

# ***DriveConstructor***

<https://driveconstructor.com/>

EXERCISE BOOK in English and Russian    ЗАДАЧНИК 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

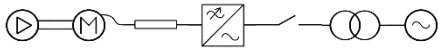
**2018**

## Contents Содержание

EM-1. Voltage level and insulation	ЭМ-1. Уровень напряжения и изоляция
EM-2. Rated speed vs weight, size, inertia	ЭМ-2. Влияние номинальной скорости на вес, размер и момент инерции машины
EM-3. Efficiency class, lifecycle analysis	ЭМ-3. Класс эффективности, анализ жизненного цикла машины
EM-4. Comparison of technologies	ЭМ-4. Сравнение типов машин
EM-5. Protection (IP class) vs size and cost	ЭМ-5. Влияние класса защиты (IP) на размер и стоимость машины
EM-6. Cooling vs size and cost	ЭМ-6. Влияние способа охлаждения на размер и стоимость машины
EM-7. Derating for altitude and temperature	ЭМ-7. Снижение мощности в зависимости от высоты и температуры
EM-8. Frame material vs size and cost	ЭМ-8. Влияние материала корпуса на размер и стоимость машины
EM-9. Shaft height and mounting	ЭМ-9. Высота оси вращения и способ монтажа
EM-10. Thermal capacity & insulation class	ЭМ-10. Теплоемкость и класс изоляции
FC-1. 2Q vs 4Q solutions	ПЧ-1. 2-квadrантные или 4-квadrантные схемы управления
FC-2. Topology and voltage level	ПЧ-2. Схема и уровень напряжения преобразователя
FC-3. Cooling vs weight and size	ПЧ-3. Влияние способа охлаждения на вес и размер преобразователя
FC-4. Derating for altitude and temperature	ПЧ-4. Снижение мощности ПЧ в зависимости от высоты и температуры
FC-5. Overloads	ПЧ-5. Перегрузки
FC-6. Mounting and protection	ПЧ-6. Способ установки и класс защиты
SYS-1. Rated speed vs weight, size & cost	Система-1. Влияние скорости на вес, размер и стоимость
SYS-2. Design for short and wide speed ranges	Система-2. Варианты для маленького и большого диапазона скоростей
SYS-3. Harmonics distortion	Система-3. Гармонические искажения
SYS-4. System design	Система-4. Проектирование системы
SYS-5. Influence of gearbox types	Система-5. Влияние типа редуктора
SYS-6. Filters, cable length and losses	Система-6. Фильтры, длина кабелей и потери
P-1. Design for different pump types	Насос-1. Системы с различными типами насосов
P-2. Design for lowest system cost	Насос-2. Система с наименьшей стоимостью
P-3. Design for highest energy efficiency	Насос-3. Система с наибольшей энергетической эффективностью
P-4. Design for lowest life cycle cost	Насос-4. Система с наименьшей стоимостью жизненного цикла
P-5. Design for constrained space	Насос-5. Система в ограниченном пространстве
P-6. Design for special environmental conditions	Насос-6. Система, отвечающая специальным условиям окружающей среды
C-1. Design for constrained space	Конвейер-1. Система привода в ограниченном пространстве
C-2. Design for applications with different duties	Конвейер-2. Система привода для применений с разным рабочим циклом
C-3. Design for applications with different overloads	Конвейер-3. Система привода для применений с различными нагрузками
C-4. Design for lowest system cost	Конвейер-4. Система с наименьшей стоимостью
C-5. Design for long and short cables	Конвейер-5. Система с длинными и короткими кабелями
WT-1. Top head mass reduction for floating wind turbines	Ветряная турбина-1. Снижение массы установленного наверху оборудования в

WT-2. Drive train optimization for on-land wind turbine	плавающей ветряной турбине Ветряная турбина-2. Оптимизация системы привода для наземной ветровой турбины
WT-3. Inertia of the drive train as protection against tidal turbine runaway	Ветряная турбина-3. Использование момента инерции системы привода для защиты от ускорения приливной турбины
WT-4. Cost of Energy (COE) analysis for ocean and river TT	Турбина-4. Сравнение стоимости энергии (СЭ) океанской и речной приливной турбины
WT-5. Small high-speed WT	Ветровая турбина-5. Небольшая высокоскоростная турбина
W-1. Drive train for the winder	Лебедка-1. Система привода для намоточного устройства
W-2. Designing the winch drum and drive train for low cost	Лебедка-2. Разработка барабана лебедки и системы привода с наименьшей стоимостью
W-3. Inertia in the winch drive train	Лебедка-3. Момент инерции в системе привода лебедки

## EM-1. Voltage level and insulation



Investigate influence of the rated voltage level on size and cost of the electric motors by working with the system consisting of a motor and a frequency converter. Take PUMP as the application and design the drive systems for the four sets of pump parameters:

1. head 200 m, flow 85 l/s, efficiency 85%, rated speed 2950 rpm;
2. head 200 m, flow 145 l/s, efficiency 85%, rated speed 2950 rpm;
3. head 200 m, flow 200 l/s, efficiency 85%, rated speed 2950 rpm.

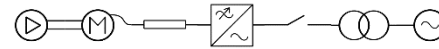
Set motor type to *SCIM*, cooling to *IC411*, efficiency class to *IE3*, protection to *IP21*. Design the drive system so that machine and converter voltage is around 400 V, then 690 V, then 3300 V and, finally, 6000 V.

- [!] Make sure you keep machine type, efficiency class, cooling, protection class and other parameters except voltage and power the same for all the cases above. Include these parameters in your report.

Record power, weight and cost of motors for the three pumps above and for the four voltages. Present the results as a chart or a table, draw conclusions.

Can you explain the results/conclusions as the electric machines designer, in terms of winding design (insulation, cooling)?

## ЭМ-1. Уровень напряжения и изоляция



Исследовать влияние уровня номинального напряжения на размер и стоимость электрических двигателей, работающих в одной системе привода с преобразователем частоты. В качестве применения выбрать Насос и разработать четыре системы привода со следующими параметрами насоса:

1. напор 200 м, расход 85 л/с, КПД 85%, номинальная скорость 2950 об/мин;
2. напор 200 м, расход 145 л/с, КПД 85%, номинальная скорость 2950 об/мин;
3. напор 200 м, расход 200 л/с, КПД 85%, номинальная скорость 2950 об/мин.

А качестве двигателя выбрать АМ с типом охлаждения *IC411*, классом эффективности *IE3*, классом защиты *IP21*. Спроектировать систему привода таким образом, чтобы напряжение машины и конвертора было 400 В, затем 690 В, затем 3300 В и, наконец, 6000 В.

- [!] Для всех случаев следует сохранять тип машины, класс эффективности, тип охлаждения, класс защиты и прочие параметры, кроме напряжения и мощности. Указать эти параметры в отчете.

Записать мощность, вес и стоимость двигателей для всех трех насосов и четырех вариантов напряжения. Представить результаты в виде графика или таблицы, написать заключение.

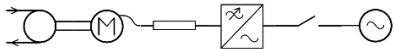
Как объяснить полученные результаты/выводы с точки зрения проектировщика электрических машин, с точки зрения выбора обмотки (изоляция, охлаждение)?

## EM-2. Rated speed vs weight, size, inertia

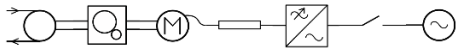
You are chief engineer responsible for powering a new conveyor. You have three helical gearboxes available at the plant's stock: two 1-stage gears with ratios 1:4 and 1:6, and one 2-stage gear (ratio 1:12). You can buy a motor to match the gearbox or a motor that fits speed of the conveyor without any gearbox.

Consider two system architectures; with gearbox and without one (direct drive).

### System 1:



### System 2:



For the systems 1 and 2 above investigate influence of the gear ratio on size, cost and inertia of electric motor.

- *Take system 1.*
  - Set conveyor drum max speed to 230 rpm and min speed to 80 rpm.
  - Torque = 9 kNm.
  - Take the machine with synchronous speed to 300 rpm @ 50 Hz.
  - Record weight, cost and inertia of the chosen motor.
- *Take system 2.*
  - Set conveyor drum speed to 230 rpm and min speed to 80 rpm.
  - Torque = 9 kNm.
  - Record speed, weight, cost and inertia of motors for the following gearbox ratios: 4, 6 and 12.

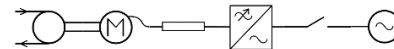
Summarize in results in a table. Explain what you see, draw conclusions. Can you

## ЭМ-2. Влияние номинальной скорости на вес, размер и момент инерции машины

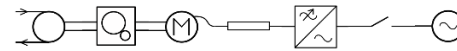
Вам, как главному инженеру, предстоит обеспечить работу нового конвейера. У вас на складе есть три косозубых редуктора: два 1-ступенчатых редуктора с передаточными отношениями 1:4 и 1:6 и один 2-ступенчатый редуктор (передаточное отношение 1:12). Вы можете купить двигатель, который соответствует редуктору, или двигатель, который соответствует скорости конвейера без использования редуктора.

Рассмотреть две схем системы привода: с редуктором и без него (прямой привод).

### Система 1:



### Система 2:



Для систем 1 и 2 изучить влияние передаточного отношения редуктора на размер, стоимость и момент инерции двигателя.

- *Для системы 1.*
  - Максимальная скорость барабана конвейера 230 об/мин, минимальная скорость 80 об/мин.
  - Момент – 9 кНм.
  - Выбрать машину с синхронной скоростью 300 об/мин при частоте сети 50 Гц.
  - Записать вес, стоимость и момент инерции выбранного двигателя.
- *Для системы 2.*
  - Максимальная скорость барабана конвейера 230 об/мин,

explain the results/conclusions as the electric machine designer?

*Use PM machines only!*

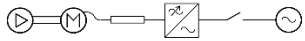
минимальная скорость 80 об/мин.

- Момент – 9 кНм.
- Записать скорость, вес, стоимость и момент инерции двигателей при использовании редукторов с передаточными отношениями: 4, 6 и 12.

Представить результаты в таблице. Объяснить полученные результаты, записать сделать выводы. Как объяснить полученные результаты / выводы с точки зрения проектировщика электрических машин?

*Использовать только машины с постоянными магнитами!*

## EM-3. Efficiency class, lifecycle analysis



You are a chief engineer at a plant. Consider replacement of old induction motor (cooling IC411, protection IP21) on a centrifugal pump with either IE3 motor or IE4 motor. The old motor has efficiency corresponding to IE2. Available grid – 400 V. The existing motor is driven by an FC.

Pump parameters: *head* 50 m, *flow* 50 l/s, *efficiency* 82%, *speed* 1450 rpm.

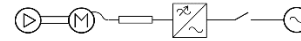
Operational mode of the pump:

- operation at 25% load 70% of time and at rated load - 30% of time

Find LCC (cost of ownership) for all the alternatives

- Energy price - 0,07 Euro/kWh (another variant 0,2 Euro/kWh)
- Operational time – 8000 hours/year
- Service life – 5 years (another variant 10 years)

## ЭМ-3. Класс эффективности, анализ жизненного цикла машины

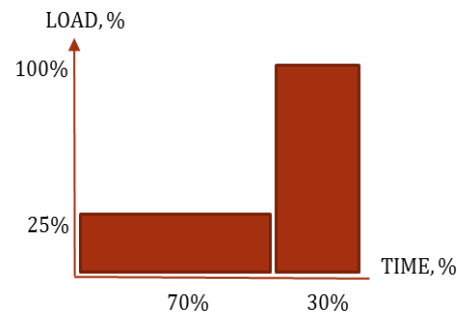


В качестве главного инженера завода вам следует рассмотреть варианты замены старого асинхронного двигателя (тип охлаждения IC411, класс защиты IP21) на центробежном насосе новым двигателем с классом эффективности IE3 или IE4. Класс эффективности старого двигателя соответствует IE2. Доступная сеть – 400 В. Существующий двигатель получает питание через преобразователь частоты.

Параметры насоса: *напор* 50 м, *расход* 50 л/с, *КПД* 82%, *скорость* 1450 об/мин.

Режим работы насоса:

- В течение 70% времени – работа на 25% номинальной нагрузки и 30% времени – на полной номинальной нагрузке.



Найти LCC (стоимость владения) для всех вариантов

- Стоимость электроэнергии – 0,07 Евро/кВтч (другой вариант – 0,2 Евро/кВтч)
- Рабочее время – 8000 час/год
- Срок службы – 5 лет (другой вариант – 10 лет)

So, there are all together eight variants to consider:

1. IE3 motor, Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 5 years
2. IE3 motor, Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 10 years
3. IE3 motor, Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 5 years
4. IE3 motor, Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 10 years
5. IE4 motor, Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 5 years
6. IE4 motor, Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 10 years
7. IE4 motor, Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 5 years
8. IE4 motor, Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 10 years

What motor (IE3 or IE4) would you choose for each of the four scenarios?

1. Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 5 years
2. Energy price - 0,07 Euro/kWh, Service life – 10 years
3. Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 5 years
4. Energy price - 0,2 Euro/kWh, Service life – 10 years

What general conclusion can you draw on dominating cost components?

Итого, получается 8 вариантов:

1. Двигатель IE3, стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
2. Двигатель IE3, стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет
3. Двигатель IE3, стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
4. Двигатель IE3, стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет
5. Двигатель IE4, стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
6. Двигатель IE4, стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет
7. Двигатель IE4, стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
8. Двигатель IE4, стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет

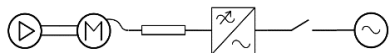
Какой двигатель (класса эффективности IE3 или IE4) выберете для каждого из 4 сценариев:

1. Стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
2. Стоимость энергии – 0,07 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет
3. Стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 5 лет
4. Стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч, срок службы – 10 лет

Какой общий вывод можно сделать по стоимости компонентов системы?



## EM-4. Comparison of technologies



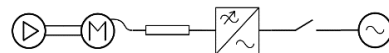
Design drive train for a pump (*head 50 m, flow 50 l/s, efficiency 82%, speed 1450 rpm*).

Operational mode of the pump: operation at 25% load 70% of time and at rated load - 30% of time

Try *SCIM (IE2)*, *SyRM*, *PMSM* as the motor type. Calculate Life Cycle Cost (LCC) for each motor variant. Compare the variants on spider diagram. Consider strong and weak sides of the technologies.

- Energy price - 0,2 Euro/kWh
- Operational time – 8000 hours/year
- Service life – 10 years

## ЭМ-4. Сравнение типов машин

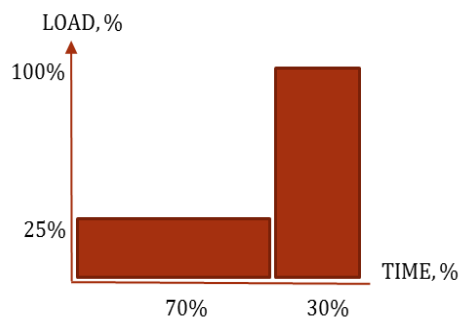


Выбрать систему привода для насоса (*напор 50 м, расход 50 л/с, КПД 82%, скорость 1450 об/мин*).

Режим работы насоса: в течение 70% времени работает при 25% от номинальной нагрузки и 30% времени – при полной номинальной нагрузке.

В качестве типа двигателя рассмотреть варианты *AM (IE2)*, *СРМ*, *СМПМ*. Рассчитать стоимость жизненного цикла (LCC) для каждого типа двигателя. Сравнить варианты на диаграмме паутинного типа. Рассмотреть сильные и слабые стороны каждого типа двигателя.

- Стоимость электроэнергии – 0,2 Евро/кВтч
- Время работы – 8000 час/год
- Срок службы – 10 лет



## EM-5. Protection (IP class) vs size and cost

Design drive trains for the four different applications below. Note different environmental conditions where the electric machines will be operating and choose correct IP class for the machines.

Set the same rated speed (300 rpm) and the same voltage (690 V) in all applications. Set *PMSM* as the motor type.

- Case 1. Pump: dairy (for different trains)
  - $H=50$  m,  $Q=50$  l/s,  $\eta=79$  %, speed 300
- Case 2. Conveyor: cement plant
  - min speed - 100 rpm, max speed - 300 rpm, Torque - 0,9 kNm
- Case 3. Wind turbine: air-conditioned compartment(nacelle)
  - Rated speed - 200 rpm, overspeed - 1,2, Torque - 1 kNm
- Case 4. Winder: Clean paper winding room
  - Drum diameter (empty) - 0,3 m, Drum diameter (full) - 0,5 m, Force - 4 kN, Speed of the line (rated) - 3 m/s

Record: mechanism rated power, motor designation, IP class, weight and cost of the electric machines you have chosen for the four applications above. Make sure you keep cooling and other «influential» parameters the same. Include these parameters in your report. Comment on the differences between the motors chosen.

## ЭМ-5. Влияние класса защиты (IP) на размер и стоимость машины

Создать системы привода для четырех разных применений. Учесть разные условия работы электрических машин и выбрать соответствующий класс защиты (IP) машин.

Задать одинаковую номинальную скорость (300 об/мин) и одинаковое напряжение (690 В) для всех применений. Тип двигателя – *СМПМ*.

- Случай 1. Насос: молочное производство
  - $H=50$  м,  $Q=50$  л/с,  $\eta=79\%$ , скорость 300 об/мин
- Случай 2. Конвейер: цементный завод
  - Мин. скорость – 100 об/мин, макс. скорость – 300 об/мин, момент – 0,9 кНм
- Случай 3. Ветровая турбина: отсек с кондиционированным воздухом (гондола)
  - Номинальная скорость – 200 об/мин, превышение скорости – 1,2, момент – 1 кНм
- Случай 4. Намоточное устройство: чистая комната бумажного производства
  - Диаметр пустого барабана – 0,3 м, диаметр полного барабана – 0,5 м, усилие – 4 кН, скорость намотки (номинальная) – 3 м/с

Записать: номинальную мощность механизма, назначение двигателя, класс защиты, вес и стоимость выбранной электрической машины для каждого из четырех применений. Убедиться в том, что способ охлаждения и другие важные параметры выбраны одинаковыми. Включить эти параметры в отчет. Объяснить разницу между выбранными двигателями.

## EM-6. Cooling vs size and cost

Imagine you are chief engineer at a paper mill. Design drive train for the winder with given characteristics:

- Drum diameter (empty) - 0,3 m,
- Drum diameter (full) - 0,6 m,
- Force - 16 kN,
- Speed of the line (rated) - 5 m/s,
- 400 V,
- flange&foot mounting of the motor,
- cooling water 30 deg.C is available.

## ЭМ-6. Влияние способа охлаждения на размер и стоимость машины

В качестве главного инженера бумажной фабрики спроектируйте систему привода для намоточной машины с заданными характеристиками:

- Диаметр пустого барабана – 0,3 м,
- Диаметр полного барабана – 0,6 м,
- Усилие –16 кН,
- Скорость подачи (номинальная) – 5 м/с,
- Напряжение сети – 400 В,
- Способ крепления двигателя – с фланцем и на лапах
- Имеется охлаждающая вода с температурой 30°С.



Make sure you keep machine type and efficiency class the same when comparing cooling and protection class variants. Include these parameters in your report.

Solve the problem using power components with (1) air cooling, (2) water cooling. Compare the air-cooled and water-cooled variants. Present the results in the table.

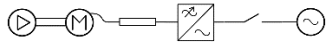
При сравнении разных вариантов по способу охлаждения и классу защиты предусмотреть одинаковый тип машины и класс эффективности. Включить эти параметры в отчет.

Для решения проблемы рассмотреть варианты с воздушным охлаждением (1) и жидкостным охлаждением (2). Сравнить между собой эти варианты. Результаты представить в таблице.

	Cooling	Protection	Weight	OD	Length	Cost
Case 1	IC411	IP54/55				
Case 2	IC416	IP54/55				
Case 3	IC411	IP21/23				
Case 4	IC71W					

	Способ охлаждения	Класс защиты	Вес	Наружный диаметр	Длина	Стоимость
Вариант 1	IC411	IP54/55				
Вариант 2	IC416	IP54/55				
Вариант 3	IC411	IP21/23				
Вариант 4	IC71W					

## EM-7. Derating for altitude and temperature



Sales manager of a big electric motor provider have received three very similar requests from Madrid, Mexico and El Alto. In each of the requests they need induction motor to drive a centrifugal pump with *head* 60 m, *flow* 50 l/s, *efficiency* 83% and *rated speed* of 950 rpm. The motor is to be operated from existing frequency converter which rated voltage of 400 V and power of 45 kVA. Distance between the pump and the FC is 30 m. Other conditions, e.g. cooling, are specified as well. Help the sales manager to make offers for Madrid/Mexico/El Alto. Propose more than one alternative if needed. Include only motors into the offers.



*Madrid, Spain, 667 m above sea level*  
*Мадрид, Испания, 667 м над уровнем моря*

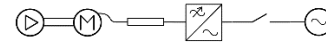


*Mexico, Mexico, 2240 m above sea level*  
*Мехико, Мексика, 2240 м над уровнем моря*



*El Alto, Bolivia, 4150 m above sea level*  
*Эль-Альто, Боливия, 4150 м над уровнем моря*

## ЭМ-7. Снижение мощности в зависимости от высоты и температуры



Менеджер по продажам крупной электротехнической компании получил три похожих заказа из городов Мадрид, Мехико и Эль-Альто. В каждом заказе требуется асинхронный двигатель для привода центробежного насоса с *напором* 60 м, *расходом* 50 л/с, *КПД* 83% и *номинальной скоростью* 950 об/мин. Двигатель должен питаться от существующего преобразователя частоты с номинальным напряжением 400 В и мощностью 45 кВА. Расстояние между насосом и преобразователем частоты составляет 30 м. Указаны и другие условия, типа способа охлаждения. Подготовить предложения по этим трем заказам для Мадрида, Мехико и Эль-Альто. При необходимости, предложить несколько вариантов. Предлагать только электродвигатели.

## EM-8. Frame material vs size and cost

Choose frame material suitable for the given environment.

### Case 1

Application - food & beverages (wet, acids, etc.)

Take CONVEYOR with drive system with just frequency converter.



Available information:

- One drum to be driven
- No overloads, duty cycle – 100%
- Dusty environment, abundant heat removal capability, wet floor
- Grid 400 V
- Distance between the driven drum of the conveyor and the FC (cable length) – 30 m
- Rated torque 500 Nm
- Speeds: min – 300, max - 400 rpm

### Case 2

Application - mining (dusty, mechanical shocks)

Take WINCH with drive system with just frequency converter.

Available information:

- empty drum diameter 0.2 m
- full drum diameter 0.3 m
- linear speed at which the cable is to be reeled on the drum - 1 m/s
- force/tension on the cable 2 kN
- grid voltage 400 V

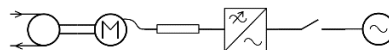
## ЭМ-8. Влияние материала корпуса на размер и стоимость машины

Выбрать материал корпуса в соответствии с заданной окружающей средой.

### Вариант 1

Область применения – пищевое производство (влажность, кислотность и т.д.)

Требуется конвейер с системой привода, содержащей только преобразователь частоты.



Задано:

- требуется вращать один барабан конвейера
- Рабочий цикл – 100% без перегрузок
- Пыльная среда, хорошие возможности для отвода тепла, влажный пол
- Сеть с напряжением 400 В
- Расстояние между барабаном конвейера и преобразователем частоты (длина кабеля) – 30 м
- Номинальный момент 500 Нм
- Скорости: минимальная – 300, максимальная - 400 об/мин

### Вариант 2

Область применения – горнодобывающая промышленность (грязь, ударные механические нагрузки)

Требуется лебедка с системой привода, содержащей только преобразователь частоты.

Задано:

- Диаметр пустого барабана 0.2 м
- Диаметр полного барабана 0.3 м
- Линейная скорость наматывания троса на барабан – 1 м/с

- no overloads

#### Case 3

Application – marine deck machinery (salty environment)

#### Case 4

Application – light/portable winch for a palette truck operating in a clean storage hall.

Draw conclusions.

- Усилие/натяжение троса 2 кН
- Сеть с напряжением 400 В
- Никаких перегрузок

#### Вариант 3

Область применения – морская палубная техника (соленая окружающая среда)

#### Вариант 4

Область применения – легкая/портативная лебедка для тележки, работающей на чистом складе.

Представить выводы.

## EM-9. Shaft height and mounting

There is an oil pump with  $Q=55$  l/s,  $H=50$  m, *efficiency* 82%, *speed* 1400 rpm.  
Conditions:

- Clean dry room with abundant heat removal capability.
- Grid 400 V.
- Cable length - 200 m.

The plan is to replace old *SCIM* driving the pump with IE4 motor. Shaft height of the old motor is 180 mm and the pump is fixed to the frame together with the motor. Is the replacement possible? Consider several variants. Compare them. First consider *SCIM* only. Then solve the problem using other motor types.

Note that density of oil is not the same as density of water.

## ЭМ-9. Высота оси вращения и способ монтажа

Имеется масляный насос с заданными параметрами:  $Q=55$  л/с,  $H=50$  м, *КПД* 82%, *скорость* 1400 об/мин. Условия работы:

- Чистое сухое помещение с хорошими условиями отвода тепла.
- Сеть с напряжением 400 В.
- Длина кабеля – 200 м.

Планируется замена старого приводного асинхронного двигателя насоса на двигатель класса эффективности IE4. высота оси вращения старого двигателя 180 мм, насос установлен на той же раме вместе с двигателем. Возможно ли найти замену? Рассмотреть несколько вариантов, сравнить их. Вначале рассматривать только АМ, затем другие типы машин.

Внимание, плотность масла отличается от плотности воды.





## EM-10. Thermal capacity & insulation class

Design drive trains for the two identical conveyors with parameters:

- Speed 200...230 rpm
- Rated torque - 9 kNm

One conveyor has duty of 100%, another one - 80%. Grid is 690 V.

Explain the difference in chosen electric machines for the two cases.

### Question-1

Could we have used even smaller machine on the second conveyor? If yes, what insulation class should it have had (assume all motors in *DriveConstructor* have insulation class "B")? If we use smaller machine with the same class "B" as before then what would be insulation lifetime (assume in normal load lifetime of 10000 hours)?

### Question-2

Is replacing the motor with insulation class "H" with another motor with insulation class "F" possible? What lifetime should be expected? What if insulation class "H" but temperature rise as for class "F"?

## ЭМ-10. Теплоемкость и класс изоляции

Спроектировать систему привода для двух одинаковых конвейеров со следующими параметрами:

- Скорость 200...230 об/мин
- Номинальный момент – 9 кНм

Один конвейер имеет рабочий цикл 100%, другой – 80%. Напряжение сети 690 В.

Объяснить разницу в выборе электрических машин для этих двух случаев.

### Вопрос 1

Нельзя ли использовать на втором конвейере машину еще меньше? Если да, то какой класс изоляции она должна иметь (в предположении, что все доступные двигатели в программе *DriveConstructor* имеют класс изоляции "B")? Если использовать меньшую машину с тем же классом изоляции "B", как изменится срок службы изоляции (в предположении, что нормальный срок службы составляет 10000 часов)?

### Вопрос 2

Можно ли заменить двигатель с классом изоляции "H" на другой двигатель с классом изоляции "F"? Каков будет срок службы? Что будет, если у изоляции класса "H" будет превышение температуры, как у класса "F"?

## FC-1. 2Q vs 4Q solutions

Design and compare drive trains for the two applications; a pump and a wind turbine.

### Pump

Drive train with just FC.

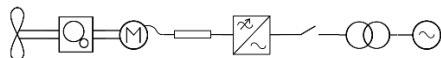


Set parameters:

- Rated flow 60 l/s, head 200 m, efficiency 81%, speed 600 rpm
- Grid voltage – 6000 V
- Clean electric room for the FC with abundant heat removal capabilities
- Distance from the electric room to the pump - 30 m

### Wind turbine

Drive train with gearbox, FC and transformer.



Set parameters:

- Blades rated speed 20 rpm, overspeed 1,2, torque 60 kNm, 2-stage gearbox with ratio 1:30
- Grid voltage – 6000 V
- Clean nacelle where the FC is installed with abundant heat removal capabilities

Use the same machine type (*SCIM*) in both cases and keep the same: air cooling, electric machine voltage around 690 V

Compare: size, weight, cost, efficiency of the FC and THD of the two cases. Draw conclusions.

## ПЧ-1. 2-квadrантные или 4-квadrантные схемы управления

Спроектировать и сравнить системы привода для двух применений: насос и ветровая турбина.

### Насос

Система привода только с преобразователем частоты.

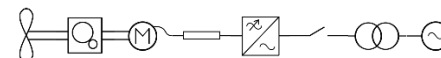


Параметры:

- Номинальный расход 60 л/с, напор 200 м, КПД 81%, скорость 600 об/мин
- Напряжение сети – 6000 В
- Чистая электрощитовая для ПЧ с хорошими условиями отвода тепла
- Расстояние от электрощитовой до насоса – 30 м

### Ветровая турбина

Система привода с редуктором, преобразователем частоты и трансформатором.



Параметры:

- Номинальная скорость вращения лопастей 20 об/мин, превышение скорости 1,2, момент 60 кНм, 2-ступенчатый редуктор с передаточным отношением 1:30
- Напряжение сети – 6000 В
- Чистая гондола для установки ПЧ с хорошими условиями отвода тепла

Для всех вариантов использовать машины одного типа (AM) и предусмотреть одинаковое воздушное охлаждение и напряжение питания машины 690 В

Сравнить размер, вес, стоимость, КПД преобразователя частоты и коэффициент нелинейных искажений. Сделать выводы.

## FC-2. Topology and voltage level

Imagine you are chief engineer at a large plant. You need to upgrade throttle regulated pumps driven by direct online started motors to speed-controlled systems with FC and without any throttles. You have available some motors on stock (imagine you have any motor you may need) but need to buy the FCs.

The pumps in question have different power: 0.5, 1, 2 and 5 MW.

1. head 210 m, flow 200 l/s, efficiency 85%, rated speed 1450 rpm;
2. head 210 m, flow 400 l/s, efficiency 85%, rated speed 1450 rpm;
3. head 420 m, flow 400 l/s, efficiency 85%, rated speed 1450 rpm;
4. head 800 m, flow 500 l/s, efficiency 85%, rated speed 1450 rpm.

Rated speed is the same – 1500 rpm. Grid – 6 kV. Distance between the pump and FC is 100 m.

Use the system topology with a transformer:



You have constrained budget so design the system for lowest possible cost. Present the results in a table.

Reflect on how power level affects the choice of voltage level. Is the choice determined by feasible cable cross-section?

Find overall system efficiencies at partial load (50%) for each of the three systems.

Extra question: you've got MV motor with accessible terminal box which can be connected either Y or D. When connected "Y" it can be fed 6000 V, when "D" - 3400 V. How this reconnection possibility may affect FC choice/opportunities?

## ПЧ-2. Схема и уровень напряжения преобразователя

В качестве главного инженера большого завода вам надо обновить насосы с дроссельным регулированием и приводными двигателями с прямым пуском на системы с регулированием скорости с преобразователем частоты и без дросселей. На складе имеется несколько двигателей (можно найти любой требуемый двигатель), но преобразователь частоты нужно покупать.

Насосы имеют различную мощность: 0.5, 1, 2 и 5 МВт.

1. напор 210 м, расход 200 л/с, КПД 85%, ном. скорость 1450 об/мин;
2. напор 210 м, расход 400 л/с, КПД 85%, ном. скорость 1450 об/мин;
3. напор 420 м, расход 400 л/с, КПД 85%, ном. скорость 1450 об/мин;
4. напор 800 м, расход 500 л/с, КПД 85%, ном. скорость 1450 об/мин.

Номинальная скорость одинаковая – 1500 об/мин. Сеть – 6 кВ. Расстояние между насосом и ПЧ равно 100 м.

Использовать схему привода с трансформатором:



Бюджет проекта ограничен, следует выбрать систему с наименьшей стоимостью. Представить результаты в таблице.

Показать, как мощность влияет на выбор уровня напряжения. Влияет ли на выбор вероятное сечение кабеля?

Найти общий КПД системы при частичной нагрузке (50%) для каждой из трех систем.

Дополнительный вопрос: в вашем распоряжении есть двигатель среднего напряжения с доступной коробкой выводов, в которой вы можете соединять обмотки в звезду или треугольник. При соединении в звезду можно подавать напряжение 6000 В, при треугольнике – 3400 В. Как такая возможность переключения повлияет на выбор преобразователя частоты и возможности системы?

### FC-3. Cooling vs weight and size

Imagine you are the sales manager at a factory producing frequency converters (FC). Answer the questions in the two requests (solve the two problems).

#### Request 1. FC for a pump

Pump parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, efficiency 81%, speed 1450 rpm

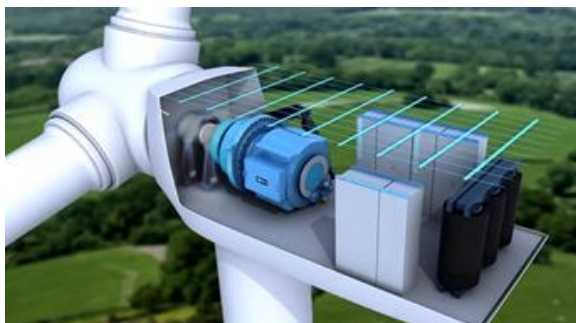
There is available a cubicle where the FC can be potentially placed. At the moment there is old motor starter in this cubicle to start this particular pump, so the idea is to replace the motor started with the new FC. Cubicle dimensions (Depth x Height x Width): 0,5 x 1,2 x 0,4 m. Cooling water is available. Will the new FC fit the cubicle?

#### Request 2. FC for a wind turbine

There is a plan to upgrade of the WT product line from 1 to 1,5 MW. This will require changing the blades design.

The new wind turbine: rated speed of the blades 20 rpm, overspeed 1,2, torque 750 kNm, 2-stage gearbox with ratio 1:30. Grid 6000 V.

The plan to reuse the same nacelle. Place available for the new FC (footprint 6 m<sup>2</sup>, volume 4 m<sup>3</sup>) remains the same as in the 1 MW nacelle. Former 1 MW drive train was air-cooled. It is decided to arrange water cooling, so air-to-water heat exchanger will be available (installed in the tower). Will the new 1,5 MW FC fit the available place?



### ПЧ-3. Влияние способа охлаждения на вес и размер преобразователя

Менеджеру по продажам завода по производству преобразователей частоты требуется ответить на две заявки (решить две задачи).

#### Заявка 1. ПЧ для насоса

Параметры насоса:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД 81%, скорость 1450 об/мин

Имеется электрический шкаф для потенциального размещения ПЧ. В настоящий момент он занят старым пусковым устройством для приводного двигателя насоса и предполагается использовать этот шкаф для размещения ПЧ вместо пускового устройства. Размеры шкафа (Глубина x Высота x Ширина): 0,5 x 1,2 x 0,4 м. Имеется охлаждающая жидкость. Поместится ли новый ПЧ в этот шкаф?

#### Заявка 2. ПЧ для ветровой турбины

Предполагается провести обновление продуктовой линейки ветровых турбин мощностью от 1 до 1,5 МВт. Это потребует изменения конструкции лопастей.

Новая ветровая турбина имеет параметры: номинальная скорость лопастей 20 об/мин, превышение скорости 1,2, момент 750 кНм, 2-ступенчатый редуктор с передаточным отношением 1:30. Напряжение сети 6000 В.

Желательно использовать прежнюю гондолу. Место для размещения нового ПЧ (площадь 6 м<sup>2</sup>, объем 4 м<sup>3</sup>) остается то же, что и в гондоле турбины на 1 МВт. Старая система привода на 1 МВт использовала воздушное охлаждение. Решено применить водяное охлаждение, для чего в башне будет расположен теплообменник воздух-вода. Поместится ли новый ПЧ на 1,5 МВт в той же гондоле?

## FC-4. Derating for altitude and temperature

You have three requests which look identical from Madrid, Mexico and El Alto. In each of the request they need frequency converter to drive 45 kW induction motor driving a pump (centrifugal pump with head 60 m, flow 50 l/s, efficiency 83% and rated speed of 950 rpm). The motor is drawing current of 40 A at a voltage of 400 V. Distance between the pump and the FC is 30 m. Other conditions are specified as well. Make offers for Madrid/Mexico/El Alto. Propose more than one alternative if needed. Include only FC into the offers.



*Madrid, Spain, 667 m above sea level*  
*Мадрид, Испания, 667 м над уровнем моря*



*Mexico, Mexico, 2240 m above sea level*  
*Мехико, Мексика, 2240 м над уровнем моря*



*El Alto, Bolivia, 4150 m above sea level*  
*Эль-Альто, Боливия, 4150 м над уровнем моря*

Additional question: Can we compensate high altitude with lower temperature of the coolant?

## ПЧ-4. Снижение мощности ПЧ в зависимости от высоты и температуры

У вас есть три одинаковые заявки из Мадрида, Мехико и Эль-Альто. В каждом случае требуется ПЧ для питания 45 кВт асинхронного двигателя насоса (центробежный насос с напором 60 м, расходом 50 л/с, КПД 83% и номинальной скоростью 950 об/мин). Двигатель потребляет ток 40 А при напряжении 400 В. Расстояние между насосом и ПЧ составляет 30 м. Остальные условия также заданы. Подготовьте предложения для Мадрида / Мехико / Эль-Альто. При необходимости, предложите несколько вариантов. Предлагайте только преобразователи частоты.

Дополнительный вопрос: можно ли компенсировать большую высоту над уровнем моря более низкой температурой охлаждающей жидкости?

## FC-5. Overloads

Design drive trains for the six different conveyors. Each conveyor is to be driven by one motor. System topology is the same for all the conveyors: gearbox 1:5 (type: helical). Grid voltage is 400 V.



Parameters (the same for all the conveyors):

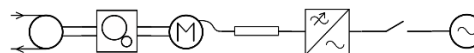
- torque 10 kNm, speeds: min - 100 rpm, max - 200 rpm.

The difference between the conveyors is in the overload patterns according to the table below. Conveyors 1-4 have overload due to technological processes. Conveyors 5 and 6 have overload due to heavy start. Reflect on motor thermal cycling.

Overloads	1	2	3	4	5	6
Amplitude	10%	10%	50%	50%	100%	100%
Duration	1 min each 10 min	1 min each 2 min	1 min each 10 min	1 min each 2 min	2 s each 60 s	10 s each 60 s
FC type						
FC price						
EM type						
EM price						

## ПЧ-5. Перегрузки

Спроектировать системы привода для 6 разных конвейеров. Каждый конвейер приводится в действие одним двигателем. Схема системы привода одинакова для всех вариантов: редуктор 1:5 (тип: косозубый). Напряжение сети 400 В.



Параметры (одинаковые для всех конвейеров):

- момент – 10 кНм, скорости: минимальная – 100 об/мин, максимальная – 200 об/мин.

Разница между конвейерами заключается в характере перегрузки, как показано в таблице ниже. Конвейеры 1-4 имеют перегрузки по технологическим соображениям. Конвейеры 5 и 6 имеют перегрузку из-за тяжелых условий пуска. Это отражается на цикле нагрева двигателя.

Перегрузка	1	2	3	4	5	6
амплитуда	10%	10%	50%	50%	100%	100%
длительность	1 мин каждые 10 мин	1 мин каждые 2 мин	1 мин каждые 10 мин	1 мин каждые 2 мин	2 с каждые 60 с	10 с каждые 60 с
Тип ПЧ						
Цена ПЧ						
Тип ЭМ						
Цена ЭМ						

## FC-6. Mounting and protection

Imagine you are the sales manager of frequency converter (FC) manufacturer company. Make four offers to the customers requesting FC for the four applications.

### *Request 1: Pump to a dairy*

- Parameters:
  - Rated flow 50 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%, speed 1450 rpm
  - Grid voltage – 400 V, distance from the electric room to the pump - 30 m
- Environment: moist, wet floor

### *Request 2: Oil pump (inflammable oil)*

- Parameters:
  - Rated flow 55 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%, speed 1450 rpm
  - Grid voltage – 400 V, distance from the electric room to the pump - 30 m
- Environment: clean

### *Request 3: Conveyor at a cement plant*

- Parameters:
  - Speeds: min – 150, max - 200 rpm
  - Rated torque - 5 kNm
  - Grid voltage – 400 V
  - Gearbox 1:5
  - Distance from the electric room to the conveyor - 30 m
- Environment: cement dust

## ПЧ-6. Способ установки и класс защиты

Вам как менеджеру по продажам компании, производящей преобразователи частоты, предстоит сделать 4 предложения заказчикам в ответ на запрос ПЧ для 4 применений.

### *Заявка 1: Молочный насос*

- Параметры:
  - Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%, скорость 1450 об/мин
  - Напряжение сети – 400 В, расстояние между электрощитовой и насосом – 30 м
- Окружающая среда: влажность, мокрый пол

### *Заявка 2: Масляный насос (легковоспламеняющееся масло)*

- Параметры:
  - Номинальный расход 55 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%, скорость 1450 об/мин
  - Напряжение сети – 400 В, расстояние между электрощитовой и насосом – 30 м
- Окружающая среда: чистая

### *Запрос 3: Конвейер для цементного завода*

- Параметры:
  - Скорости: минимальная – 150, максимальная – 200 об/мин
  - Номинальный момент – 5 кНм
  - Напряжение сети – 400 В
  - Редуктор с передаточным числом 1:5
  - Расстояние между электрощитовой и конвейером – 30 м
- Окружающая среда: цементная пыль

*Request 4: Conveyor at a clean factory*

- Parameters:
  - Speeds: min – 150, max - 200 rpm
  - Rated torque - 5 kNm
  - Grid voltage – 400 V
  - Gearbox 1:5
  - Distance from the electric room to the conveyor - 30 m
- Environment: clean, dry

Reflect on how degree of protection (IP) affects size and cost of the equipment. Present the results and the table:

Case	1	2	3	4
application	water pump, dairy	oil pump	conveyor, cement	conveyor, clean room
IP	2x or 5x	2x or 5x	2x or 5x	2x or 5x
mounting	wall or floor	wall or floor	wall or floor	wall or floor
FC type	?	?	?	?
FC cost	?	?	?	?

*Заявка 4: Конвейер на чистом производстве*

- Параметры:
  - Скорости: минимальная – 150, максимальная – 200 об/мин
  - Номинальный момент – 5 кНм
  - Напряжение сети – 400 В
  - Редуктор с передаточным числом 1:5
  - Расстояние между электрощитовой и конвейером – 30 м
- Окружающая среда: чисто, сухо

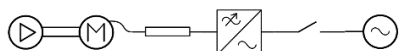
Покажите, как класс защиты (IP) влияет на размер и стоимость оборудования. Представьте результаты в таблице:

Вариант	1	2	3	4
Применение	Водяной насос, молочное производство	Масляный насос	Конвейер, цементное производство	Конвейер, чистое помещение
IP	2x или 5x	2x или 5x	2x или 5x	2x или 5x
Способ монтажа	Стена или пол	Стена или пол	Стена или пол	Стена или пол
Тип ПЧ	?	?	?	?
Стоимость ПЧ	?	?	?	?



## SYS-1. Rated speed vs weight, size & cost

For the system driving a pump and consisting of a motor and a frequency converter investigate how chosen rated speed of the machine affects it's weight, size and cost.



Design the system with the following parameters:

- Pump: rated flow 100 l/s, head 110 m, pump efficiency 86%, speed 1100 rpm,
- Motor type SCIM, cooling IC411,
- Grid voltage 400 V.

First choose machine with the synchronous speed of 1000 rpm. Record weight and cost of motor and of frequency converter.

As the alternative variant choose machine with synchronous speed of 1500 rpm. Record weight and cost of motor and of frequency converter.

Compare weights and costs of the two motors (1000 and 1500 rpm), then compare costs of the two systems. Draw conclusions and explain. Can you explain the results/conclusions as electric machine designer?

- [!] Make sure you keep machine type, efficiency class, cooling, protection class and other «influential» parameters constant (the same). Include these parameters in your report.

## Система-1. Влияние скорости на вес, размер и стоимость

Для системы привода насоса, содержащей двигатель и преобразователь частоты изучить влияние выбранной частоты вращения машины на ее вес, размер и стоимость.



Разработать систему со следующими параметрами:

- Насос: номинальный расход 100 л/с, напор 110 м, КПД насоса 86%, скорость 1100 об/мин,
- Тип двигателя – АМ, способ охлаждения IC411,
- Напряжение сети 400 В.

Вначале выберите машину с синхронной скоростью 1000 об/мин. Запишите вес и стоимость машины и преобразователя частоты.

В качестве альтернативного варианта выберите машину с синхронной скоростью 1500 об/мин. Запишите вес и стоимость машины и преобразователя частоты.

Сравните вес и стоимость двух двигателей (на 1000 и 1500 об/мин, затем сравните стоимости двух систем. Запишите выводы и пояснения. Как объяснить результаты с точки зрения проектировщика электрической машины?

- [!] Обязательно выбирайте в разных вариантах одинаковый тип машины, класс эффективности, способ охлаждения, класс защиты и другие важные параметры. Включите эти параметры в отчет.

## SYS-2. Design for short and wide speed ranges

The chief engineer is to design drive system for the three similar conveyors with different operational speed ranges. Available information (common for the three conveyors):

- One drum to be driven
- Gearbox: helical 1-stage, ratio 1:5
- No overloads, duty cycle – 100%
- Air-conditioned clean power house, abundant heat removal capability
- Distance between the driven drum of the conveyor and the FC (cable length) – 30 m
- Grid 400 V
- Rated torque 5 kNm
- Cooling: cooling water is not available. Consider the two air-cooling variants: (a) IC411, (b) IC416

Difference between the conveyors: speeds (min-max)

- 1 case: 40 - 200 rpm (wide speed range)
- 2 case: 180 - 200 rpm (narrow speed range)
- 3 case: 180 - 206 rpm (overspeed)

Help the chief engineer to design the three systems. Record weight and cost of motor and of frequency converter for each case. Draw conclusions and explain. Can you explain the results/conclusions as electric machine designer? Converter designer? System designer?

## Система-2. Варианты для маленького и большого диапазона скоростей

Главный инженер должен разработать систему привода для трех одинаковых конвейеров, отличающихся диапазоном рабочих скоростей. Доступна следующая информация (общая для всех трех конвейеров):

- Один приводной барабан
- Редуктор: косозубый 1-ступенчатый с передаточным отношением 1:5
- Рабочий цикл – 100%, без перегрузки
- Чистая силовая станция с кондиционированным воздухом, хорошие условия отвода тепла
- Расстояние между приводным барабаном конвейера и преобразователем частоты (длина кабеля) – 30 м
- Напряжение сети 400 В
- Номинальный момент 5 кНм
- Охлаждение: охлаждающая жидкость недоступна, рассмотреть два способа воздушного охлаждения: (a) IC411, (b) IC416

Различие между конвейерами в скоростях:

- 1 вариант: 40 – 200 об/мин (широкий диапазон скоростей)
- 2 вариант: 180 – 200 об/мин (узкий диапазон скоростей)
- 3 вариант: 180 – 206 об/мин (превышение скорости)

Помогите главному инженеру разработать три системы привода. Запишите вес и стоимость двигателя и преобразователя частоты для каждого случая. Запишите выводы и пояснения. Как объяснить результаты/выводы с точки зрения проектировщика электрических машин? А с точки зрения проектировщика преобразователей частоты? А с точки зрения проектировщика системы?

### SYS-3. Harmonics distortion

Design drive trains for the three identical pumps for the three application areas: airport, office building and factory. Choose solution with lowest cost. Note that  $THD(u)$

limits in the three above mentioned areas are according to IEEE519 (see table below). Short-circuit power (the same in all three cases): 1000 MVA.

Pump parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, efficiency 81%, speed 1450 rpm
- Grid voltage – 6000 V

IEEE 519 standards for total harmonic voltage distortion

Application Class	THD (%)
Sensitive Applications • Airports/Hospitals • Telecommunication Facilities	3%
General Applications • Office Buildings/Schools	5%
Dedicated Systems • Factories	10%

### Система-3. Гармонические искажения

Разработать систему привода для трех идентичных насосов, расположенных в разных местах: аэропорт, офисное здание, завод. Выбрать решение с минимальной стоимостью. Учесть ограничения по  $THD(u)$  в соответствии с IEEE519 (см. таблицу ниже). Мощность короткого замыкания (одинаковая для всех случаев): 1000 МВА.

Параметры насоса:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД 81%, скорость 1450 об/мин
- Напряжение сети – 6000 В

Стандарт IEEE 519 для коэффициента гармонических искажений по напряжению

Класс применения	THD (u)? %
Чувствительные применения • Аэропорты, госпитали • Телекоммуникационные объекты	3%
Общие применения • Офисные здания / школы	5%
Выделенные системы • Заводы	10%

## SYS-4. System design

Choose optimal drive train (mechanical and electrical system) for a pump in water supply system.

Parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%
- Grid voltage 690 V
- Conditions in the electric room – dry, no dust
- Cable 50 m
- Heat removal capabilities – very good
- Distance from the electric room to the pump (cable length) - 50 m
- Conditions at the place of the pump installation - wet
- Pump's mechanical configuration (horizontal shaft)

Make and present three design variants:

- 1st variant: design for lowest cost.
- 2nd variant: design for highest efficiency (lowest energy consumption).
- 3rd variant: design for highest efficiency with budget constraints on the investment in the new drive system of 31000 Euro.

Present benchmarking results as a spider diagram. Compare the system on the primary and the secondary criteria.



## Система-4. Проектирование системы

Выбрать оптимальную систему привода (механическую и электрическую системы) для насоса в системе водоснабжения.

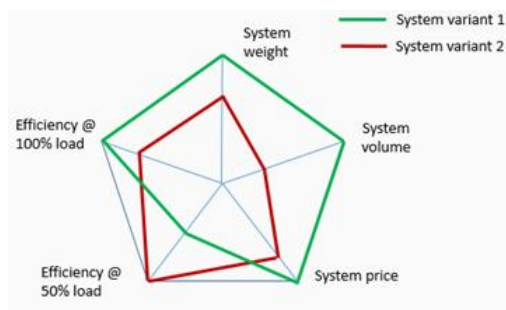
Параметры:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%
- Напряжение сети 690 В
- Условия в электрощитовой – нет влаги, нет пыли
- Длина кабеля 50 м
- Условия отвода тепла – очень хорошие
- Расстояние от электрощитовой до насоса (длина кабеля) – 50 м
- Условия в месте установки насоса – сырость, конденсат
- Механическая конфигурация насоса (горизонтальный вал)

Сделать три проекта:

- 1 вариант: минимальная стоимость.
- 2 вариант: наибольший КПД (наименьшее потребление энергии).
- 3 вариант: наибольший КПД при ограничении бюджета на инвестиции в новый насос 31000 Евро.

Представить результаты сравнения в виде паутинной диаграммы. Сравнить системы по первичному и вторичному критериям.



## SYS-5. Influence of gearbox types

Analyze efficiency (at several loads), weight and cost of electromechanical part of drive train (gearbox + electric machine) for the two applications:

### Wind turbine

Parameters: Torque 10 kNm, Speed 30 rpm, overspeed 1,2, grid 6000 V.

Compare the following three variants of gearbox stages and electric machines: (1) *PI+PI+Hel+SCIM* vs (2) *PI+PI+Hel+PMSM* vs (3) *PI+PI+PMSM*, where "PI" means planetary gear stage, "Hel" means helical gear stage.

## Система-5. Влияние типа редуктора

Проанализировать КПД (при различных нагрузках), вес и стоимость электромеханической части системы привода (редуктор + электрическая машина) для двух применений:

### Ветровая турбина

Параметры: момент 10 кНм, скорость 30 об/мин, превышение скорости 1,2, напряжение сети 6000 В.

Сравнить следующие три варианта передач редуктора и электрических машин: (1) *PI+PI+Hel+AM*; (2) *PI+PI+Hel+СМПМ*; (3) *PI+PI+СМПМ*, где "PI" означает планетарную ступень редуктора, "Hel" – косозубую ступень.

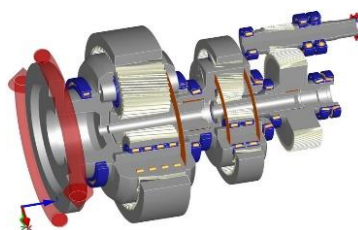


Fig.1. Gearbox with 2 planetary stages and one helical stage - "PI+PI+Hel" (Source: Romax).

Рис.1. Редуктор с 2 планетарными ступенями и одной косозубой ступенью – "PI+PI+Hel" (источник: Romax).

### Conveyor

Parameters: Torque 10 kNm, Speed 200-300 rpm, grid 400 V.

Compare the following three variants of gearbox stages and electric machines: (1) *Worm+SCIM* vs (2) *Hel+Hel+SCIM* vs (3) *Hel+Bevel+SCIM*, where "Worm" means worm gearbox.

### Конвейер

Параметры: момент 10 кНм, скорость 200-300 об/мин, напряжение сети 400 В.

Сравнить следующие три варианта передач редуктора и электрических машин: (1) *Worm+AM*; (2) *Hel+Hel+AM*; (3) *Hel+Bevel+AM*, где "Worm" означает червячную ступень редуктора, "Bevel" – коническую ступень.



Fig.2. Gearbox with 1 worm stage - "Worm".  
 Рис.2. Редуктор с 1 червячной передачей – "Worm".

Reflect on efficiency if operation is at partial load most of the time. Collect results in the tables (separate table for each application).

Показать, как изменяется КПД системы при работе большую часть времени при частичных нагрузках. Представить результаты в таблицах (отдельная таблица для каждого применения).

Case Вариант	Gear efficiency КПД редуктора				Overall efficiency Общий КПД				Gearbox Редуктор		Electric machine Электрическая машина	
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%	weight вес	cost СТОИМОСТЬ	weight вес	cost СТОИМОСТЬ
1												
2												
3												

## SYS-6. Filters, cable length and losses

Design drive trains for four pumps (all have identical parameters: flow 250 l/s, head 280 m, efficiency 87%, rated speed 1450 rpm). Distance to the respective pumps from the electric room (with 6 kV voltage source) where the system driving the pumps are installed: 40 m, 250 m, 400 m, 1000 m.

Try systems with LV and MV FC.

First, set cable on «automatic selection». Then try higher and lower cross-sections. Compare the results. Change cable material from Copper to Aluminum. Compare the results. Summarize your findings in a table.

## Система-6. Фильтры, длина кабелей и потери

Разработать системы привода для насосов (у всех одинаковые параметры: расход 250 л/с, напор 280 м, КПД 87%, номинальная скорость 1450 об/мин). Расстояние от электрощитовой (с источником напряжения 6 кВ) до соответствующих насосов составляет: 40 м, 250 м, 400 м, 1000 м.

Рассмотреть системы с преобразователем частоты низкого и среднего напряжения.

Вначале установить автоматический выбор кабеля. Затем проверить варианты с большим и меньшим сечением. Сравнить результаты. Сменить материал кабеля с меди на алюминий. Сравнить результаты. Подвести итог в табличном виде.

## P-1. Design for different pump types

Design drive system for the four pumps of the same power but of different types and with different starting conditions

- Pump 1- centrifugal
- Pump 2 – positive displacement (breakaway torque (“BT”) = 100%)
- Pump 3 – centrifugal (BT = 100%)
- Pump 4 - positive displacement (BT = 200%)

Given parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 50 m, efficiency 81%, speed 950 rpm
- Grid voltage – 400 V
- Clean electric room for FC with abundant heat removal capabilities
- Distance from the electric room to the pump - 30 m
- Conditions at the place of the pump installation - wet
- Pump's mechanical configuration – horizontal

Design for lowest cost. 1st try only SCIM, then other types. Make conclusion how CT/QT and BT value affects the choice.

## Насос-1. Системы с различными типами насосов

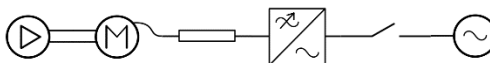
Разработать системы привода для четырех насосов одинаковой мощности, но разного типа и с разными условиями пуска

- Насос 1 – центробежный
- Насос 2 – вытеснительный (пусковой момент (“BT”) = 100%)
- Насос 3 – центробежный (BT = 100%)
- Насос 4 - вытеснительный (BT = 200%)

Заданные параметры:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 50 м, КПД 81%, скорость 950 об/мин
- Напряжение сети – 400 В
- Чистая электрощитовая для преобразователя напряжения с хорошими условиями отвода тепла
- Расстояние от электрощитовой до насоса – 30 м
- Условия в месте установки насоса – влажность
- Pump's mechanical configuration – horizontal

Спроектировать наиболее дешевый привод. Вначале использовать только АМ, затем другие типы машин. сделать вывод о влиянии постоянной или квадратичной нагрузочной характеристики и пускового момента на ваш выбор.





## P-2. Design for lowest system cost

Choose cheapest drive system for variable speed operation of the centrifugal pump in water supply system.

Given parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%
- Speed range 0 - 1450 rpm
- Grid voltage – 400 V
- The pump works in its rated point
- Clean electric room for FC with abundant heat removal capabilities
- Distance from the electric room to the pump - 30 m
- Conditions at the place of the pump installation - wet
- Pump's mechanical configuration – horizontal

Sub-task: How would you design the system if we knew that normal working range of the pump is 30-80%?

Sub-task for this and other exercises: Try to find real motors and FC in catalogues of provider from your region. e.g. Weg (for Brazil), ABB/Siemens/Danfoss (Europe).

## Насос-2. Система с наименьшей стоимостью

Выбрать самую дешевую систему привода для регулируемого центробежного насоса в системе водоснабжения.

Заданные параметры:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%
- Диапазон скоростей 0 – 1450 об/мин
- Напряжение сети – 400 В
- Насос работает в номинальном режиме
- Чистая электрощитовая для преобразователя частоты с хорошими условиями отвода тепла
- Расстояние от электрощитовой до насоса – 30 м
- Условия в месте установки насоса – влажность
- Механическое расположение насоса - горизонтальное

Подзадача: как изменится проект системы привода, если нормальный рабочий диапазон составляет 30-80%?

Подзадача для этого и последующих упражнений: найти реальные двигатели и преобразователи частоты из каталогов поставщиков вашего региона, например, Weg (для Бразилии), ABB/Siemens/Danfoss (для Европы).

### P-3. Design for highest energy efficiency

Design drive system for variable speed operation of the centrifugal pump in water supply system so that the system consumes minimum energy.

Given parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%
- Speed range 0 - 1450 rpm
- Grid voltage – 400 V
- Clean electric room for FC with abundant heat removal capabilities
- Distance from the electric room to the pump - 30 m
- Conditions at the place of the pump installation - wet
- Pump's mechanical configuration – horizontal

Load profile is given (table below). What is system efficiency at each load? How much energy consumed per day/year?

### Насос-3. Система с наибольшей энергетической эффективностью

Разработать систему привода для регулируемого центробежного насоса в системе водоснабжения, потребляющую минимум энергии.

Заданные параметры:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%
- Диапазон скоростей 0 – 1450 об/мин
- Напряжение сети – 400 В
- Чистая электрощитовая для преобразователя частоты с хорошими условиями отвода тепла
- Расстояние от электрощитовой до насоса – 30 м
- Условия в месте установки насоса - влажность
- Механическое расположение насоса - горизонтальное

В таблице ниже задан профиль нагрузки. Load profile is given (table below). Каков КПД системы при каждой нагрузке? Сколько энергии потребляет система в день / в год?



Time, %	Время, %	10	30	30	30
Load, %	Нагрузка, %	25	50	75	100

## P-4. Design for lowest life cycle cost

Design drive system for variable speed operation of the centrifugal pump in water supply system so that the system has lowest life cycle cost (LCC).

Given parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%
- Speed range 0 - 1450 rpm
- Grid voltage – 400 V
- Clean electric room for FC with abundant heat removal capabilities
- Distance from the electric room to the pump - 30 m
- Conditions at the place of the pump installation - wet
- Pump's mechanical configuration – horizontal
- Load profile is given (table)

Assume the pump works 24 hours a day. Energy price - 0,2 Euro/kWh. Design for 3 different lifetimes: 1, 5 and 10 years.

## Насос-4. Система с наименьшей стоимостью жизненного цикла

Разработать систему привода для регулируемого центробежного насоса в системе водоснабжения, имеющую наименьшую стоимость жизненного цикла (LCC).

Заданные параметры:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%
- Диапазон скоростей 0 – 1450 об/мин
- Напряжение сети – 400 В
- Чистая электрощитовая для преобразователя частоты с хорошими условиями отвода тепла
- Расстояние от электрощитовой до насоса – 30 м
- Условия в месте установки насоса - влажность
- Механическое расположение насоса - горизонтальное
- Профиль нагрузки задан в таблице

Пусть насос работает 24 часа в сутки. Стоимость энергии – 0,2 Евро/кВтч. Рассмотреть три варианта срока службы: 1, 5 и 10 лет.

Time, %	Время, %	10	30	30	30
Load, %	Нагрузка, %	25	50	75	100

## P-5. Design for constrained space

Design the container (put equipment into container of a given size). Design the drive system and place its parts so that the configuration fits the heat removal capacity of the containers. The centrifugal pump should be in a separate compartment connected with the shaft to the motor which is in the compartment next to the pump (shaft goes through the wall).

Given container size:  $H \times L \times W = 3 \times 7 \times 2$  m. Note that the pump will occupy 1 m of the container length.

Try several variants with heat dissipation/removal capacity (in kW) (ventilation/air-conditioning):

- 30 kW (cost 5000 Euro),
- 50 kW (cost 10000 Euro),
- 70 kW (cost 15000 Euro).

Consider using heat exchanger (air-to-water) to arrange water cooling of the equipment inside the container.

Size of the heat exchanger: 0.6 x 1 m (footprint). Height is 2 m. Cost 20000 Euro.

Size of the switchgear, which should be placed in the container is 0.6 x 1 m (footprint). Height is 2 m. Cost 10000 Euro.

Given parameters:

- Rated flow 250 l/s, head 200 m, pump efficiency 81%, speed 1450 rpm
- Voltage supplied to the container – 6000 V

## Насос-5. Система в ограниченном пространстве

Разработать систему привода, разместив все оборудование в контейнере заданного размера. Разместить части системы так, чтобы их конфигурация соответствовала возможностям контейнера по отводу тепла. Центробежный насос должен располагаться в отдельном отсеке и быть соединен с валом двигателя, который расположен в соседнем отсеке (вал проходит через стенку).

Заданные размеры контейнера: Высота x Длина x Ширина = 3 x 7 x 2 м. При этом насос занимает 1 м в длину контейнера.

Рассмотреть разные варианты систем отвода тепла (в кВт) (система вентилирования / кондиционирования воздуха):

- 30 кВт (стоимость 5000 Евро),
- 50 кВт (стоимость 10000 Евро),
- 70 кВт (стоимость 15000 Евро).

Рассмотреть возможность использования теплообменника (воздух-вода) для обеспечения водяного охлаждения оборудования в контейнере.

Размер теплообменника: 0.6 x 1 м (занимаемая площадь). Высота 2 м. Стоимость 20000 Евро.

Размер распределительного устройства, которое должно располагаться в контейнере: 0.6 x 1 м (занимаемая площадь). Высота 2 м. Стоимость 10000 Евро.

Заданные параметры:

- Номинальный расход 250 л/с, напор 200 м, КПД насоса 81%, скорость 1450 об/мин
- Напряжение, подаваемое к контейнеру – 6000 В



*Fig.1. Example of a container.*

*Рис.1. Пример контейнера.*



*Fig.2. Variants of placing the equipment.*

*Рис.2. Варианты размещения оборудования.*

## P-6. Design for special environmental conditions

Design drive system for pump installed on a 2 km high mountain. At the bottom at the altitude of 400 m there is substation available with 10 kV supply. There are opportunities to install available container at the slope at heights 800 m and 1200 m. Also near the pump at 2 km.

Propose two designs, lowest cost and highest efficiency. Compare solutions on spider diagram.

Note: cost of 1 km 10 kV 100 A cable is 1000 euro.

Given pump parameters:

- Rated flow 50 l/s, head 200 m, efficiency 81%, speed 1450 rpm

## Насос-6. Система, отвечающая специальным условиям окружающей среды

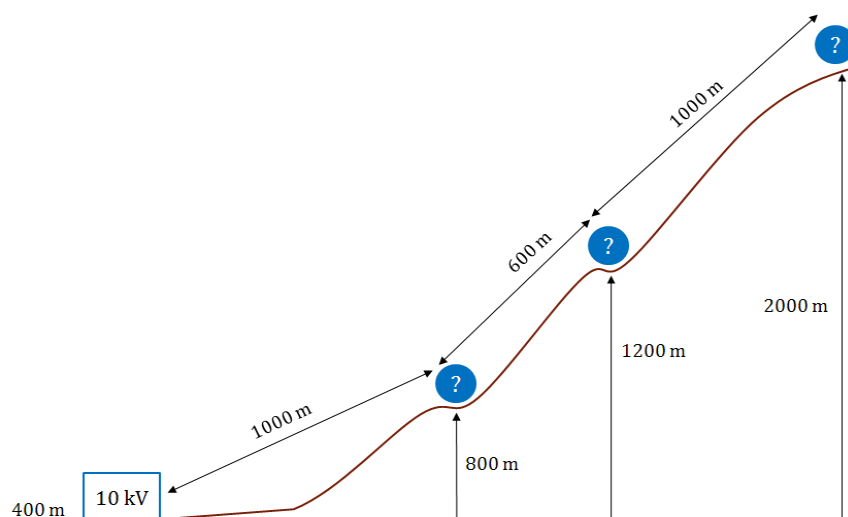
Разработать систему привода насоса, установленного на горе высотой 2 км. У подножия горы на высоте 400 м над уровнем моря расположена подстанция с питающим напряжением 10 кВ. Есть возможность установки подходящего контейнера на склоне горы на высоте 800 и 1200 м., а также возле насоса на высоте 2 км.

Предложите 2 варианта системы с наименьшей ценой и наибольшим КПД. Сравните варианты на паутиной диаграмме.

Стоимость 1 км 10 кВ кабеля 100 А составляет 1000 Евро.

Заданные параметры насоса:

- Номинальный расход 50 л/с, напор 200 м, КПД 81%, скорость 1450 об/мин



## C-1. Design for constrained space

Design drive system for the conveyor situated in a narrow passage.  $L = 120$  cm (see the sketch).

Available information:

- One drum to be driven
- No overloads, duty cycle – 100%
- Dusty environment, abundant heat removal capability, wet floor
- Grid 400 V
- Distance between the driven drum of the conveyor and the FC (cable length) – 30 m
- Rated torque 10 kNm
- Speeds: min – 200 rpm, max - 250 rpm
- Cooling water available

Design for: (A) Design system for lowest cost. (B) Design system for highest efficiency

## Конвейер-1. Система привода в ограниченном пространстве

Разработать систему привода конвейера, расположенного в узком промежутке.  $L = 120$  см (см. рисунок).

Доступная информация:

- Конвейер приводится в действие одним барабаном
- Рабочий цикл 100% без перегрузок
- Окружающая среда пыльная, хорошие условия отвода тепла, мокрый пол
- Напряжение сети – 400 В
- Расстояние между приводным барабаном конвейера и преобразователем частоты (длина кабеля) – 30 м
- Номинальный момент – 10 кНм
- Скорости: минимальная – 200 об/ин, максимальная – 250 об/мин
- Доступна охлаждающая вода

Разработать систему: (A) с наименьшей стоимостью; (B) с наибольшим КПД.

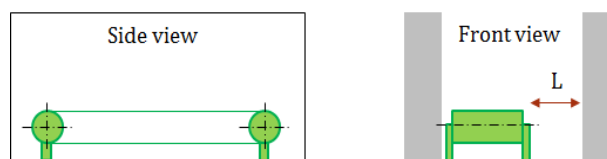


Fig.1. Explanation for the task.

Рис.1. Пояснения к заданию.



*Fig.2. Example of a conveyor with limited space for the gearbox and the motor.*

*Рис.2. Пример конвейера с ограниченным пространством для размещения редуктора и двигателя.*



## C-2. Design for applications with different duties

Design drive system for the three conveyors with different duties (a) duty 100%, (b) 70%, (c) 50%. Duty cycle period – 1 min.

Available information:

- One drum to be driven
- Rated torque 50 kNm
- Speeds: min – 75 rpm, max -150 rpm
- No overloads
- Air-conditioned clean power house, abundant heat removal capability
- Grid 400 V
- Distance of conveyor from FC (cable length) – 40 m
- Cooling water not available

Use helical gearbox with ratio 1:5.

Summarize the data in a table like the one below. Explain the results.

Case	Duty	Motor type	FC type	Cost motor	Cost FC	Cost total
1	100%					
2	70%					
3	50%					

## Конвейер-2. Система привода для применений с разным рабочим циклом

Разработать систему привода для трех конвейеров с разными рабочими циклами (a) 100%, (b) 70%, (c) 50%. Длительность рабочего цикла – 1 мин.

Доступная информация:

- Конвейер приводится в действие одним барабаном
- Номинальный момент 50 кНм
- Скорости: минимальная – 75 об/мин, максимальная –150 об/мин
- Перегрузки отсутствуют
- Чистый машинный зал с кондиционированием воздуха и хорошими условиями отвода тепла
- Напряжение сети – 400 В
- Расстояние от конвейера до преобразователя частоты (длина кабеля) – 40 м
- Охлаждающая жидкость недоступна

Использовать косозубый редуктор с передаточным отношением 1:5.

Собрать результаты в таблице, показанной ниже. Объяснить результаты.

Вариант	Рабочий цикл	Тип двигателя	Тип ПЧ	Стоимость двигателя	Стоимость ПЧ	Общая стоимость
1	100%					
2	70%					
3	50%					

### C-3. Design for applications with different overloads

You are chief engineer at a plant. Design drive system for the five conveyors. Design for the following overload variants:

- (a) No overloads (0%),
- (b) 100% 2 sec each 1 min,
- (c) 100% 1 min each 10 min,
- (d) 100% 2 min each 20 min.
- (e) 50% 1 min each 10 min.

Available information:

- One drum to be driven
- Rated torque 10 kNm
- Speeds: min – 400 rpm, max - 630 rpm
- Duty 100%
- Air-conditioned clear power house, abundant heat removal capability
- Grid 400 V
- Distance pump from FC (cable length) – 40 m
- Cooling water not available

Explain the results.

Case	Overload	Motor type	FC type	Cost motor	Cost FC	Cost total
1	No					
2	100% 2 sec each 1 min					
3	100% 1 min each 10 min					

### Конвейер-3. Система привода для применений с различными нагрузками

В качестве главного инженера завода вам надо разработать систему привода для 5 конвейеров со следующими вариантами перегрузки:

- (a) без перегрузки(0%),
- (b) 100% перегрузка в течение 2 с каждую 1 мин,
- (c) 100% перегрузка в течение 1 мин каждые 10 мин,
- (d) 100% перегрузка в течение 2 мин каждые 20 мин.
- (e) 50% перегрузка в течение 1 мин каждые 10 мин.

Доступная информация:

- Конвейер приводится в действие одним барабаном
- Номинальный момент – 10 кНм
- Скорости: минимальная – 400 об/мин, максимальная – 630 об/мин
- Рабочий цикл 100%
- Чистый машинный зал с кондиционированием воздуха и хорошими условиями отвода тепла
- Напряжение сети – 400 В
- Расстояние между насосом и ПЧ (длина кабеля) – 40 м
- Охлаждающая жидкость недоступна

Объяснить результаты.

Вариант	Перегрузка	Тип двигателя	Тип ПЧ	Стоимость двигателя	Стоимость ПЧ	Общая стоимость
1	Нет					
2	100% 2 с каждые 1 мин					

4	100% 5 min each 20 min					
5	50% 1 min each 10 min					

3	100% 1 мин каждые 10 мин					
4	100% 5 мин каждые 20 мин					
5	50% 1 мин каждые 10 мин					

## C-4. Design for lowest system cost

Design drive system for the four conveyors with different speeds (the same power).

Given parameters:

- No overloads
- Duty - 100% (uninterruptable operation)
- Location/environment – clean room
- Grid - 690 V
- Cooling water not available
- Speeds and torques according to the table

Design for: lowest investment cost (CAPEX). Assume energy efficiency is not important. Present total system efficiency at 100% load, 50% load

## Конвейер-4. Система с наименьшей стоимостью

Разработать систему привода четырех конвейеров с различными скоростями (при одинаковой мощности).

Заданные параметры:

- Перегрузок нет
- Рабочий цикл – 100% (непрерывная работа)
- Расположение/окружающая среда – чистое помещение
- Напряжение сети – 690 В
- Охлаждающая жидкость не доступна
- Скорости и моменты конвейеров указаны в таблице

Разработать систему с наименьшей стоимостью инвестиций (CAPEX). КПД предполагается несущественным. Найти общий КПД системы при 100% нагрузке, при 50% нагрузке.

Case Вариант	speed, rpm Скорость, об/мин	torque, kNm Момент, кНм
1	100...500	10
2	300...500	10
3	20...100	50
4	70...100	50

## C-5. Design for long and short cables

Design drive system for the conveyor with two drums to be driven. Load sharing 50/50%. You are free to choose where the drive and the transformer (if any) will be located. Also free to choose voltage level.

Note: only one possible variant is shown on the sketch in Fig.1.

## Конвейер-5. Система с длинными и короткими кабелями

Разработать систему привода для конвейера с двумя приводными барабанами. Нагрузка между ними распределяется как 50/50%. Можете выбирать любое расположение привода и трансформатора (если нужен). Также можете выбирать уровень напряжения.

На рис. 1 показан только один из возможных вариантов.

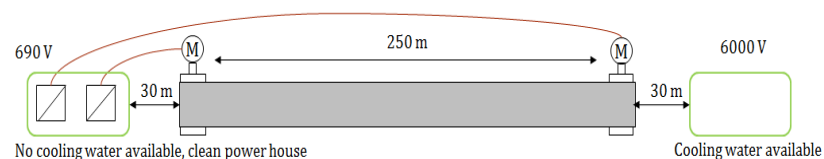


Fig.1. Explanation of the task.

Рис.1. Пояснение к заданию.

Available information:

- Rated torque 60 kNm (for the total conveyor)
- Operational speeds 40 - 200 rpm
- 20% overloads
- Duty cycle – 100%
- Choose between two power houses with 6000 V and 690 V voltage sources
- Power houses: constrained space (try to minimize footprint)

Design the system for lowest cost.

Доступная информация:

- Номинальный момент 60 кНм (для всего конвейера)
- Рабочие скорости 40 – 200 об/мин
- Перегрузка 20%
- Рабочий цикл – 100%
- Рассмотреть 2 варианта машинных зала с источниками напряжения 6000 В и 690 В
- Машинный зал с ограниченным пространством (минимизировать площадь, занимаемую компонентами)

Разработать систему с минимальной стоимостью.



*Fig.2. Example*  
*Рис.2. Пример.*

## WT-1. Top head mass reduction for floating wind turbines

Two imaginary companies, *OffshoreWinds Ltd* and *WindFloaters Inc* develop offshore floating wind turbines of 1 and 2 MW size, respectively. Help them to design power drive trains for their turbines. You are free to place converter and transformer in the tower if you like. Available tower diameter is 4 m for the 1 MW turbine and 7 m for the 2 MW turbine (remember space for the elevator!).

Parameters of the turbines:

- Turbine by *OffshoreWinds Ltd*: Power 1 MW, rated speed 17 rpm.
- Turbine by *WindFloaters Inc*: Power 2 MW, rated speed 15 rpm.

Inter-park voltage is 11 kV.

What cables will you use? How about cable connection terminals? Bending of the cable? Do you get some advantage if tower and nacelle are air-conditioned (no salty air penetration)? What if clean cooling water is made available in the nacelle/tower? What are other/additional design steps which cannot be tried in DriveConstructor would you try? Input from the company: “we need lowest possible top head mass as it would simplify design of the floating tower”

Note: We did not include direct drive option here as it is known to be the heaviest.

Hints:

- Low-voltage electric machines in *DriveConstructor* are available up to 2000 kW, medium-voltage – up to 5 MW

## Ветряная турбина-1. Снижение массы установленного сверху оборудования в плавающей ветряной турбине

Две воображаемые компании, *OffshoreWinds Ltd* и *WindFloaters Inc* разрабатывают офшорные плавающие ветровые турбины 1 и 2 МВт соответственно. Помогите им разработать систему привода для их турбин. Преобразователь и трансформатор можете располагать в башне в любом месте. Диаметр башни для 1 МВт турбины составляет 4 м, для 2 МВт турбины – 7 м (оставьте место и для лифта!).

Параметры турбин:

- Турбина от *OffshoreWinds Ltd*: мощность 1 МВт, номинальная скорость 17 об/мин.
- Турбина от *WindFloaters Inc*: мощность 2 МВт, номинальная скорость 15 об/мин.

Напряжение ветропарка 11 кВ.

Какие кабели будете использовать? Какие соединительные зажимы для кабелей? Как будете изгибать кабели? Появятся ли у вас преимущества, если башня и гондола будут иметь кондиционированный воздух (защиту от проникновения соли)? Поможет ли наличие чистой охлаждающей жидкости в гондоле/башне? Какие бы еще варианты, не предусмотренные в программе DriveConstructor, вы бы применили? Подсказка от компании: “мы хотим получить наименьшую возможную массу верхней части, чтобы упростить конструкцию плавающей башни”.

Примечание: вариант прямого привода здесь не рассматривается, поскольку он известен, как самый тяжелый.

Советы:

- Электрические машины низкого напряжения в программе *DriveConstructor* существуют до мощности 2000 кВт, среднего напряжения – до 5 МВт.

## WT-2. Drive train optimization for on-land wind turbine

Design drive train for the series of WT;

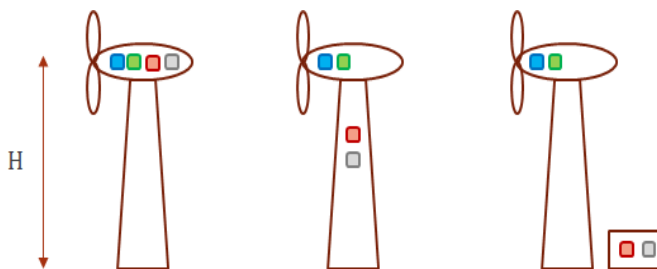
- 500 kW (20 rpm, 238 kNm),
- 1 MW (17 rpm, 562 kNm),
- 3 MW (15 rpm, 1910 kNm).

Overspeed is the same for all the turbines – 1,2. Grid voltage – 10000 V.

Design for lowest cost.

Try different electric machines and different gear ratios. Try different variants with placement of the drive train components.

Assume enough space inside the tower to place e.g. FC and transformer. Include variant with FC and transformer in a container on the ground next to the WT (see the sketch below). Summarize and present all key characteristics in a table.



## Ветряная турбина-2. Оптимизация системы привода для наземной ветровой турбины

Разработать системы привода для серии ветровых турбин:

- 500 кВт (20 об/мин, 238 кНм),
- 1 МВт (17 об/мин, 562 кНм),
- 3 МВт (15 об/мин, 1910 кНм).

Превышение скорости одинаковое для всех турбин – 1,2. Напряжение сети – 10000 В.

Разработать системы с наименьшей стоимостью.

Использовать различные электрические машины и разные передаточные отношения редуктора. Использовать различные места размещения компонентов системы привода.

Пусть в башне будет достаточно места для размещения, например, преобразователя частоты и трансформатора. Рассмотреть вариант с ПЧ и трансформатором, установленными в контейнере на земле рядом с турбиной (см. рисунок ниже). Представить все основные характеристики рассмотренных вариантов в таблице.



### WT-3. Inertia of the drive train as protection against tidal turbine runaway

Consider the following situation: 1 MW TT tidal turbine (TT) is running at its rated speed of 11 rpm (868 kNm).

There occurs grid loss, generator torque drops to zero, propeller begins to accelerate. Brake will be applied in 0,1 sec (Case 1) or in 0,2 sec (Case 2).

Question: to what speed would the TT accelerate in Cases 1 and 2 if it had the following drive trains configurations:

- without gear (DD),
- with 1-stage gearbox,
- with 2-stage gearbox,
- with 3-stage gearbox?

For all cases there is used PM machine as the generator.

Note: it is known that inertia of rotor of DD electric machine would be  $17 \text{ ton}\cdot\text{m}^2$

### Ветряная турбина-3. Использование момента инерции системы привода для защиты от ускорения приливной турбины

Пусть приливная турбина (ТТ) мощностью 1 МВт работает с номинальной скоростью 11 об/мин (момент 868 кНм).

При внезапном отключении сети генераторный момент падает до нуля и турбина начинает ускоряться. Тормоз сработает через 0,1 с (вариант 1) или 0,2 с (вариант 2).

Вопрос: до какой скорости успеет разогнаться турбина в варианте 1 и варианте 2 при следующих конфигурациях системы привода:

- без редуктора (прямой привод),
- с 1-ступенчатым редуктором,
- с 2- ступенчатым редуктором,
- с 3- ступенчатым редуктором?

Во всех случаях в качестве генератора используется СМПМ.

Примечание: момент инерции ротора электрической машины прямого привода составляет  $17 \text{ т}\cdot\text{м}^2$

## WT-4. Cost of Energy (COE) analysis for ocean and river TT

Propose optimal drive train designs for one ocean and one river water stream turbines of 1 MW power targeting lowest COE for each of the turbines.

Given for both turbines:

- Rated speed - 11 rpm
- Rated torque - 870 kNm
- Overspeed - 1.2
- Grid voltage on-shore – 10 kV
- Capital expenditures (CAPEX), except of the drive train cost - 7 million Euro.
- Operational expenditures (OPEX) – 0.4 million Euro per annum for drive train with 3-stage gearbox, 0.39 million Euro per annum for drive train with 2-stage gearbox
- Lifetime of the turbine - 20 years
- Cost of 10 kV subsea cable is 10000 Euro per km

Loads of the ocean turbine:

- Close to 100% load 10% of time
- Close to 75% load 35% of time
- Close to 50% load 30% of time
- Close to 25% load 25% of time

Load of the river turbine is assumed 100% all the time.

Try the two system solutions:

## Турбина-4. Сравнение стоимости энергии (СЭ) океанской и речной приливной турбины

Предложите оптимальное системное решение для системы преобразования энергии (электропривода) для океанской и речной приливных турбин с номинальной мощностью 1 МВт каждая, имея целью наименьшую стоимость энергии (для каждой из турбин).

Дано для обеих турбин:

- Номинальная скорость - 11 об/мин
- Момент - 870 кНм
- Превышение скорости – 1,2
- Напряжение береговой сети – 6 кВ
- Капитальные затраты (CAPEX), исключая стоимость системы преобразования энергии - 7 миллионов Euro.
- Операционные затраты (OPEX) – 0.4 миллиона Euro в год для системы с 3-ступенчатым редуктором, 0.39 миллиона Euro в год для системы с 2-ступенчатым редуктором
- Проектное время жизни турбины - 20 лет
- Стоимость 10 кВ подводного кабеля - 10000 Euro/км

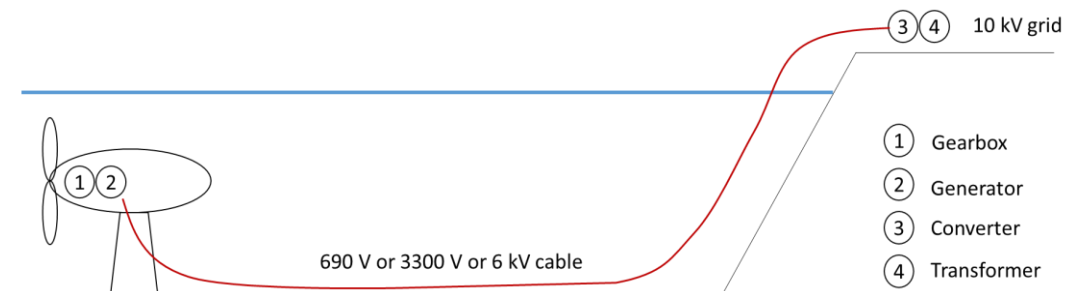
Нагрузки океанской турбины:

- Около 100% нагрузки 10% времени
- Около 75% нагрузки 35% времени
- Около 50% нагрузки 30% времени
- Около 25% нагрузки 25% времени

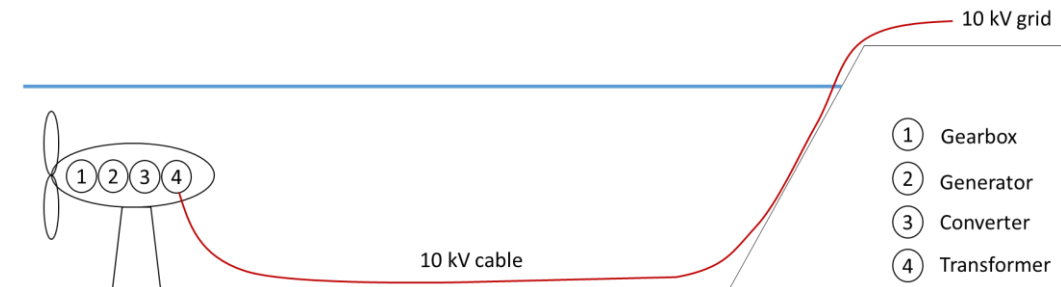
Речная турбина имеет всегда 100% нагрузку

Попробуйте два системных решения:

Solution 1. Frequency converter and transformer – on the shore.  
 Решение 1. Преобразователь частоты и трансформатор на берегу.



Solution 2. Frequency converter and transformer in the nacelle.  
 Решение 2. Преобразователь частоты и трансформатор в гондоле.



Length of the cable between the river turbine and the on-shore grid is 0,5 km.

Длина кабеля между речной турбиной и береговой подстанцией - 0,5 км.

Length of the cable between the ocean turbine and the on-shore grid is 1 km (case 1) and 3 km (case 2).

Длина кабеля между океанской турбиной и береговой подстанцией - 1 км (вариант 1) and 3 км (вариант 2).

Present the COE values for all the cases you have analyzed. Compare the ocean and the river turbines, draw conclusions.

Представьте значения СЭ для всех рассмотренных случаев. Сравните океанскую и речную турбины, сделайте выводы.

## WT-5. Small high-speed WT

Given:

- rated propeller speed - 200 rpm
- torque – 1 kNm
- WT height – 30 m,
- Distance from the tower to the power house – 50 m
- Transformer with 400 V is available the power house – 50 m

The task: design optimal systems for the following drive trains configurations:

- without gear (DD),
- with 1-stage gearbox,
- with 2-stage gearbox,
- with 3-stage gearbox.

Draw conclusions on efficiency vs cost. First take only induction machine and try different efficiency classes. Design for highest efficiency. Limit CAPEX (capital expenditures) to 30000 Euro.

## Ветровая турбина-5. Небольшая высокоскоростная турбина

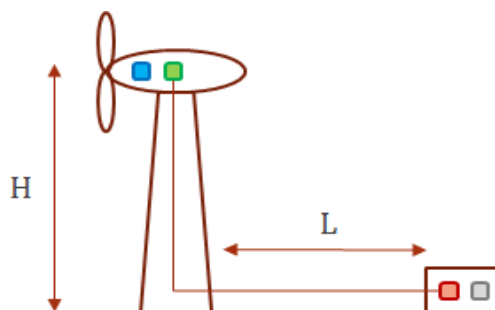
Дано:

- номинальная скорость пропеллера – 200 об/мин
- момент – 1 кНм
- Высота турбины – 30 м
- Расстояние от башни до машинного зала – 50 м
- В машинном зале имеется трансформатор на 400 В

Задача: спроектировать оптимальные системы привода для следующих конфигураций:

- без редуктора (прямой привод),
- с 1- ступенчатым редуктором,
- с 2- ступенчатым редуктором,
- с 3-ступенчатым редуктором.

Сделать выводы о соотношении КПД и стоимости системы. Вначале рассмотреть только асинхронную машину и различные классы эффективности. Спроектировать систему с наивысшим КПД. Ограничить капитальные затраты (CAPEX) суммой 30000 Евро.



## W-1. Drive train for the winder

Design drive train for the winder with the following data:

- empty drum diameter 0.2 m
- full drum diameter 0.3 m
- linear speed at which the cable is to be reeled on the drum - 5 m/s
- force/tension on the cable 10 kN
- grid voltage 400 V
- no overloads

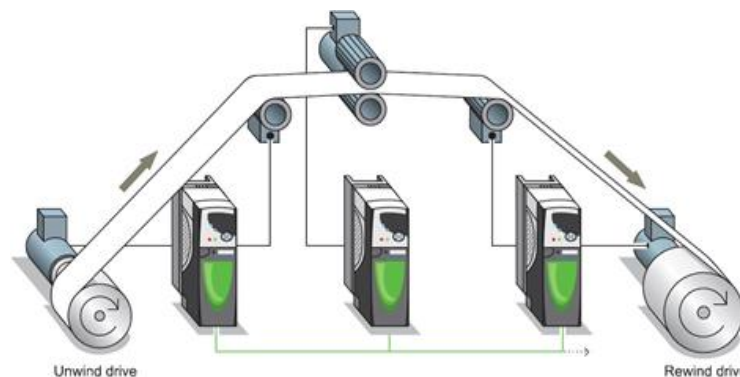
Design the drive system for lowest cost. Consider topologies with gearbox and direct drive.

## Лебедка-1. Система привода для намоточного устройства

Разработать систему привода намоточного устройства со следующими данными:

- диаметр пустого барабана 0.2 м
- диаметр полного барабана 0.3 м
- линейная скорость наматываемого троса – 5 м/с
- сила/усилие на тросе – 10 кН
- напряжение сети 400 В
- перегрузки отсутствуют

Разработать систему привода с наименьшей стоимостью. Рассмотреть схемы с редуктором и прямым приводом.



## W-2. Designing the winch drum and drive train for low cost

Design the winch drum and drive train for the following system specification:

- linear speed at which the cable is to be reeled on the drum 2 m/s
- force/tension on the cable 10 kN
- overloads - 20 %
- grid voltage 690 V
- capacity of the winch - 1 m<sup>3</sup>

Design drum by varying:

- empty drum diameter (D1)
- full drum diameter (D2)
- drum length (L)

Optimize for lowest drive train cost. Assume cost of the drum negligible.

## Лебедка-2. Разработка барабана лебедки и системы привода с наименьшей стоимостью

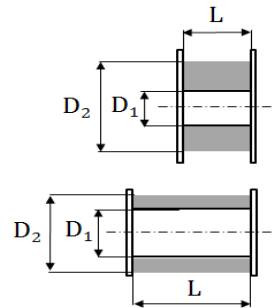
Разработать барабан лебедки и систему привода для следующих условий:

- линейная скорость наматывания троса на барабан 2 м/с
- сила/усилие на тросе 10 кН
- перегрузка – 20 %
- напряжение сети 690 В
- емкость лебедки – 1 м<sup>3</sup>

Разработать барабан, изменяя следующие величины:

- диаметр пустого барабана (D1)
- диаметр полного барабана (D2)
- длину барабана (L)

Оптимизировать систему привода по наименьшей стоимости. Стоимостью барабана пренебречь.



### W-3. Inertia in the winch drive train

The trawler is going forward dragging a fish net behind. The net is connected by a wire to the winch. The winch drum is being held at zero speed by torque control. Rated torque is applied. Sometimes the net may get stuck and the wire collapse.

Given data (normal operation):

- Empty drum diameter 1 m
- Full drum diameter – 1,5 m
- Linear speed at which the cable is to be reeled on the drum – 2 m/s
- Force/tension on the cable – 100 kN
- Overloads - 50 %
- Vessel grid voltage – 690 V

Typical situation is given:

- Speed of the vessel – 5 m/s
- Wire elasticity - 1% (how much it can extend in % before collapsing)
- Wire length – 1 km
- Inertia of the drum – 100 kgm<sup>2</sup>
- Torque is removed by control system 1 second after the net stuck detection.
- Force on the wire (and torque) increases by 20% right after the net stuck and then increases by 10% for every 0,1% of extension of the wire.

Design drive train so that the wire does not collapse. To find the answer try to dimension the drive train using several gearbox and machine combinations. Check if the wire would collapse in each design variant.

### Лебедка-3. Момент инерции в системе привода лебедки

Траулер движется вперед, таща за собой рыболовную сеть. Сеть соединена тросом с лебедкой. Барабан лебедки удерживается на нулевой скорости с помощью управления моментом. К тросу приложен номинальный момент. Иногда сеть может застрять и тогда трос порвется.

Исходные данные (при нормальной работе):

- Диаметр пустого барабана – 1 м
- Диаметр полного барабана – 1,5 м
- Линейная скорость наматывания троса на барабан – 2 м/с
- Сила/усилие на тросе – 100 кН
- Перегрузка – 50 %
- Напряжение сети на судне – 690 В

Типичная ситуация:

- Скорость судна – 5 м/с
- Эластичность троса – 1% (на сколько % трос может растянуться прежде, чем порвется)
- Длина троса – 1 км
- Момент инерции барабана – 100 кгм<sup>2</sup>
- Система управления может снять момент через 1 с после обнаружения застревания
- Усилие на тросе (и момент) возрастают на 20% сразу после застревания и затем возрастают на 10% при каждом удлинении троса на 0,1%.

Разработать систему привода таким образом, чтобы трос не оборвался. Для этого рассмотреть различные комбинации редуктора и двигателя. Проверить, будет ли обрыв троса в каждом из вариантов.

