21/23, что означает защиту от попадания внутрь объектов диаметром >12.5 мм и от попадания падающей воды, но не от брызг с разных направлений.
- “высокая степень защиты” соответствует классам защиты IP54/55, что означает защиту от пыли и воды, попадающей с любого направления.

Полностью закрытые машины с воздушным охлаждением крупнее, чем машины с открытой вентиляцией.

Класс защиты преобразователей частоты

- “низкая степень защиты” соответствует классам защиты IP21/31, что означает защиту от попадания внутрь объектов диаметром >12.5 мм и от попадания вертикально падающей воды.
- “высокая степень защиты” соответствует классам защиты IP54/55, что означает защиту от пыли и воды, попадающей с любого направления.

Требования к исполнению корпуса преобразователя частоты определяются его операционной средой (пыль, влага). Преобразователь с более высоким классом защиты будет более дорогим.

Примеры

- Машина с классом защиты IP23 называется каплезащищенной или предназначенной для внутренней установки. В основном они используются в холодильной или компрессорной технике благодаря своим небольшим габаритам. Такие машины встречаются в помещениях с минимальным загрязнением и влажностью. Они используются в заводских помещениях и зданиях для привода насосов, вентиляторов, воздуходувок и компрессоров. Каплезащищенные

output power can be achieved in a smaller motor frame reducing cost. Typically used for indoor applications in relatively clean, dry locations.

- Machine with IP 54 or IP 55 (sometimes called «weather protection» or «weather proof») is suitable for outdoor installation with the airpath designed to minimize the ingress of harmful substances. Prevents the free exchange of air between the inside and outside of the frame, but does not make the frame completely air tight.

IP21/23 machine would have better cooling so it may be ~20% lighter and more compact than IP54/55 machine (also cheaper). In spite of their higher cost totally enclosed machines are being used increasingly in industry. If you are not sure which protection to choose set it to «any».

электродвигатели являются самыми экономически эффективными благодаря своей конструкции. Они имеют наилучшую вентиляцию, обеспечивающую наибольший отвод тепла. В результате, большую мощность можно обеспечить в меньшем объеме двигателя, что снижает его стоимость. Такие двигатели обычно применяются внутри помещений, в относительно чистых и сухих местах.

- Машины с классом защиты IP 54 или IP 55 (иногда называемые брызгозащищенными или погодостойкими) предназначены для наружной установки. Их небольшие отверстия минимизируют попадание внутрь корпуса опасных веществ. Их корпуса предотвращают обмен воздухом с окружающей средой, но не являются полностью герметичными.

Машины с классом защиты IP21/23 имеют лучшие условия охлаждения, поэтому они оказываются на ~20% легче и компактнее машин с классом защиты IP54/55 (а также дешевле). Но несмотря на высокую стоимость, полностью закрытые машины применяются очень широко в промышленности.

Если вы не уверены, какой класс защиты выбрать, поставьте в программе «любой».

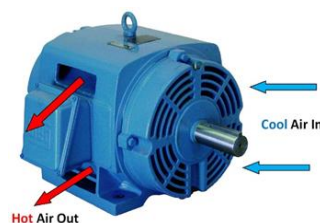


Fig.3. Open drip proof motor example.

Рис.3. Пример двигателя с открытым каплезащитным корпусом.

Duties and overloads

If load of the mechanism is intermittent and follows a certain pattern, this load can be characterized by some standard duty and overload type. Some standard pattern according to IEC34 are presented in the chart (Fig.1). *S1*, *S2* and *S3* patterns contain only loads up to the rated load, while *S4* patterns contains also overload, marked "*D*" (when the load is above the rated value it is called *overload*).

Duty is the ratio of the time at full load to the total time. In *DriveConstructor* the range to choose from is 50...100%. *Duty cycle period* is the time before the load pattern repeats itself. In *DriveConstructor* the range to choose from is 0,1...100 min.

Both *duties* and *overloads* have similar thermal effect. When the equipment is loaded (state "ON" in Fig.3) the temperature inside the component goes up. When load is removed (state "OFF" in Fig.3) then the temperature decreases. The rate of the temperature increase or decrease is defined by thermal constant of this particular component.

Повторно-кратковременные режимы и перегрузки

Если нагрузка механизма переменная и периодически повторяется, то ее можно характеризовать некоторым стандартным нагрузочным циклом и типом перегрузки. Стандартные нагрузочные циклы в соответствии со стандартом IEC34 представлены на рис.1. Циклы *S1*, *S2* и *S3* содержат только периодически включающуюся нагрузку, но цикл *S4* содержит также перегрузку, обозначенную "*D*" (*перегрузкой* называется нагрузка, превышающая номинальную).

Рабочий цикл представляет собой отношение длительности полной нагрузки механизма к общей длительности цикла. В программе *DriveConstructor* можно выбирать рабочие циклы из диапазона от 50 до 100%. *Периодом цикла* называется время до начала повторения цикла. В программе *DriveConstructor* можно выбирать период от 0,1 до 100 мин.

Как *рабочие циклы*, так и *перегрузка* имеют одинаковый тепловой эффект. Когда оборудование нагружено (состояние "ON" на рис.3), температура внутри его компонентов повышается. При снятии нагрузки (состояние "OFF" на рис.3) температура снижается. Скорость нарастания и спадания температуры определяется теплофизическим коэффициентом конкретного компонента.

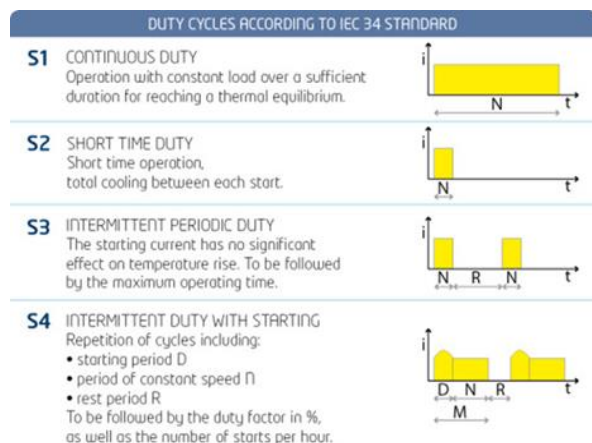


Fig.1. Standard duty cycles.

Рис.1. Стандартные рабочие циклы.

To illustrate how overloads are defined in *DriveConstructor* Fig.4 presents overload of 100%. The reference is rated load which is taken as 100%. The overload of 100% means the overload amplitude is 200%.

Different components have different tolerance to overloads. Even different electric machines have different overload tolerance; induction machines can handle 200% overload amplitude, while PM machine usually will handle lower - maybe 150% amplitude (=50% overload).

The limits in the components are not only thermal, but can be for example saturation of magnetic cores in electric machines or maximum permissible current of the switches in the FC.

Machine can thermally absorb long overloads, converter - only short ones.

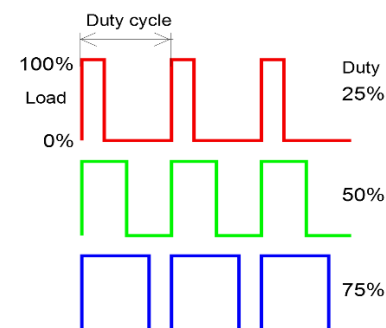


Fig.2. Duties of 25, 50 and 75%.

Рис.2. Рабочие циклы 25, 50 и 75%.

Рис.4 показывает, как в программе *DriveConstructor* определяется перегрузка в 100%. За базу принимается номинальная нагрузка, которая равна 100%. Перегрузка в 100% означает амплитуду нагрузки 200%.

Различные компоненты системы могут по-разному противостоять перегрузкам. Даже разные электрические машины имеют разную устойчивость к перегрузкам; асинхронные машины могут переносить амплитуду нагрузки в 200%, в то время как машины с постоянными магнитами выдерживают меньшую перегрузку – амплитуду нагрузки 150% или 50% перегрузку.

Перегрузочная способность отдельных компонентов связана не только с перегревом, например, насыщение магнитной цепи в электрических машинах или максимально допустимый ток ключей в преобразователях частоты могут ограничивать их нагрузку.

Электрическая машина способна переносить длительную перегрузку, преобразователь частоты – только кратковременную.

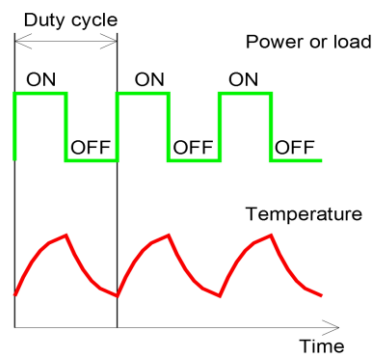


Fig.3. Duties and temperature inside the loaded component.

Рис.3. Рабочие циклы и температура внутри нагруженного компонента.

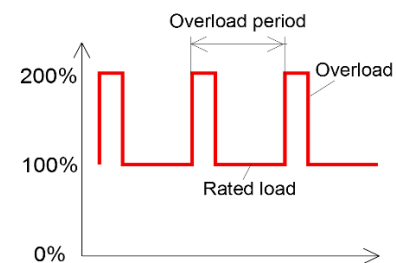


Fig.4. Overload of 100%.

Рис.4. Перегрузка в 100%.

What is a drive system?

Architecture

The drive train in Fig.1 includes all the components available in *DriveConstructor*:

- driven mechanism (pump in this case),
- gearbox,
- electric machine,
- cable,
- frequency converter,
- circuit breaker,
- transformer, and
- the grid.

In real life there can be used e.g. softstarter or Y/D-starter instead of the frequency converter. The gearbox, the transformer or both, can be omitted. Also numerous topologies with parallel branches are used. However, in *DriveConstructor* we focus on the single branch topology like in Fig.1.

Что такое система привода?

Архитектура

Система привода на рис.1 содержит все компоненты, доступные в программе *DriveConstructor*:

- приводной механизм (в данном случае насос),
- редуктор,
- электрическая машина,
- кабель,
- преобразователь частоты,
- выключатель,
- трансформатор и
- сеть.

На практике система может также содержать устройство плавного пуска или устройство переключения со звезды на треугольник вместо преобразователя частоты. Могут отсутствовать редуктор, трансформатор или оба сразу. Также бывают различные схемы с параллельными ветвями. Однако, в программе *DriveConstructor* рассматривается схема с одной ветвью, как на рис.1.

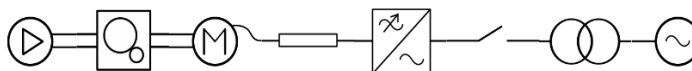


Fig.1. System with all available components.

Рис.1. Система привода со всеми возможными компонентами.

Characteristics

In general any drive system can be characterized by torque curves like for example the ones shown in Fig. 2(a-c), where rated torque curve and overload torque curve are shown. The plot area to the right of the speed n_1 is called “field-weakening” area, which can be longer or shorter depending usually on mechanical constraints. If machine with self-ventilation is used the torque curves will be like in Fig. 2(b). One can see the rated torque curve goes down in the area of low speeds ($<n_3$) – this is due to reduced cooling capability of the shaft mounted fan. Also note, that there can be more than one overload curve. For example in Fig. 2(b) and Fig.2(c) there is 50% overload which can be permitted longer and 100% overload, permitted shorter. Curves in Fig.2(c) are for forced-ventilated or water-cooled machine as torque curves are horizontal in the speed area below n_1 .

Характеристики

В целом, любая система привода может характеризоваться нагрузочными характеристиками, как например на рис. 2(а-с), где показаны кривая номинального момента и кривая момента перегрузки. Область скоростей выше n_1 называется зоной ослабления поля, она может быть больше или меньше в зависимости от механических требований. Если машина имеет самовентиляцию, нагрузочные характеристики похожи на кривые на рис. 2(б). На них видно, что кривая момента снижается в зоне низких скоростей ($<n_3$), что объясняется пониженной отдачей вентилятора, установленного на валу машины. Кроме того, характеристики могут иметь несколько кривых момента перегрузки. Например, на рис. 2(б) и рис.2(с) присутствует 50% перегрузка, которая может присутствовать длительное время, и 100% краткосрочная перегрузка. Характеристики на рис.2(с) соответствуют машине с принудительной вентиляцией или жидкостным охлаждением, поскольку кривые момента остаются постоянными в зоне малых скоростей ниже n_1 .

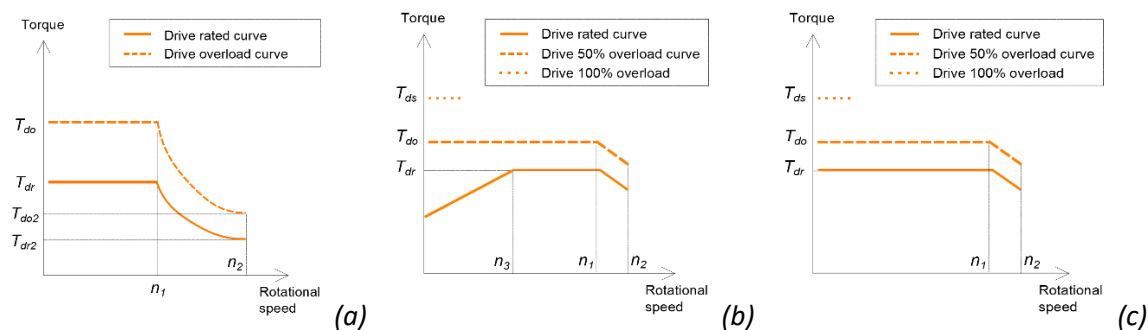


Fig.2. Drive system curves.

Рис.2. Нагрузочные характеристики систем привода.

Sizing principles

Main principles of the component choice

Some parameters/features of the components, such as type or topology of the component, its protection class, cooling methods, etc can be simply set by the user. However, there are many parameters which cannot be set freely for many of the components since the parameters are dependent on the parameters of other components in the drive train.

Electric machine, being an electro-mechanical converter, must be selected based on both mechanical parameters (torques and speeds) and electrical parameters (voltages and currents) - see Fig.1.

For the system part between electric machine and the grid the components are selected according to the electrical parameter - voltages and currents.

- For systems without transformers:
 - electric machine's voltage and current must match voltage of the frequency converter
 - frequency converter voltage must match voltage of the grid

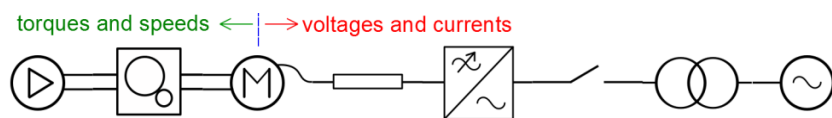


Fig.1.
Рис.1.

Принципы подбора компонентов

Основные принципы выбора компонентов системы

Некоторые параметры или особенности компонентов системы типа схемы соединения, класса защиты, способов охлаждения и т.д. могут быть просто заданы пользователем. Однако, многие параметры компонентов зависят от параметров других компонентов системы привода и не могут выбираться произвольно.

Электрическую машину, как электромеханический преобразователь, следует выбирать как по механическим параметрам (моменты и скорости), так и по электрическим параметрам (напряжения и токи) – см. рис.1.

Компоненты системы, включенные между машиной и сетью, выбираются на основании электрических параметров – напряжений и токов.

- Для систем без трансформатора:
 - напряжение и ток электрической машины должны соответствовать напряжению преобразователя частоты;
 - напряжение преобразователя частоты должно соответствовать напряжению сети.

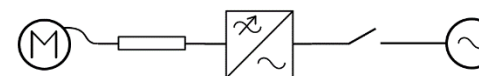


Fig. 2.
Рис.2.

- For systems with transformer between the grid and the frequency converter:
 - electric machine's voltage and current must match voltage and current of the frequency converter
 - frequency converter voltage and current must match LV-side voltage and current of the transformer
 - transformer HV-side voltage must match voltage of the grid

For the system part between the electric machine and the mechanism the components are selected according to mechanical parameters - torques and speeds.

- For systems without gearbox:
 - electric machine's torque and speed must match torque and speed of the mechanism
- For systems with gearbox:
 - gearbox torque and speed must match torque and speed of the mechanism
 - electric machine's torque and speed must match torque and speed of the gearbox

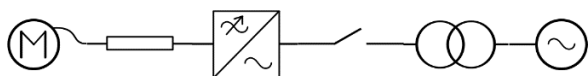


Fig. 3.
Puc.3.

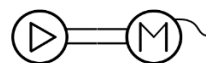


Fig. 4.
Puc.4.



Fig. 5.
Puc.5.

- Для систем с трансформатором, включенным между сетью и преобразователем частоты:
 - напряжение и ток электрической машины должны соответствовать напряжению и току преобразователя частоты;
 - напряжение и ток преобразователя частоты должны соответствовать напряжению и току трансформатора на стороне НН;
 - напряжение трансформатора на стороне ВН должно соответствовать напряжению сети.

Компоненты системы, включенные между электрической машиной и приводным механизмом, должны выбираться на основании механических параметров —моментов и скоростей.

- Для систем без редуктора:
 - момент и скорость электрической машины должны соответствовать моменту и скорости механизма.
- Для систем с редуктором:
 - момент и скорость редуктора должны соответствовать моменту и скорости механизма;
 - момент и скорость электрической машины должны соответствовать моменту и скорости редуктора.

Matching the torques

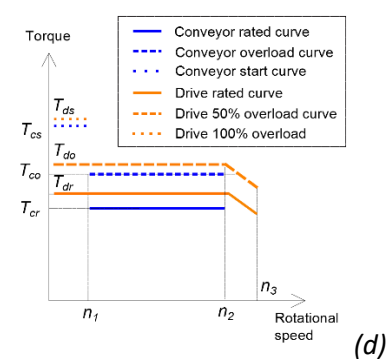
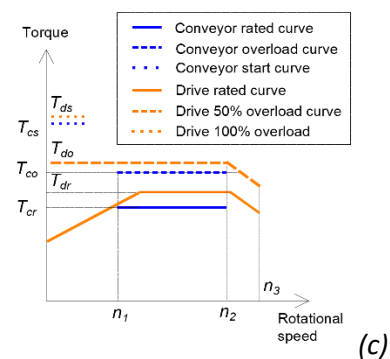
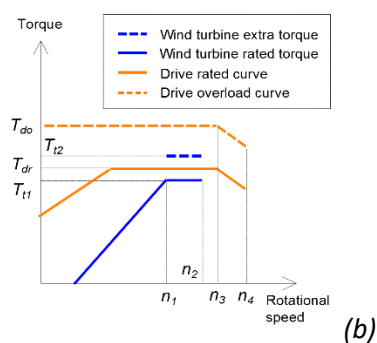
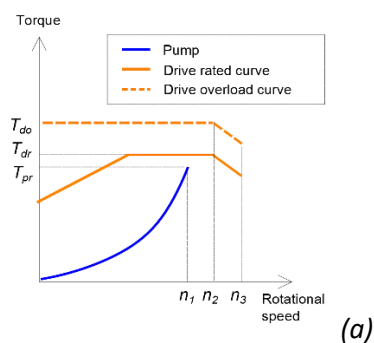
All points of the drive system's rated torque curve should be higher than those of the driven mechanism as shown in Fig. 6 for the different mechanisms; pump (Fig. 6,a), wind turbine (Fig. 6,b), conveyor (Fig. 6,c,d) and winch (Fig. 6,e,f). Note that overload curves of the drive system should be above the overload curves of the mechanisms.

When we consider the power-speed relationships the striking difference between the constant-torque and fan-type load is underlined. If the motor is rated for continuous operation at the full speed, it will be very lightly loaded (typically around 20%) at half speed, whereas with the constant torque load the power rating will be 50% at half speed.

Соответствие моментов

Все точки кривой номинального момента системы должны лежать выше нагрузочной характеристики приводного механизма, как показано на рис. 6 для различных механизмов: насоса (рис. 6,a), ветровой турбины (рис. 6,b), конвейера (рис. 6,c,d) и лебедки (рис. 6,e,f). При этом кривые перегрузочного момента системы должны быть выше перегрузочных характеристик механизмов.

При рассмотрении соотношения мощности и скорости надо обращать внимание на существенную разницу нагрузки с постоянным моментом и вентиляторной нагрузки. Если выбрать номинальную мощность двигателя для постоянной работы на полной скорости в случае вентиляторной нагрузки, то при половинной скорости он будет очень слабо нагружен (обычно, около 20%), в то время как при нагрузке с постоянным моментом нагрузка двигателя при половинной скорости будет равна 50%.



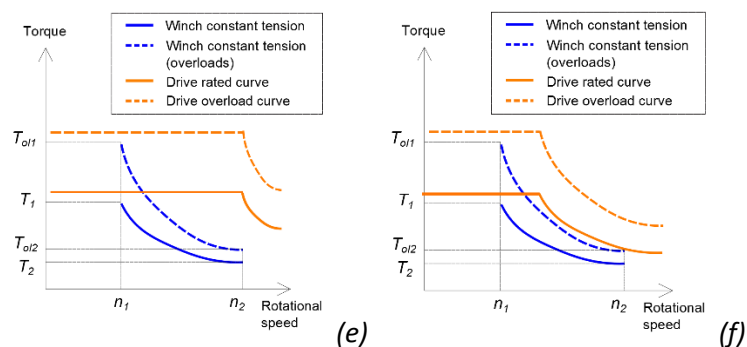


Fig. 6. System curves vs load curves for various mechanisms/application.

Рис.6. Кривые момента системы и нагрузочные характеристики для различных механизмов/применений.

Difference of the algorithms for motor mode and generator mode

In motor mode we start from the driven mechanism, e.g. pump or conveyor, define its rated torque (which is load for the motor) and based on this data we choose the motor. If there is a gearbox between the mechanism and the motor, then the load torque at the motor shaft is calculated as [load torque]/[gear ratio]. In generator mode we start from the grid side and go down to the generator and gearbox, if any.

Различные алгоритмы создания системы для двигательного и генераторного режимов работы

В двигательном режиме работы создание системы привода начинается с приводного механизма, например, насоса или конвейера, определяем его номинальный момент (который будет нагрузкой для двигателя) и на основе этой информации выбираем двигатель. При использовании редуктора между механизмом и двигателем нагрузочный момент на валу двигателя рассчитывается как отношение момента нагрузки к передаточному отношению. В генераторном режиме работы следует начинать со стороны сети и выбирать компоненты системы в направлении генератора и редуктора, если он используется.

Variable speed in applications

A motor controlled by a frequency converter (FC) has become a commodity. This is due to the number of advantages that provide the regulation of the motor speed and, accordingly, the driven mechanism's speed. The range of applications for variable speed drives (VSD) is very broad: general industry and utilities, defense and aerospace, transport and power generation, household appliances, etc. One of the possible classifications of the applications is presented in Fig. 1.

Переменная скорость в применениях

Электродвигатель, питаемый через преобразователь частоты, стал сейчас обычным явлением. Это связано с определенными преимуществами, которые дает возможность регулирования скорости двигателя и, соответственно, приводного механизма. Диапазон применений регулируемых приводов очень велик: промышленность и коммунальные услуги, оборонная и аэрокосмическая промышленность, транспорт и энергетика, бытовые приборы и т.д. Одна из возможных классификаций подобных применений представлена на рис. 1.

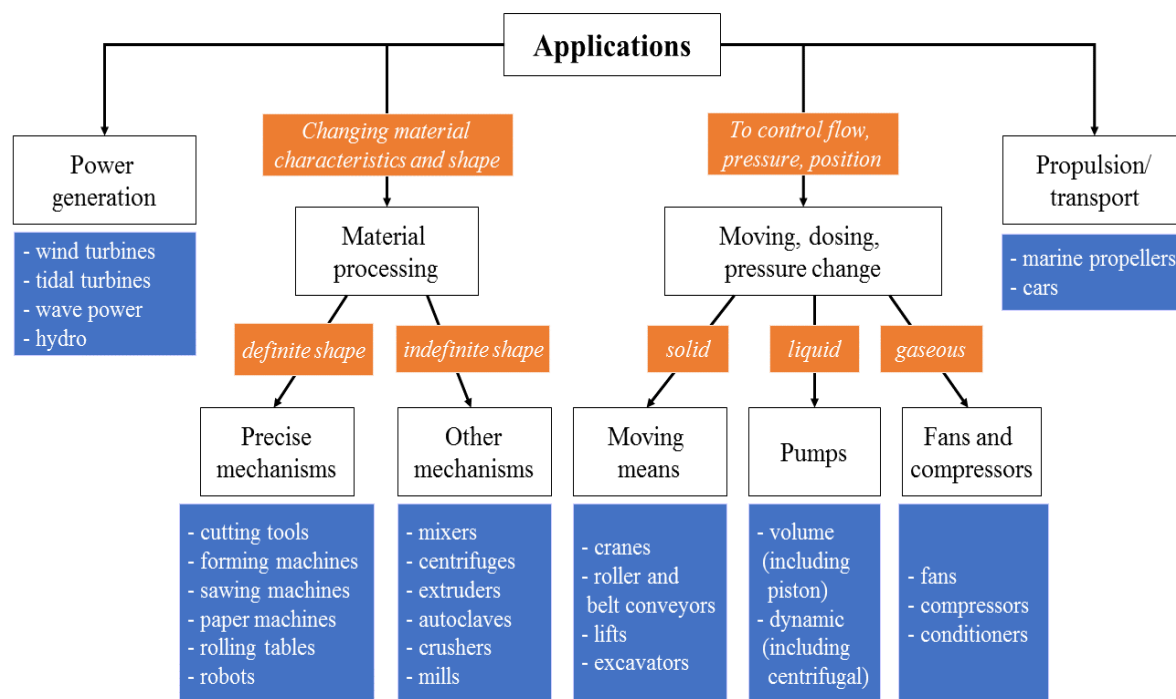


Fig. 1. Classification of the applications where VSD are used.



Рис.1. Классификация применений с регулируемым приводом.

In many cases electric drive systems are designed for variable-speed operation. For example, the drive of a paper machine where high-precision synchronization and speed control of the multiple motors is required to produce paper of a specified quality, or a "flying shears" drive in metallurgy used to cut the moving sheet of metal. Also, in many cases, frequency converters are installed on existing standard induction motors.

Usually, one or more of the following goals are pursued:

Во многих случаях система электропривода проектируется в расчете на работу с переменной скоростью. Например, привод бумагоделательных станков, в которых требуется высокоточная синхронизация и управление скоростью нескольких двигателей для получения бумаги определенного качества, или привод «летающих ножниц» в металлургии, используемых для разрезания движущегося листа металла. Также во многих случаях преобразователи частоты сейчас устанавливают на действующие асинхронные двигатели.

Обычно установка регулируемого привода преследует одну и несколько из следующих целей:

Energy saving

In many processes, significant energy savings can be achieved if at each instant of time the speed is optimized for the given operating point. For example, a fan operating at 50% of the nominal speed consumes less than 15% of its rated power.

Process control, optimization, monitoring

Modern frequency converters have a wide range of functions that, along with speed control of the electric motor, also allow the transfer to the top-level automation system of all necessary information on the motor operation, remote control and monitoring. This allows full control of the operation of the regulated unit and, as a result, optimization of the production process as a whole. The result can be improved quality, increased output, reduced equipment downtime, etc.

Extended equipment lifetime

Smooth start-up and shutdown of the unit, provided by the FC, significantly extends the service life of the electric motor and the driven mechanism and increases the time between overhauls, thanks to the absence of current spikes and mechanical shocks and jerks. In addition, the drive provides a set of motor protections, such as protection against overheating, jamming, long overloads, etc.

Ease of servicing the whole set of equipment

The frequency converter does not require much of maintenance. At the same time, the installation of the FC allows in many cases to simplify the operation of

Энергосбережение

Во многих процессах можно добиться существенной экономии энергии, если в каждый момент времени скорость механизма будет оптимизирована для соответствующего режима работы. Например, вентилятор, работающий на 50% номинальной скорости, потребляет менее 15% номинальной мощности.

Управление, оптимизация, мониторинг процесса

Современные преобразователи частоты обладают большим набором функций, которые, кроме управления частотой вращения электродвигателя, позволяют передавать автоматической системе высокого уровня всю необходимую информацию о работе двигателя, осуществлять дистанционное управление и мониторинг. Это обеспечивает полное управление механизмом и, как следствие, оптимизацию его рабочих процессов в целом. В результате удается улучшить качество работы, повысить выход продукта, сократить простои оборудования и т.д.

Увеличение срока службы оборудования

Плавные пуск и остановка рабочего механизма, обеспечиваемые преобразователем частоты, существенно продлевают срок службы электродвигателя и приводного механизма, увеличивают промежутки между ремонтами. Все это достигается благодаря отсутствию бросков тока и механических ударов и рывков. Кроме того, привод обеспечивает дополнительную защиту двигателя от перегрева, заклинивания, длительных перегрузок и т.д.

Упрощение обслуживания всего комплекса устройств

Преобразователь частоты не требует особенного обслуживания. В то же время, установка преобразователя частоты позволяет во многих случаях

many components of the system. For example, in water supply systems, smooth start-ups and shutdowns of pumping units, flow control with maintaining constant pressure, allows to eliminate hydraulic shocks, as well as reduce pressure in the pipeline. Due to this, the accident rate in the main line (pipe breaks, etc.) is significantly reduced.

Improvement of working conditions for the personnel

In many cases, when introducing frequency converters on fans, conveyors and a number of other mechanisms, it is possible to achieve noise reduction.

упростить работу многих компонентов системы. Например, в системах водоснабжения обеспечить плавный пуск и остановку насосных блоков, обеспечить управление потоком, поддерживать постоянное давление, исключить вероятность гидравлического удара, а также снизить давление в трубопроводе. Благодаря этому снижается аварийность магистральной линии (разрывы труб и т.д.).

Улучшение условий работы персонала

Во многих случаях установка преобразователей частоты на вентиляторы, конвейеры и множество других механизмов приводит к уменьшению шума.

Energy saving with the help of VSD

More than 80% of the world's population of electric motors drive the mechanisms with a quadratic load characteristic - pumps, fans and compressors. Centrifugal pumps, being probably the most popular pump type, are used almost everywhere - nearly in all industries and utilities. Operation of centrifugal pump at variable speed usually demonstrate impressive energy savings compared to constant speed operation. The way of achieving the savings can be demonstrated for a basic water supply system shown in Fig. 1.

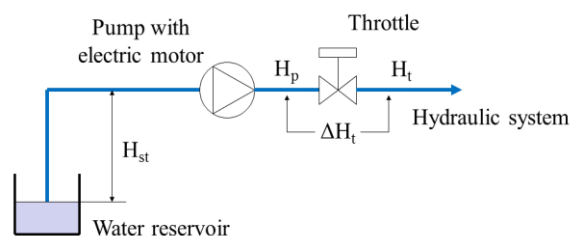


Fig. 1. Water supply with throttle regulation.

The height of the pump axis above the level of the water reservoir ("lift height") is called the static head H_{st} . When rotational speed of the impeller of the pump is not regulated, a throttle (valve) is installed at the pump outlet, which can change area (cross-section) of the water passage to regulate the volume of the water supplied to the hydraulic network and the pressure in the network. The characteristic of the pump is determined in the coordinates of the head-flow $H-Q$. With the throttle fully open (Fig. 2a), the head and the flow are nominal (100%) and the pump's operating point is at the intersection of its own characteristic and the hydraulic network's (system's) characteristic. If it is required to set the flow below Q_{nom} , the throttle partially closes and the

Энергосбережение с помощью регулируемого привода

Более 80% всех электродвигателей в мире вращают механизмы с квадратичной нагрузочной характеристикой – насосы, вентиляторы и компрессоры. Центробежные насосы, как одни из самых популярных, применяются практически везде – почти во всех видах промышленности и коммунальном хозяйстве. Работа центробежного насоса с регулируемой скоростью обычно демонстрирует впечатляющую экономию энергии по сравнению с работой при постоянной скорости. Продемонстрировать такую экономию можно на примере основной системы водоснабжения представленной на рис. 1.

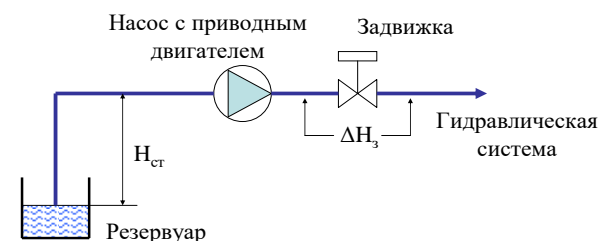


Рис.1. Водоснабжение с регулировкой дросселя.

Высота оси насоса над уровнем водного резервуара («высота подъема») называется статическим напором H_{st} . Если частота вращения пропеллера насоса не регулируется, на выходе насоса устанавливают дроссель (клапан), который может изменять сечение водяного канала, регулируя объем воды, поступающий в гидравлическую сеть, и давление в сети. Характеристика насоса строится как зависимость напора от величины расхода $H-Q$. При полностью открытом дросселе (рис. 2a) напор и расход равны номинальным (100%), а рабочая точка насоса находится на пересечении характеристики насоса и характеристики гидравлической сети (системы). Если необходимо установить расход ниже номинального Q_{nom} ,

characteristic of the hydraulic network shifts upwards (Fig. 2b). Accordingly, the operating point moves from "1" to "2". The new flow rate ($Q = 82\%$) corresponds to a new head ($H = 64\%$) in the network after the throttle, which is defined as the head difference at point "2" and the head drop ΔH :

$$H_t = H_2 - \Delta H_t = 108.$$

The disadvantage of the flow and head regulation by the throttle (called "throttling") is the energy loss at the throttle. The graphically useful energy and the energy lost on the latch can be represented by rectangles in Fig. 2c. It can be seen that even with not deep regulation of the pump flow ($Q = 82\%$ of the nominal value), the throttle losses make up more than 40% of the power.

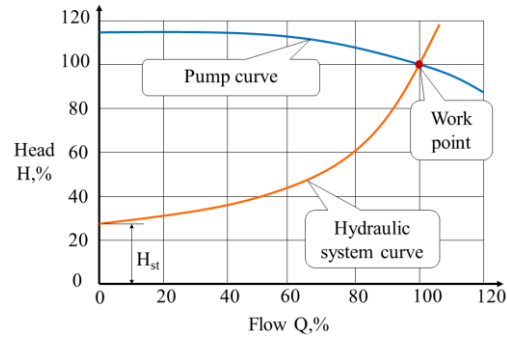
Another problem of throttling is reduced efficiency of the pump when the pump's operating point is shifted from the rated due to the change in the performance of the hydraulic network (the throttle is part of the network).

дроссель частично закрывают, и характеристика гидравлической сети изгибается выше (рис. 2b). Соответственно, рабочая точка насоса перемещается из точки "1" в точку "2". Новый расход ($Q = 82\%$) соответствует новому напору ($H = 64\%$) в сети после дросселя, который определяется как разность напора в точке "2" и изменения напора ΔH_t :

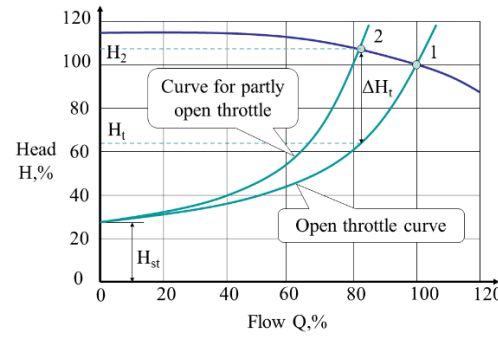
$$H_t = H_2 - \Delta H_t = 108.$$

Недостаток такого способа регулирования напора и расхода с помощью дросселя (называемого дросселированием) заключается в том, что в дросселе теряется энергия. Графически удобно представить энергию и ее потери в дросселе с помощью прямоугольников на рис. 2c. Можно заметить, что даже при неглубоком регулировании расхода насоса ($Q = 82\%$ от номинального значения), потери в дросселе составляют более 40%.

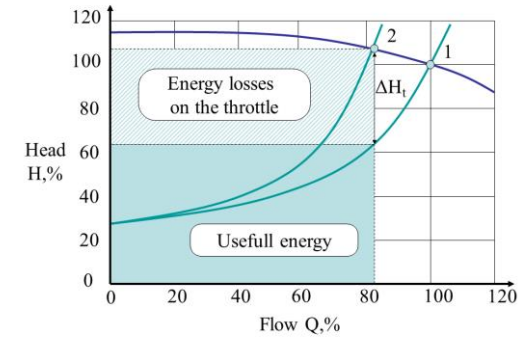
Другая проблема дросселирования заключается в снижении КПД насоса, когда его рабочая точка смещается от номинального значения из-за изменения производительности гидравлической сети (дроссельная часть сети).



(a)

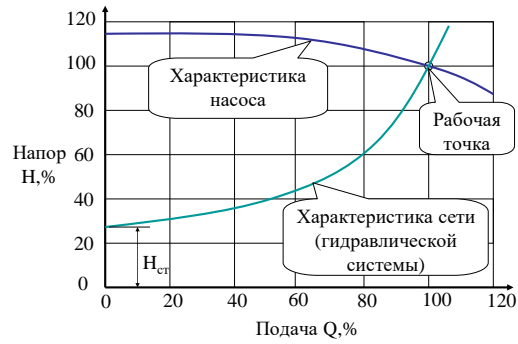


(b)

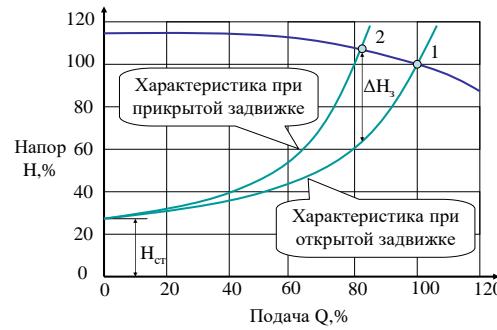


(c)

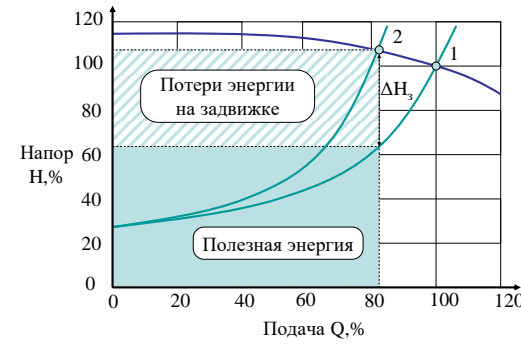
Fig. 2. Throttle control.



(a)



(b)



(c)

Рис. 2. Дросселирование.

The power on the pump shaft is determined by the following expression:

$$P=(g*\rho*h*q)/(3.6*106*\eta),$$

where P is in kW , g is gravity ($g=9.81m/s^2$), ρ is density of the [pumped fluid](#) in kg/m^3 , η is efficiency of the pump, h is head in m and q is flow in m^3/h .

Thus, lower efficiency of the pump lead to increase power consumption. Fig. 3 shows the efficiency map of the pump (lines of equal efficiency).

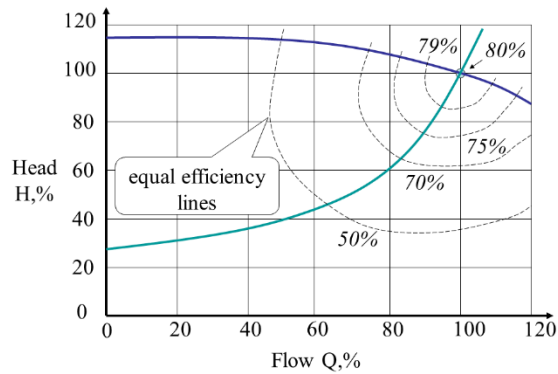


Fig. 3. Pump efficiency.

Мощность на валу насоса определяется следующим выражением:

$$P=(g*\rho*h*q)/(3.6*106*\eta),$$

где P – мощность в кВт, g – ускорение свободного падения ($g=9.81 м/с^2$), ρ – плотность [перекачиваемой жидкости](#) в $кг/м^3$, η – КПД насоса, h – напор в $м$ и q – расход в $м^3/час$.

Таким образом, низкий КПД насоса приводит к повышенному расходу энергии. На рис. 3 показана карта КПД насоса (линии равного КПД).

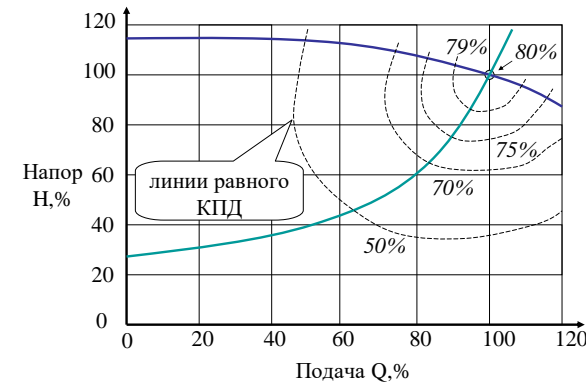


Рис. 3. КПД насоса.

When adding the frequency converter to the motor driving the pump, the throttle can be permanently set to the fully open position. Head and flow control is performed by changing the rotational speed of the pump's impeller. Typically, a system with pump speed control operates in a closed loop on the feedback signal from the pressure sensor (Fig. 4).

When the pressure in the network drops below by a value set by the operator, which indicates an insufficient flow, the inverter automatically increases the pump speed, which increases the flow rate and the pressure. Likewise, when the pressure rises above a preset value, the flow rate needs to be reduced - this is done by reducing the pump's speed.

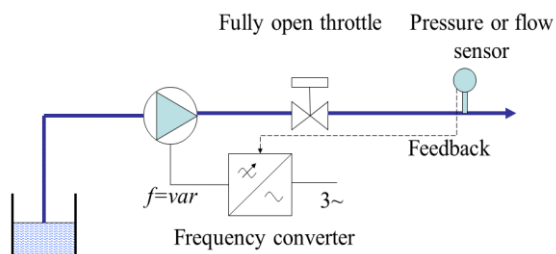


Fig. 4. Water supply FC control.

При подключении к электродвигателю, вращающему насос, преобразователя частоты дроссель может постоянно оставаться в открытом состоянии. Регулирование напора и расхода осуществляется путем изменения частоты вращения пропеллера насоса. Обычно система регулирования скорости насоса работает по замкнутому контуру с помощью сигнала обратной связи от датчика давления (рис. 4).

Когда давление в системе снижается ниже значения, установленного оператором, что означает недостаточный расход воды, инвертор автоматически увеличивает скорость насоса, что приводит к увеличению скорости потока и давления. Наоборот, когда давление повышается выше установленного уровня, скорость потока должна быть уменьшена, что и достигается уменьшением скорости насоса.

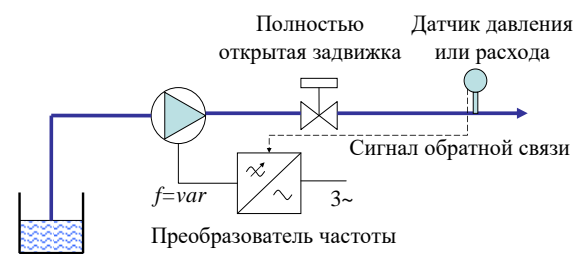
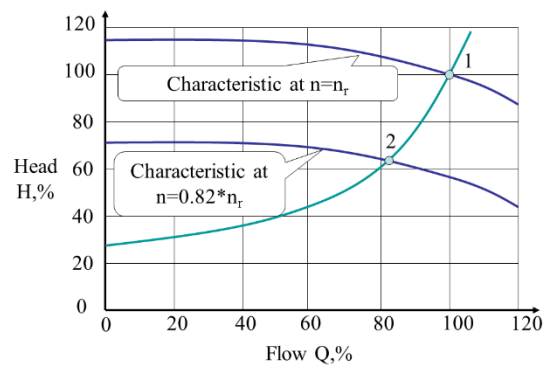
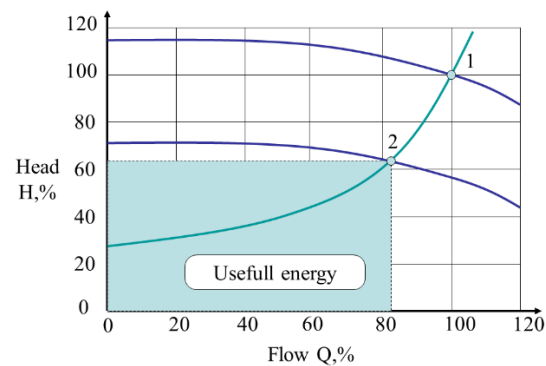


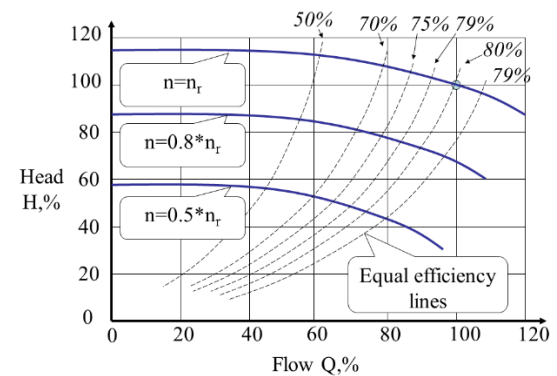
Рис. 4. Водоснабжение с регулировкой преобразователя частоты.



(a)

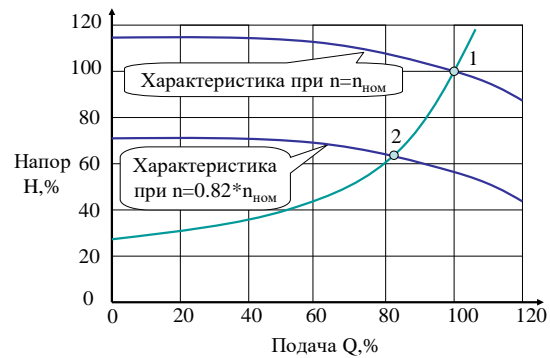


(b)

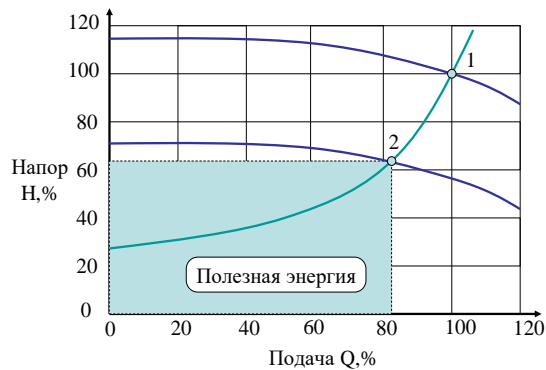


(c)

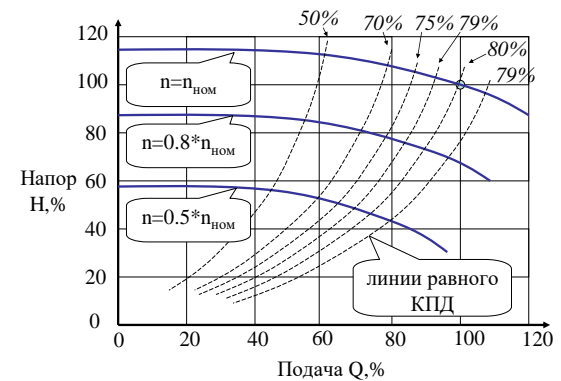
Fig. 5. Impeller speed regulation.



(a)



(b)



(c)

Рис.5. Регулирование скорости пропеллера.

In contrast to the throttle control, when the displacement of the operating point during regulation was effected by changing the characteristics of the hydraulic network (the throttle is part of the network), in the event of a change in the speed of rotation of the impeller, the pump characteristic $H-Q$ is shifted. Fig. 5a shows the displacement of the characteristics of the pump, and the operating point of the process with a decrease in speed from n to 82% of n . Since the valve is fully open, there is no loss on it and all the hydraulic energy generated by the pump is useful (Fig. 5b). It is noteworthy that when the pump speed is regulated and the corresponding displacement of its characteristic, the operating point is constantly in the zone of maximum efficiency (Fig. 5c).

В отличие от дроссельного регулирования, когда смещение рабочей точки в процессе регулирования осуществлялось путем изменения характеристики гидравлической сети (а дроссель является частью сети), при изменении скорости вращения пропеллера насоса изменяется характеристика насоса. На рис. 5а показано смещение характеристики насоса и рабочей точки при уменьшении скорости до 82%. Поскольку дроссель полностью открыт, в нем нет потерь и вся создаваемая насосом гидравлическая энергия является полезной энергией (рис. 5б). Нечего и говорить, что при регулировании скорости насоса и соответствующем изменении характеристики насоса рабочая точка всегда остается в зоне его максимальной эффективности (рис. 5с).

What is an optimal system

The system can be called *optimal* if it was benchmarked with alternative systems on one or several criteria and showed the best score on the criteria. The criteria can be cost (e.g. Capital Expenditures, CAPEX or Operational Expenditures, OPEX), efficiency (e.g. at rated load or at partial loads), size and weight, reliability, etc. The criteria should be relevant for the application. For example, for a pump cost will be one of the most important criteria, while weight will usually be much less important. For wind turbines both efficiency and weight will be important, leaving cost less important.

In the proposed *Exercises* the systems should be usually designed for one criterion. In Fig. 1 the list of criteria to choose from contains Cost, Efficiency and Life Cycle Cost (LCC).

The process of selection of the variables (system structure and components with concrete specification) to reach the best score on the chosen criterion can be called *system optimization*.

Что определяет оптимальную систему привода

Система привода может называться *оптимальной*, если после сравнения ее с другими системами по одному или нескольким критериям она показала наилучший результат. Такими критериями могут быть стоимость (например, капитальные расходы – CAPEX или операционные расходы – OPEX), КПД (например, при номинальной нагрузке или частичных нагрузках), размеры и вес, надежность и т.д. Выбранные критерии должны соответствовать рассматриваемому применению. Например, для насоса его стоимость будет одним из важнейших критериев, но вес обычно не столь важен. Для ветровой турбины КПД и вес будет одинаково важны, а стоимость менее важна.

В предлагаемых *Упражнениях* системы привода создаются обычно на основании одного критерия. На рис. 1 список критериев, доступных для выбора, содержит Цену, КПД и Стоимость Жизненного Цикла (LCC).

Процесс выбора значений переменных (схема всей системы и ее компоненты для конкретного приложения) для достижения наилучшего результата по выбранному критерию называется *оптимизацией системы*.

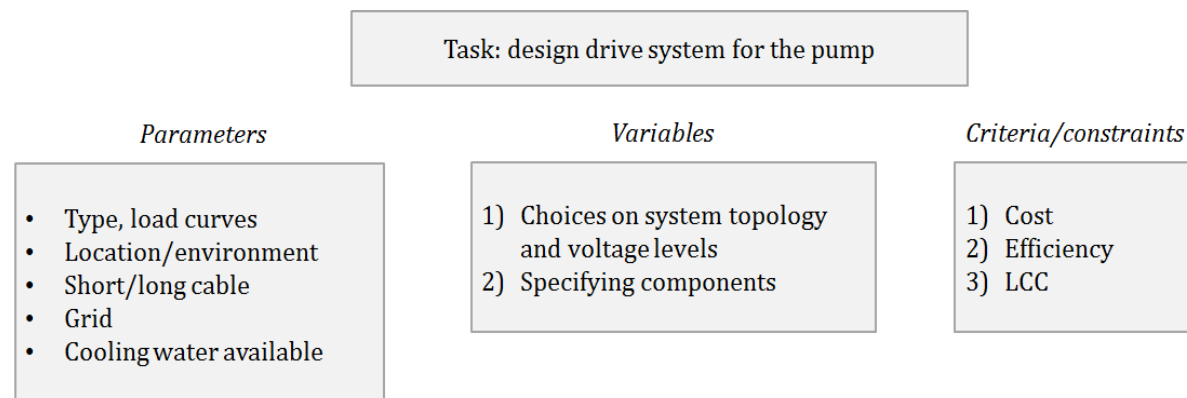


Fig. 1. The task.

Рис.1. Задание.

Benchmarking

As mentioned above, optimal system is selected in competition with alternative solutions, therefore, some benchmarking (comparison) method is needed. The benchmarking can be quantitative and qualitative, the latter being preferable.

Quantitative and qualitative comparisons

For example, motor technologies can be compared looking into loss mechanisms, etc (Fig.2). However, numbers reflecting the components and system behaviour in different operational aspects will provide a more credible answer. One of such measures is of course efficiency (including partial loads!). An example is shown in Fig.3.

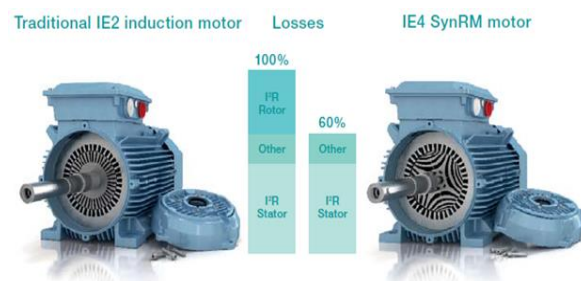


Fig. 2. Qualitative comparison of motor technology.
Рис.2. Качественное сравнение технологий.

Сравнительный анализ

Как уже отмечалось выше, оптимальную систему выбирают в сравнении с альтернативными решениями, поэтому требуется принять метод сравнительного анализа. Сравнение может быть количественным и качественным, причем, последнее предпочтительнее.

Качественное и количественное сравнение

Например, электродвигатели можно сравнивать по источникам потерь и т.д. (рис.2). Однако, цифры, отражающие поведение системы и ее компонентов в различных рабочих режимах, дадут более надежный ответ. Одним из таких значений, конечно, является КПД (включая КПД при частичных нагрузках!). Такой пример показан на рис.3.

Motor-drive package efficiency curves

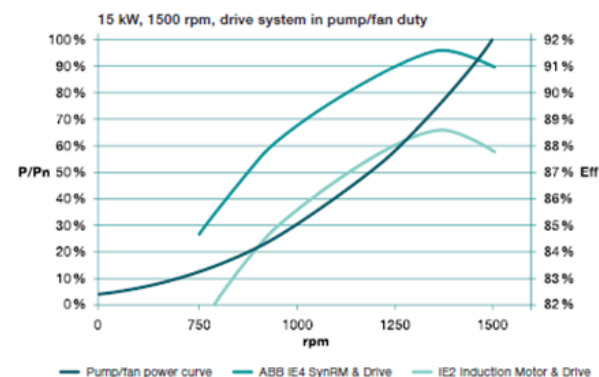


Fig. 3. Comparing efficiencies.
Рис.3. Сравнение КПД.

It is relatively easy to draw conclusions on which system is best (optimal) for the application when there is only one criterion, e.g. cost. It is more challenging to benchmark on several criteria. In such case Spider Diagram can be the right tool to visualize the results (Fig.4).

Life Cycle Cost (LCC)

LCC is one of the popular criteria for benchmarking. Goodness of the EM for an application can be defined by cost of ownership which comprises purchase cost, cost of running (COR) and cost of not running (CONR). COR is cost of consumed energy which is defined by efficiency. CONR is defined by MTBF (reliability) which gives prediction of how often the machine will fail. CONR would include cost of repair and cost of stopped production. CONR is not included in *DriveConstructor*.

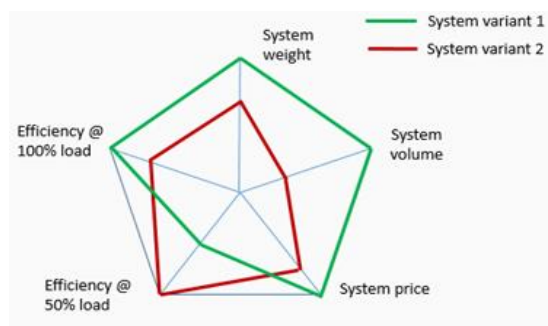


Fig. 4. Quantitative comparison.
Рис.4. Количественное сравнение.

Относительно легко сделать выводы о преимуществе (оптимальности) системы для применения, в котором существует лишь один критерий, например, цена. Гораздо сложнее проводить сравнительный анализ по нескольким критериям. В таких случаях паутинообразная диаграмма может помочь визуализировать результаты сравнения (рис.4).

Стоимость жизненного цикла (LCC)

LCC является одним из популярных критериев сравнительного анализа. Пригодность электрической машины для некоторого применения может быть определена стоимостью владения, которая включает в себя стоимость покупки, стоимость работы (COR) и стоимость простоя (CONR). COR представляет собой стоимость потребленной энергии, которая зависит от КПД. CONR определяется MTBF (надежностью), которая дает прогноз того, как часто машина будет ломаться. CONR будет включать в себя стоимость ремонта и стоимость простоя производства. CONR не включена в программу *DriveConstructor*.



Fig. 5. Cost of ownership.
Рис.5. Стоимость владения.

Frequency converter influence on the grid

Electromagnetic compatibility (EMC) means the ability of devices and technical systems to function normally under the influence of electromagnetic fields and conductivity interference on them and not to create unacceptable interference to other objects. When it comes to frequency converters, there are basically two types of negative influence of the converter on the surrounding equipment (Fig.1):

- Conductivity emissions into the network
 - harmonics
 - megahertz (radio-frequency, RF) interference
- Emissions radiated through air:
 - through the converter housing
 - from power and control cables

Влияние преобразователя частоты на сеть

Электромагнитная совместимость (EMC) означает способность устройств и технических систем нормально функционировать под воздействием электромагнитных полей (противостоять наводимым в них вихревым токам) и не создавать нежелательного влияния на другие объекты. Что касается преобразователей частоты, можно выделить два типа негативных воздействий преобразователя на окружающее оборудование (рис.1):

- Передача помех в сеть:
 - гармоники
 - мегагерцовые (радиочастотные) помехи
- Излучение помех через воздух:
 - через корпус преобразователя
 - через силовые и сигнальные кабели

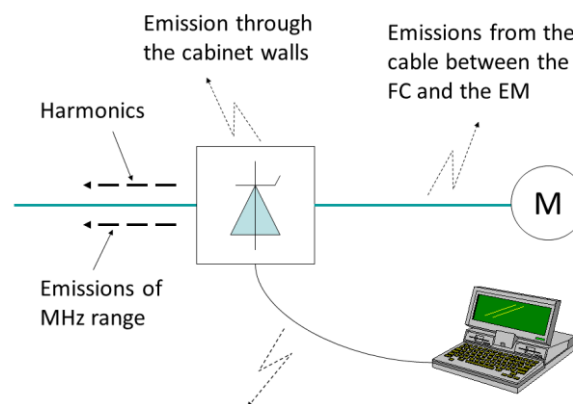


Fig. 1. Emissions from the drive system.

Рис.1. Излучения системы привода.

Harmonics created by the frequency converter

The frequency converter is a non-linear load for the supply network and the current and the voltage at FC input are not sinusoidal. Fig. 2 shows typical forms of current and voltage at the input of the 400 V, 75 kW FC with an uncontrolled 6-pulse rectifier. The current wave is usually distorted much more than the voltage.

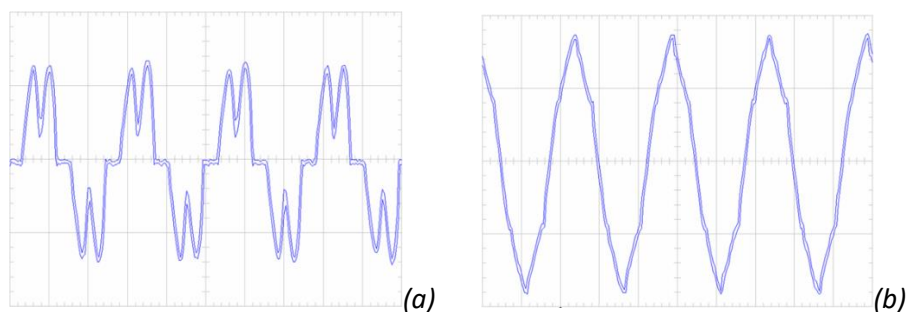


Fig. 2. Waveforms of current (a) and voltage (b).
Рис.2. Формы тока (a) и напряжения (b).

Measures of current and voltage distortion

The common measure of the harmonic distortion of the current wave is "total harmonic distortion (current)" - THD(i):

$$k_I = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_{(1)}^2}} \cdot 100\%$$

A similar factor is used for voltage - THD(u):

Гармоники, создаваемые преобразователем частоты

Преобразователь частоты представляет собой нелинейную нагрузку для сети и формы токов и напряжений на входе преобразователя являются несинусоидальными. На рис. 2 показаны типичные формы тока и напряжения на входе 400 В преобразователя частоты мощностью 75 кВт, содержащего неуправляемый 6-пульсный выпрямитель. Обычно кривая тока искажается сильнее, чем напряжение.

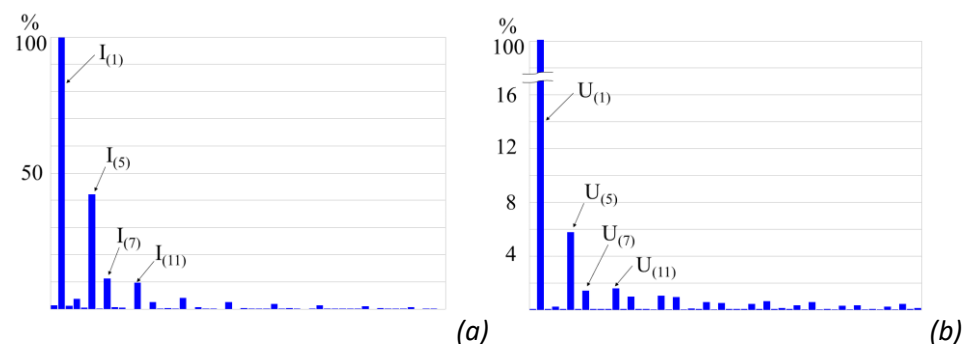


Fig. 3. Fourier transformation of current (a) and voltage (b).
Рис.3. Гармонический анализ тока (a) и напряжения (b).

Измерение степени искажений тока и напряжения

Гармоническое искажение кривой тока оценивают обычно с помощью Коэффициента гармонических искажений (по току) – THD(i):

$$k_I = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_{(1)}^2}} \cdot 100\%$$

Аналогично оценивают искажения кривой напряжения – THD(u):

$$k_U = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} U_n^2}{U_{(1)}^2}} \cdot 100\%$$

For example, for the waveform in Fig.2 the values of K_I and K_U are 40.2% and 6.6%, respectively. Sometimes in the expressions for the sinusoidal distortion coefficients in the denominator the non-effective value of the first harmonic (U_1 or I_1), but r.m.s. value (U or I).

Negative effects of harmonics

- Equipment misoperation and failure
 - e.g. failure due to overheating of transformers, motors and cables, failure of capacitors because of resonance, failure due to insulation deterioration.
- Inconsistent meter reading
- Need for oversizing neutrals, transformers, generators
- Extra losses/Inefficiencies/power factor penalties

What defines how strong the distortion is

Level of distortion is defined by the topology of the FC and the used filters (if any) as well as stiffness of the grid. To define the «stiffness» of the supply grid, the short-circuit current I_c is calculated by hypothetically placing short-circuit at the supply terminals. The stiffness of the supply must be calculated in relation to the load current, therefore, the stiffness is defined by a ration called short-circuit ratio (SCR): $SCR=I_c/I_L$, where I_L – fundamental frequency component of the load current.

The stiffer the grid will be (the higher the SCR) the more harmonics the FC is

$$k_U = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} U_n^2}{U_{(1)}^2}} \cdot 100\%$$

Например, для кривых тока и напряжения на рис.2 значения коэффициентов K_I и K_U равны 40.2% и 6.6% соответственно. Иногда в выражениях для коэффициентов нелинейных искажений в знаменателе используют не амплитуды первой гармоники (U_1 или I_1), а действующие значения (U или I).

Негативные эффекты высших гармоник

- Нарушение работы и отказ оборудования
 - Например, отказ по причине перегрева трансформаторов, двигателей и кабелей, пробой конденсаторов по причине резонанса, отказ из-за ухудшения изоляции.
- Неверные показания датчиков
- Необходимость увеличения габаритов нейтрали, трансформаторов, генераторов
- Дополнительные потери / снижение КПД / расходы из-за коэффициента мощности

Что определяет степень искажения

Степень искажений определяется схемой преобразователя и используемыми фильтрами (если есть), а также устойчивостью сети. Для определения «устойчивости» питающей сети рассчитывают ток короткого замыкания, гипотетически закорачивая зажимы источника питания. Устойчивость сети рассчитывают по отношению к току нагрузки, таким образом, устойчивость характеризуют отношением короткого замыкания (SCR): $SCR=I_c/I_L$, где I_L – основная гармоника тока нагрузки.

Чем выше устойчивость сети (выше значение SCR), тем больше гармоник от преобразователя частоты может поступать в сеть без заметных

usually allowed to inject into the grid.

Influence of the topology and the filters is presented in a few diagrams below. Standard uncontrolled 6-pulse rectifier with a choke as the input filter (Fig.4,a) produced quite a lot of current distortion (Fig.4,b).

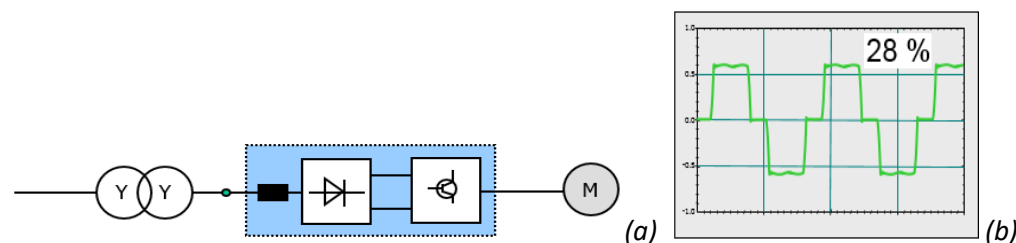


Fig. 4. 6-pulse rectifier with a choke; system topology (a) and current waveform with $THD(i)=28\%$ (b).

Рис.4. 6-пульсный выпрямитель с дросселем: схема (a) и форма тока с $THD(i)=28\%$ (b).

12-pulse scheme with 3-winding transformer (Fig.5,a) reduces harmonics injected into the grid (Fig. 5,b) compared to 6-pulse scheme with 2-winding transformer.

AFE converter provides lowest $THD(i)$ (Fig. 6,b) but a bit higher $THD(u)$ than 12-pulse scheme.

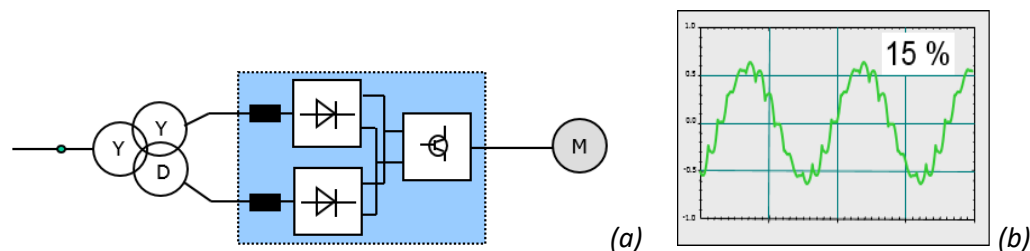


Fig. 5. Topology of the 12-pulse system (a) and current waveform with $THD(i)=15\%$ (b).

Рис.5. Схема 12-пульсной системы (a) и кривая тока с $THD(i)=15\%$ (b).

последствий.

Влияние схемы преобразователя и фильтров показаны на рисунках ниже. Стандартный неуправляемый 6-пульсный выпрямитель с дросселем в качестве входного фильтра (рис.4,a) производит очень большие искажения тока (рис.4,b).

12-пульсная схема с 3-обмоточным трансформатором (рис.5,a) дает меньше гармоник в сеть (рис. 5,b) по сравнению с 6-пульсной схемой с 2-обмоточным трансформатором.

Преобразователь с активным выпрямителем дает наименьшее значение $THD(i)$ (рис. 6,b), но большее значение $THD(u)$, чем 12-пульсная схема.

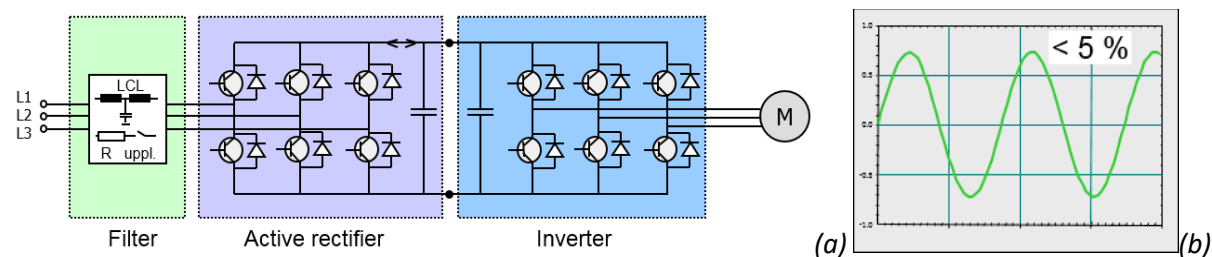


Fig. 6. AFE converter with LCL filter (a) and the current waveform with $THD(i)=5\%$ (b).

Рис.6. Преобразователь с активным выпрямителем с LCL фильтром (a) и кривая тока с $THD(i)=5\%$ (b).

Frequency converter influence on the electric machine

High frequency effects

Voltage rise time of IGBT can be within 0.1-0.2 microseconds. When powering the FC from the 400 V mains, the voltage in the DC link is about 540 V, so the rate of voltage rise in the IGBT can be up to 5 kV/ μ s. Influence of the sequence of pulse fronts with du/dt of 5 kV/ μ s on the system "FC-cable-machine-reducer-driven mechanism" is in many ways similar to the action of a sinusoidal voltage of the same amplitude, but with a frequency of the order of several megahertz. That is why the negative effects caused by the high switching are often called "high-frequency effects". The HF effects result in:

- Increased losses in windings and core of the machine due to non-sinusoidal voltages and currents
- Ageing and degradation of insulation, shorter lifetime of the insulation
- Degradation of bearings

The effects affecting the insulation and the one affecting the bearings are

Влияние преобразователя частоты на электрическую машину

Высокочастотные эффекты

Время нарастания напряжения транзистора IGBT может составлять 0.1-0.2 микросекунд. При питании преобразователя частоты от сети 400 В напряжение на шине постоянного тока составляет около 540 В, поэтому скорость нарастания напряжения на IGBT может составлять до 5 кВ/мс. Влияние последовательности импульсов, у которых du/dt составляет 5 кВ/мс, на систему «преобразователь-кабель-машина-редуктор-приводной механизм» во многих отношениях аналогично воздействию синусоидального напряжения той же амплитуды, но частотой несколько мегагерц. Поэтому негативное влияние, вызываемое частой коммутацией ключей, обычно называют «высокочастотными эффектами». Такие эффекты приводят к:

- Повышенным потерям в обмотках и в сердечнике электрической машины вследствие несинусоидальности токов и напряжений;
- Старению и деградации изоляции, сокращению срока службы изоляции;

briefly presented below.

Travelling waves and overvoltage

In practice, the length of the cable between the FC and the machine can reach hundreds of meters and even up to a few kilometers. Due to the difference in impedance of the cable Z_0 and the machines winding Z_m , voltage pulses get reflected from both ends of the cable. As the result, there appear waves travelling between the FC and the machine. At different instants of time, waves can either compensate each other (when pulses have different polarity) or add up (when polarity is the same). When the direct and reflected waves are combined, as shown in Fig. 1, the total pulse at the terminals of the machine can reach the value at which the insulation may break down.

- Деградации подшипников.

Ниже кратко описано влияние «высокочастотных эффектов» на изоляцию и подшипники.

Бегущие волны и перенапряжение

На практике длина кабеля между преобразователем и машиной может достигать сотен метров и даже нескольких километров. В силу разницы между полным сопротивлением кабеля Z_0 и сопротивлением обмоток машины Z_m импульсы напряжения отражаются от обоих концов кабеля. В результате в кабеле возникают бегущие волны, перемещающиеся между преобразователем и машиной. В разные моменты времени волны могут либо компенсировать друг друга (когда импульсы имеют противоположную полярность), либо складываться (когда полярности совпадают). При складывании прямой и отраженной волн, как показано на рис. 1, полный импульс на зажимах машины может достигать таких значений, при которых происходит пробой изоляции.

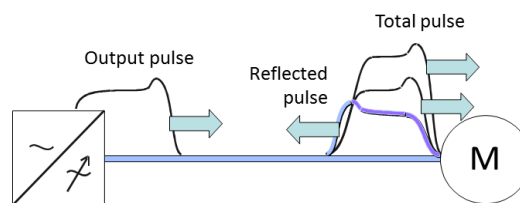


Fig. 1. Superposition of voltage pulses at the terminals of the machine.

Рис.1. Суперпозиция импульсов напряжения на зажимах машины.

One way to estimate the peak voltage at the terminals of the machine with allowance for wave superposition is $U_p = U_d(1 + Z_m - Z_0 Z_m + Z_0)$, where U_d is the amplitude of the voltage pulses at the converter output, equal to the voltage in the DC link. When the cable gets longer, Z_0 decreases. In practice U_p is within $(1.5 \dots 1.9)U_d$.

Fig. 2,a shows the measured voltage at the output of the FC and at the terminals of the machine (only part of the pulse is shown). For clarity, the impulses are superimposed on each other. The effect of superposition of forward and backward waves on the terminals of the machine resulting in voltage oscillations is obvious.

Одним из вариантов оценки пикового напряжения на зажимах машины при суперпозиции волн является значение $U_p = U_d(1 + Z_m - Z_0 Z_m + Z_0)$, где U_d – амплитуда импульсов напряжения на выходе преобразователя, равная напряжению в шине постоянного тока. Когда длина кабеля возрастает, Z_0 уменьшается. На практике U_p находится в диапазоне $(1.5 \dots 1.9)U_d$.

На рис. 2,а показаны результаты измерения напряжения на выходе преобразователя частоты и на зажимах машины (показана часть импульса). Импульсы накладываются друг на друга. Эффект суперпозиции прямой и обратной волн на зажимах машины заключается в колебаниях напряжения.

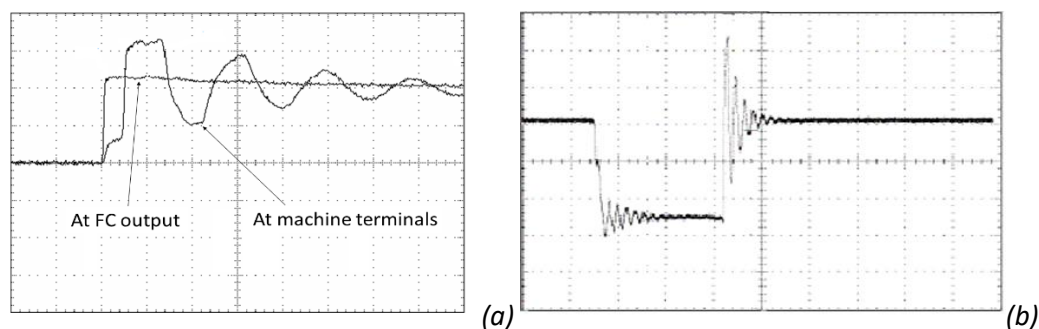
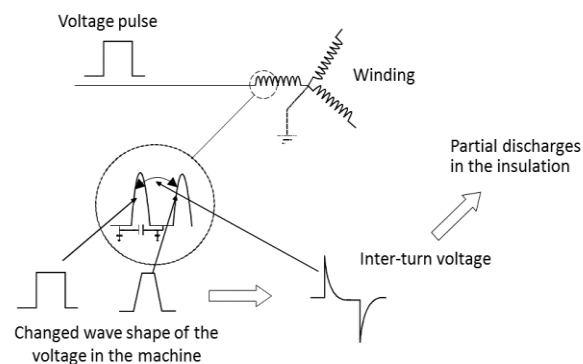


Fig. 2. Voltage pulses: the leading edge of the pulse at the output of the FC and at the terminals of the machine (a), both edges of the pulse at the terminals of the machine (b).

Рис.2. Импульсы напряжения: передний фронт импульса на выходе преобразователя частоты и на зажимах машины (a), передний и задний фронты импульса на зажимах машины (b).

du/dt-effect

Sharp edges/fronts of the PWM pulses and capacitances in the winding lead to uneven voltage distribution inside the winding and create inter-turn voltage spikes as shown in Fig 3,a. This leads to partial discharges in the insulation (Fig.3,b). Constant partial discharges lead to aging of insulation and subsequent destruction (breakdown).



Влияние переходных процессов

Взаимодействие резких краев / фронтов импульсов ШИМ и емкости обмоток машины приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль обмотки и появлению межвитковых бросков напряжения, как показано на рис.3,а. Это приводит к частичным разрядам в изоляции (рис.3,б). Постоянные частичные разряды являются причиной старения изоляции и ее последующему разрушению (пробою).

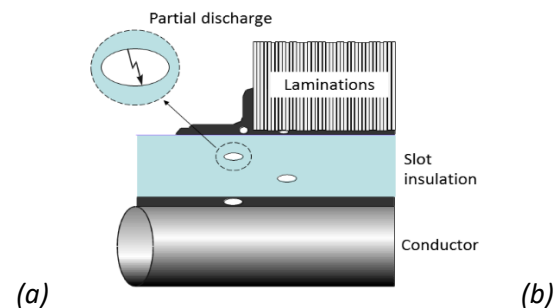


Fig. 3. du/dt-effect: origins (a) and consequences (b).

Рис.3. Влияние переходных процессов: источники (a) и последствия (b).

Bearing currents

The PWM modulation of the output voltage leads to a common-mode (CM) voltage. In Fig. 4 switching pattern is shown, and it can be observed how the common-mode (CM) voltage is generated. This voltage is obtained by adding the three voltages resulting from the three inverter legs. Having the DC-link mid-point as a reference, the voltages V_a , V_b and V_c can either be $+V_{dc}/2$ or $-V_{dc}/2$, where V_{dc} is the DC-link voltage. As a result, depending on the state of the switches, the common mode voltage can take one of the values $\pm V_{dc}/2$ and $\pm V_{dc}/6$.

Подшипниковые токи

Широтно-импульсная модуляция выходного напряжения приводит к появлению синфазного напряжения. На рис. 4 приведен график коммутации напряжений фаз, показывающий возникновение синфазного напряжения. Оно получается при складывании трех фазных напряжений с трех ветвей инвертора. Если взять в качестве опорного напряжения среднюю точку шины постоянного тока, то напряжения фаз V_a , V_b и V_c будут принимать значения либо $+V_{dc}/2$, либо $-V_{dc}/2$, где V_{dc} – напряжение шины постоянного тока. В результате в зависимости от состояния ключей инвертора синфазное напряжение будет принимать значения $\pm V_{dc}/2$ или $\pm V_{dc}/6$ вместо нуля.

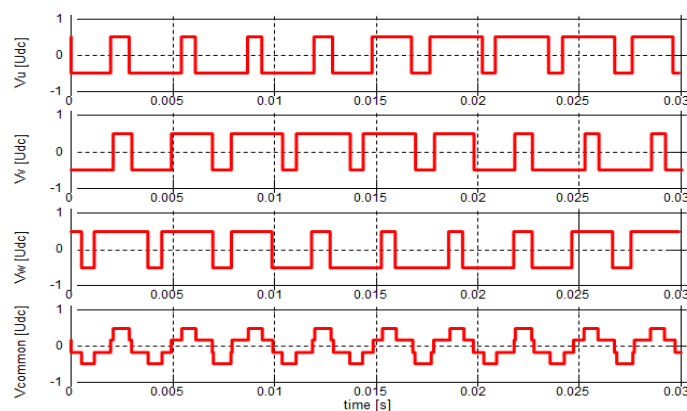


Fig. 4. Common-mode voltage.

Рис.4. Синфазное напряжение.

CM voltages lead to appearance of CM high-frequency currents flow through complex circuits/paths some of which are presented in Fig.5. The HF currents circulating through the bearings of the machine (called “bearing currents”) can lead to premature bearing failures. Another example of the negative impacts is HF leakage currents through ground cables which can interfere with control cables.

Синфазное напряжение приводит к появлению синфазных высокочастотных токов, замыкающихся по различным контурам, часть из которых показана на рис.5. Высокочастотные токи, циркулирующие через подшипники (называемые «подшипниковые токи»), могут приводить к преждевременным отказам подшипников. Другой пример негативного влияния высокочастотных токов заключается в появлении токов утечки через заземляющие кабели, которые могут взаимодействовать с кабелями управления.

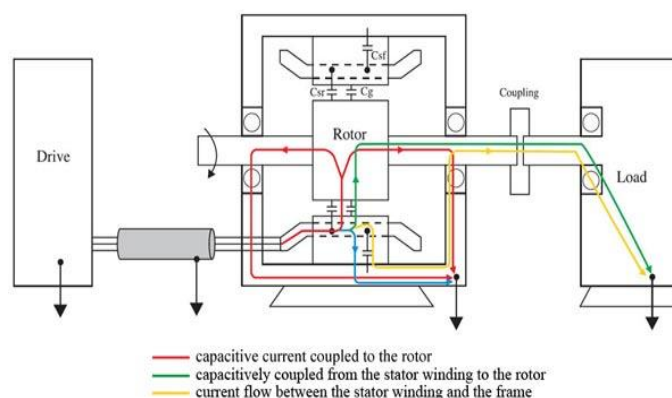


Fig. 5. The paths for HF currents.

Рис.5. Пути замыкания высокочастотных токов.

Inertia

All moving (rotating) parts of a drive train are characterized with their own inertia. There can be calculated a combined inertia of several mechanically connected parts – for example “rotor + coupling + driven mechanism”. To calculate combined inertia of the drive train without gearboxes inertias of the drive train's parts are simply summed up. A gearbox changes the inertia in the system and, from the operation point of view the gearbox may play both a positive and a negative role. Possible system level considerations are presented below with the help of the four cases related to operation of a tidal turbine and a winch. The drive trains in the four cases include a gearbox, an electric machine and a brake (Fig.1).

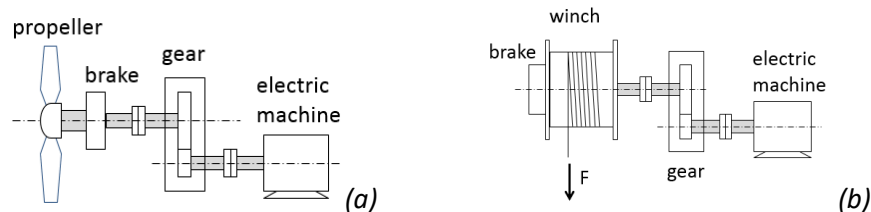


Fig. 1. Mechanical drive trains for a tidal turbine (a) and a winch (b).

Рис.1. Механическая система привода для приливной турбины (a) и лебедки (b).

Case 1. Critical acceleration of a tidal turbine at grid loss

In case of grid loss the turbine should be braked. Before the mechanical brake is applied, the propeller will accelerate extremely fast if the system inertia is low. When analyzing the inertia in a system with a gearbox one could divide the train into two “parts” or “sides”: the “first” - where the force of the water stream is applied, and the “second” – which is counteracting the force. The gearbox usually belongs to the “second” side. Since in our case the action is performed by the water acting on the propeller trying to accelerate it, therefore, it is useful

Момент инерции

Все движущиеся (вращающиеся) части системы привода характеризуются своими моментами инерции. По ним можно рассчитать полный момент инерции механически соединенных частей привода, например, “*ротор + муфта + приводной механизм*”. При расчете полного момента инерции системы привода без редукторов достаточно просто просуммировать моменты инерции соединенных последовательно частей. Редуктор изменяет момент инерции системы и с точки зрения ее эксплуатации редуктор может играть как положительную, так и отрицательную роль. Общие соображения о полезности редуктора с точки зрения всей системы представлены ниже на четырех примерах, касающихся работы приливной турбины и лебедки. Во всех примерах система привода содержит редуктор, электрическую машину и тормоз (рис.1).

Случай 1. Критическое ускорение приливной турбины при внезапном отключении от сети

При внезапном отключении сети турбина должна быть заторможена. Но до срабатывания механического тормоза пропеллер турбины может ускоряться чересчур быстро, если момент инерции системы мал. При анализе момента инерции системы, содержащей редуктор, необходимо разделить систему привода на две части или две стороны системы: первая часть, к которой приложена сила потока воды, и вторая часть, которая

to look at the system “from the propeller side” as in Fig.2.

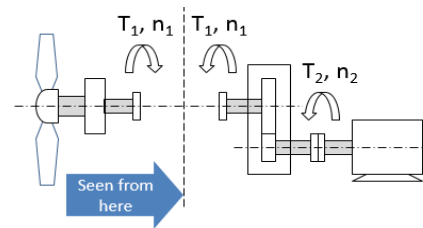


Fig. 2. Torques and inertia seen by the propeller.

Рис.2. Вращающие моменты и момент инерции со стороны пропеллера.

When the electric machine (generator) is in “off”-state e.g. due to a failure and cannot produce any torque outbalancing the force acting on the blades, acceleration can be limited only by the dynamic torque, corresponding to the system inertia “seen” by the propeller. The dynamic torque is defined by the inertia:

$$T_d = J(d\omega/dt).$$

The propeller “sees” the gearbox and the generator as a one whole with the total inertia of $J = J_p + J_g = J_p + i^2 J_r$, where J_p is moment of inertia of the propeller itself and i is gear ratio.

It can be seen that the gearbox plays a positive role as it increases the inertia “seen” by the propeller and as the consequence it increases the dynamic torque resisting the propeller acceleration: $T_d = (J_p + i^2 J_r)(d\omega_1/dt)$, where $\omega_1 = n/9.55$.

This positive effect is higher for higher gear ratio.

противодействует этой силе. Редуктор обычно относится ко второй части. Поскольку в нашем случае действие совершается потоком воды, воздействующим на пропеллер турбины и пытающимся ускорить его вращение, следует взглянуть на систему со стороны пропеллера, как показано на рис. 2.

Если электрическая машина (генератор) находится в выключенном состоянии, например, из-за аварии, и не может создавать момент, противодействующий силе давления потока воды на лопатки турбины, ускорение может быть ограничено только динамическим моментом, соответствующим моменту инерции системы со стороны пропеллера. Динамический момент определяется моментом инерции как:

$$T_d = J(d\omega/dt).$$

Пропеллер воспринимает редуктор и ротор генератора как одно целое с общим моментом инерции $J = J_p + J_g = J_p + i^2 J_r$, где J_p – момент инерции собственно пропеллера, а i – передаточное число редуктора.

Можно заметить, что в данном случае редуктор играет положительную роль, увеличивая общий момент инерции со стороны пропеллера и, следовательно, увеличивая динамический момент, препятствующий ускорению пропеллера: $T_d = (J_p + i^2 J_r)(d\omega_1/dt)$, где $\omega_1 = n/9.55$.

Case 2. Stream turbulence in normal operation of tidal turbine

Underwater waves hitting the blades create stresses on the elements of the mechanical drive train. Low system inertia “seen by the propeller” will be an advantage as it lets the generator “to give a slack” to absorb the “hit” by letting the propeller to accelerate a bit and then bring it back to the right speed. However, the torque that the accelerating blades will experience is the sum of the electromagnetic torque applied by the generator and the mechanical dynamic torque: $T=T_e+T_d$, where the dynamic torque is $T_d=(J_p+i^2J_r)(d\omega_1/dt)$.

Dynamic torque gets higher when the gear ratio increases. It will increase “stiffness” of the system and will lead to higher stresses on the mechanical components. Therefore, a gearbox with a high gear ratio plays a negative role.

Case 3. Accelerating and braking the winch with the electric machine

Permanent acceleration and braking is typical for example in active heave compensation winch deploying ROV, which is moving with the waves.

When accelerating or braking the system, the electric machine, being the “actor” “sees” the winch and the gear as a whole (Fig.3,a). The machine should provide the torque high enough to overcome the total system inertia. The system inertia is made by the winch drum inertia “seen through the gearbox”

Этот положительный эффект редуктора тем выше, чем больше его передаточное отношение.

Случай 2. Поток турбулентности при нормальной работе приливной турбины

Подводные волны турбулентности ударяют по лопастям турбины, создавая дополнительные нагрузки на элементы механической системы привода. Малый момент инерции системы со стороны пропеллера будет в данном случае преимуществом, поскольку он позволит генератору «дать слабину», гася удар, чтобы пропеллер мог несколько ускориться и затем вернуться к нормальной скорости. Однако, момент, действующий на пропеллер в процессе такого разгона, представляет собой сумму электромагнитного момента генератора и механического динамического момента: $T=T_e+T_d$, где динамический момент равен $T_d=(J_p+i^2J_r)(d\omega_1/dt)$.

При увеличении передаточного отношения редуктора динамический момент возрастает. Это повышает жесткость механической системы и приводит к повышенным нагрузкам механических компонентов. Так что, редуктор с большим передаточным отношением всегда играет негативную роль.

Случай 3. Ускорение и торможение лебедки с помощью электрической машины

Постоянное ускорение и торможение является типичным действием, например, для случая активной компенсации тяги лебедки, трос которой движется рывками.

При ускорении или торможении системы электрическая машина, как активный элемент воздействия, воспринимает лебедку и редуктор как одно целое (рис.3,а). Машина должна создавать достаточно большой момент, чтобы преодолевать общий момент инерции. Момент инерции системы образован моментом инерции барабана со стороны редуктора и

and own inertia of the electric machine (rotor inertia): $J=J_g+J_r$.

The winch drum inertia “seen through the gearbox” is given by the winch drum’s own inertia (defined by mass and radius of the drum) and the gear ratio i (taken in power 2): $J_g=J_w/i^2$, where $i=n_2/n_1$.

We assume that $i>1$ and electric machine speed higher than winch speed.

So, the total inertia the machine is to overcome when accelerating is $J_g=J_w/i^2+J_r$.

It means that when the gear ratio is high (order of 1:100) it is practically only the machine’s own inertia that matters. For acceleration and deceleration it is also beneficial to have low torque requirement for the machine, which is provided by the gearbox: $T_2=T_1/n$.

So, the gearbox plays a positive role.

собственным моментом инерции электрической машины (ее ротора): $J=J_g+J_r$.

Момент инерции барабана лебедки со стороны редуктора образован собственным моментом инерции барабана (который определяется массой и радиусом барабана) и передаточным отношением редуктора i (во второй степени): $J_g=J_w/i^2$, где $i=n_2/n_1$.

Предположим, что $i>1$ и скорость электрической машины больше скорости лебедки.

В этом случае общий момент инерции, который должна преодолевать электрическая машина при ускорении, равен $J_g=J_w/i^2+J_r$.

Это означает, что при большом передаточном отношении (порядка 1:100) существенным оказывается лишь собственный момент инерции машины. Для ускорения и торможения выгодно также иметь низкий крутящий момент электрической машины, что обеспечивается редуктором: $T_2=T_1/n$.

Так что, редуктор играет положительную роль.

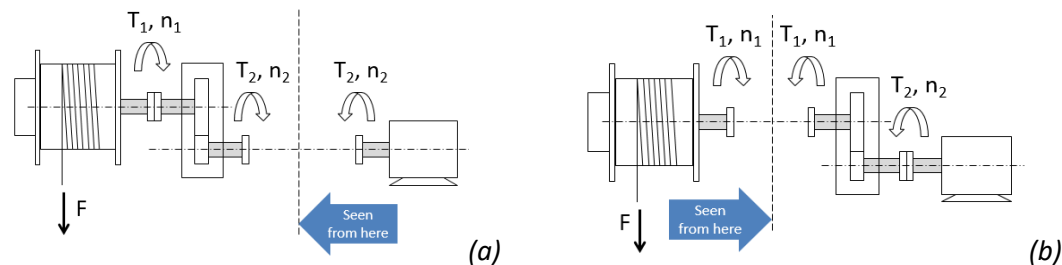


Fig. 3. Torques and inertia seen by the motor (a) and the winch (b).

Рис.3. Моменты и момент инерции с точки зрения двигателя (a) и лебедки (b).

Case 4. Winch braking when the electric machine fails

When the electric machine fails (e.g. short-circuit) the winch should be braked with the mechanical brake. Analyzing the problem it is correct to “see” the system from the winch side since the brake located at the winch drum is the “actor” applying the braking force (Fig. 3,b). The brake “sees” the gearbox and the machine as a whole with inertia equal to $J = J_w + J_g = J_w + i^2 \cdot J_r$

“Dynamic” braking power is defined by the dynamic torque:

$$P_d = T_d \cdot \omega_1 = (J_w + i^2 \cdot J_r) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \cdot \omega_1, \text{ where } \omega_1 = \frac{n_1}{9.55}.$$

The required braking power P_d will be sizing the brake. So, the gearbox plays a negative role, increasing the inertia.

Conclusions

Having gone through the four cases we can conclude that there is always a trade-off between positive and negative sides and the system designer should look for the optimal gear ratio.

Случай 4. Торможение лебедки при отказе электрической машины

При отказе электрической машины (например, из-за короткого замыкания) лебедка должна быть остановлена с помощью механического тормоза. Для анализа проблемы следует рассматривать систему привода со стороны лебедки, поскольку механический тормоз расположен на барабане лебедки и является активным элементом, создающим тормозное усилие (рис. 3,b). Тормоз воспринимает редуктор и машину как одно целое с полным моментом инерции, равным $J = J_w + J_g = J_w + i^2 \cdot J_r$

Динамическая мощность торможения определяется динамическим моментом:

$$P_d = T_d \cdot \omega_1 = (J_w + i^2 \cdot J_r) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \cdot \omega_1, \text{ где } \omega_1 = \frac{n_1}{9.55}.$$

Требуемая динамическая мощность торможения P_d будет определять необходимый размер тормоза. Здесь редуктор играет отрицательную роль, увеличивая момент инерции.

Выводы

Рассмотрев четыре случая, можно сделать вывод о том, что всегда следует искать компромисс между положительными и отрицательными сторонами влияния редуктора на систему и искать оптимальное передаточное отношение.