

## 4 ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ

### 4.1 ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Под передачей энергии понимается перенос какого-либо **вида энергии** от какого-либо **источника энергии** посредством какого-либо **энергоносителя** к какому-либо **потребителю энергии** или **энергоприемнику**.

Термин *источник энергии* является условным и не означает, что в этом источнике энергия возникает или создается. Как сказано в разделе 1.1, энергия не может сама по себе возникать или исчезать; ее можно только преобразовать из одного вида в другой.

Обычно передача энергии понимается как осуществление соответствующего *технического намерения*. Энергия может, однако, передаваться и независимо от целенаправленной деятельности человека в результате физических процессов, происходящих как в природе, так и в технических устройствах.

**Источниками энергии** называются устройства, установки или природные объекты, отдающие энергию, полученную в результате какого-либо преобразовательного процесса или каким-либо способом накопленную в них. Другими словами, источник энергии может представлять собой **преобразователь** или **аккумулятор** энергии; иногда в нем совмещаются обе функции. Источник, преобразующий один вид энергии в другой, называется **первичным**; если такого преобразования не происходит, то источник считают **вторичным**.

По этому определению, например, Солнце и электростанция являются первичными, а нагретая поверхность Земли, электрическая подстанция и преобразователь частоты – вторичными источниками энергии.

В **энергоприемниках** принимаемая энергия также может преобразовываться или аккумулироваться; иногда в них могут происходить и оба процесса.

**Энергоносителями**, в зависимости от вида передаваемой энергии, чаще всего являются

- твердое, жидкое или газообразное сжигаемое топливо (носитель *химической* энергии),
- ядерное топливо (носитель *ядерной* энергии),
- нагретые твердые тела, жидкости или газы (*теплоносители*),
- различные силовые передаточные механизмы или их элементы,
- излучение,
- электромагнитное поле.

Для передачи энергии иногда может потребоваться **дополнительная энергия** (например, для приведения энергоносителя в движение); кроме того, при передаче обычно возникают **потери энергии** (например, вследствие рассеяния тепла в окружающую среду). Могут изменяться и *параметры* энергии; так, например, напряжение в конце линии электропередачи, как правило, отличается от напряжения в начале линии. Простейшая, но учитывающая эти обстоятельства принципиальная схема энергопередачи представлена на рис. 4.1.1.

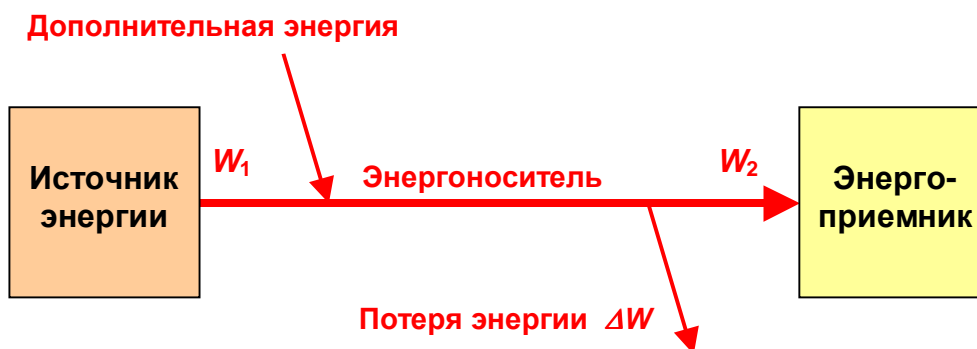


Рис. 4.1.1. Принципиальная схема передачи энергии.  $W_1$  отдаваемая источником,  $W_2$  принимаемая приемником энергия,  $\Delta W$  потеря энергии

Передачу энергии обычно характеризуют

- мощностью передачи,
- удельным расходом дополнительной энергии (расходом на единицу передаваемой энергии),
- коэффициентом полезного действия передачи

$$\eta_P = P_2 / P_1 \text{ или } \eta_W = W_2 / W_1$$

$P_1$  и  $W_1$  – принятые к передаче мощность и энергия

$P_2$  и  $W_2$  – дошедшие до приемника мощность и энергия

- полной и удельной стоимостью устройств и средств передачи,
- удельными текущими расходами,
- действием на окружающую среду.

**В природе** происходит как постоянное преобразование, так и постоянная передача всех видов энергии. Земля как приемник энергии получает **лучистую энергию** от Солнца (см. рис. 1.3.1), причем, часть ее возвращается обратно в мировое пространство, а часть превращается на материках и в морях в **тепло**, которое может передаваться теплопроводностью и конвекцией по почве, воде и воздуху (рис. 4.1.2). Через кору Земли на поверхность Земли выходит внутриземное тепло (геотермальная энергия). Прямо или после различных преобразований, как было показано в разделе 1.3, практически вся получаемая Землей энергия передается в виде теплового излучения в мировое пространство.

В особо больших количествах тепло передается морскими течениями (например, теплым Гольфстримом), а также ветрами (с пустынь и других более теплых регионов Земли).

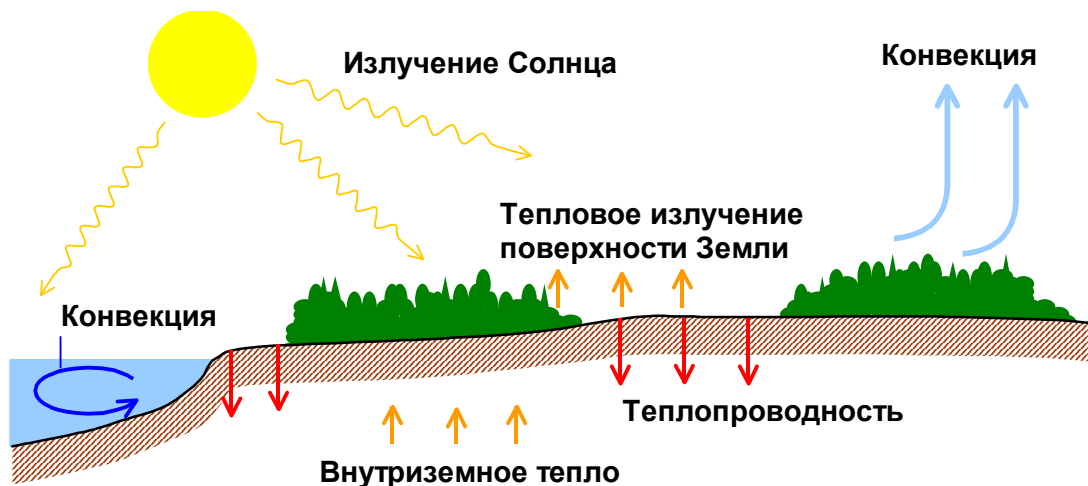


Рис. 4.1.2. Примеры передачи лучистой энергии и тепла в природе

**Механическая энергия**, возникающая в результате различных процессов преобразования, может передаваться в природе в виде

- ветра,
- водяного течения,
- грязекаменного потока (сея),
- звука.

У живых существ всякое движение сопровождается передачей механической энергии мышц.

**Химическая энергия**, которая первоначально в результате фотосинтеза аккумулируется в растениях в живой природе, может преобразовываться и передаваться различными способами в виде *биомассы*.

К разновидностям передачи химической энергии относится и **прием пищи** – передача содержащейся в пище энергии из наружной среды в пищеварительный тракт живого существа.

**Электрическая энергия** передается, например, перемещением заряженных частиц в атмосфере, разрядами молнии, тлеющим разрядом в ионосфере, а также в виде весьма слабых токов в биоэлектрических процессах живых существ.

Электрические процессы в человеческом теле могут, в частности, исследоваться при помощи электрокардиографов, электроэнцефалографов и других электромедицинских измерительных приборов.

**В энерготехнике** могут, по мере потребности, различными способами передаваться все виды энергии –

- химическая энергия путем перевозок топлива или передачей по топливопроводам,
- ядерная энергия путем перевозок ядерного топлива,
- механическая энергия посредством механических передач или при помощи сжатых газов и перекачиваемых жидкостей,

- тепло при помощи жидких, газообразных или твердых теплоносителей или тепловым излучением,
- электрическая энергия по электрическим проводникам, по линиям электропередачи переменного или постоянного тока или в виде электромагнитного поля (например, в виде радиоизлучения от передающих антенн до принимающих),
- лучистая энергия в виде видимого, ультрафиолетового или инфракрасного излучения в открытой среде или по светопроводам (например, по стекловолоконным кабелям) и др.

Одним из главных показателей энергопередачи является **мощность передачи** – количество передаваемой энергии в единицу времени. Некоторые примеры мощности передачи различных видов энергии при некоторых способах передачи представлены на рис. 4.1.3.

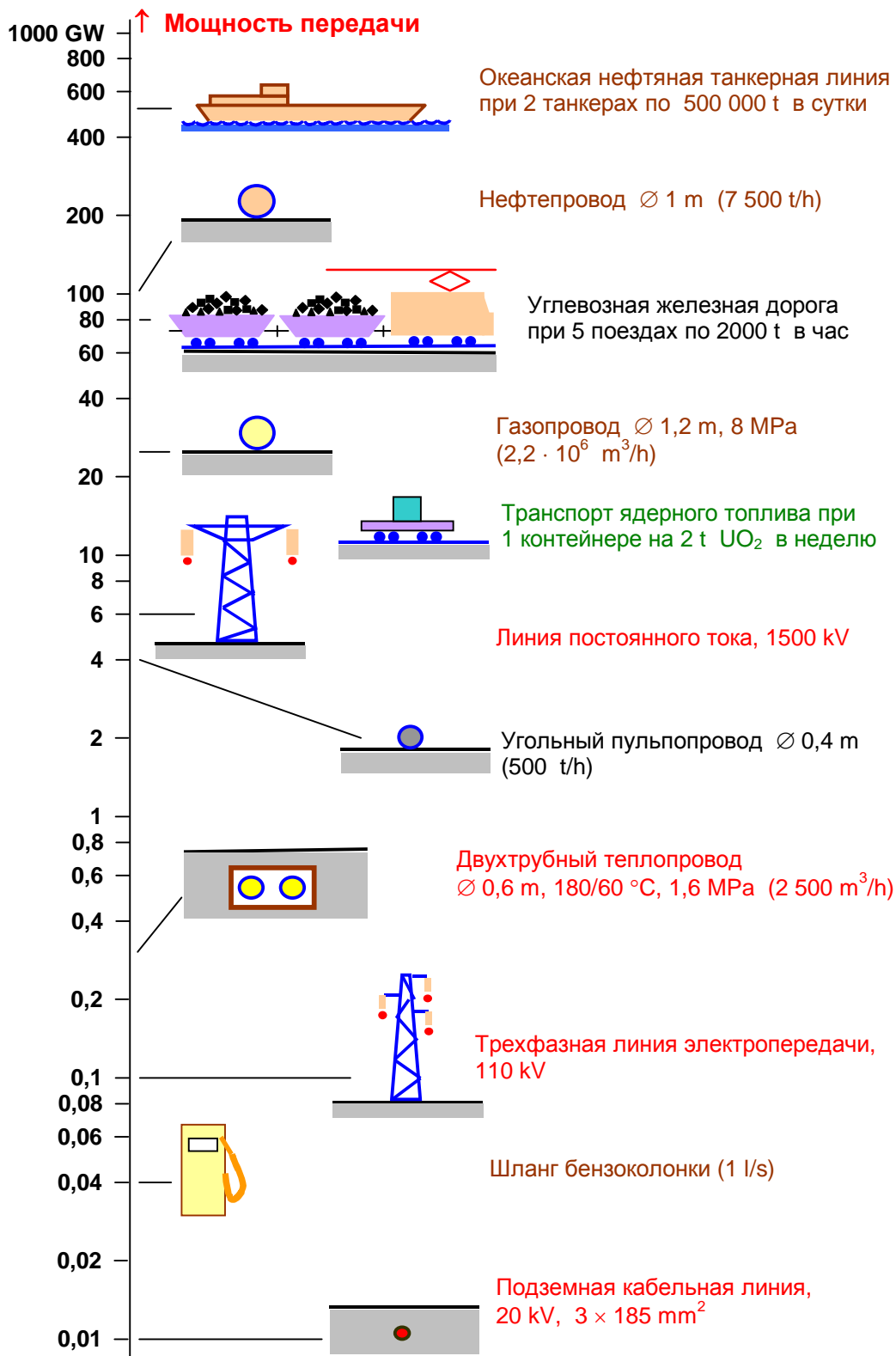


Рис. 4.1.3. Некоторые примеры мощности различных способов передачи энергии

## 4.2 ПЕРЕДАЧА ТОПЛИВА

Передача топлива, как показывает и рис. 4.1.3, является одной из наиболее эффективных разновидностей передачи энергии, так как удельное содержание химической энергии в топливе (энергия на единицу массы или объема, получаемая при его сжигании, *теплота сгорания* или *теплотворность*), по сравнению с другими видами энергии весьма велико – (15...45) GJ/t. В таблице 4.2.1 представлены данные о теплоте сгорания некоторых видов топлива, применяемых в энергоустановках.

**Tabel 4.2.1. Теплота сгорания некоторых видов топлива**

Топливо	Теплота сгорания	
	GJ/t	MWh/t
Каменный уголь	20...25	5,6...6,9
Кокс	29...30	8,0...8,3
Бурый уголь	8,0...24	2,2...6,7
Горючий сланец	8,0...11,5	2,2...3,2
Фрезерный торф	7,0...9,0	1,9...2,5
Торфяные брикеты	15,0...18,0	4,2...5,0
Древесина	7,1...13	2,0...3,6
Мазут	40...41	11,1...11,4
Керосин	42...43	11,7...11,9
Сланцевое масло	39...40	10,8...11,1
Бензин	43...44	11,9...12,2
Дизельное топливо	42...43	11,7...11,9
Природный газ*	46...47	12,8...13,1
Сжиженный газ	45...46	12,5...12,8
Водород	142	39,4

\*Теплота сгорания на 1000 м<sup>3</sup> составляет 33...34 GJ или 9,2...9,4 MWh.

Для большинства других видов энергии относительное энергосодержание (на единицу массы или объема) намного меньше (более подробно см. главу 5). Топливо может передаваться

- определенными грузами, перевозимыми при помощи различных транспортных средств (судов, поездов, грузовых автомобилей, самолетов и др.),
- непрерывным потоком по различным сооружениям и средствам непрерывного транспорта (трубопроводами, конвейерами, элеваторами и др.).

При выборе способа передачи учитываются

- вид топлива,
- требуемое количество топлива в единицу времени (мощность передачи),
- наличие или необходимость в транспортных сооружениях (в шоссейных или железных дорогах, в трубопроводах и др.),
- грузоподъемность транспортных средств,
- отношение собственной массы транспортного средства к массе груза,
- скорость передачи,
- предельная дальность передачи,

- способы погрузки, разгрузки и перегрузки,
- гибкость (например, возможность изменения трассы перевозок),
- надежность,
- влияние на окружающую среду и опасности, связанные с транспортом,
- удельный расход энергии на производство единицы массы топлива и единицы дальности передачи, например, в киловатт-часах на тоннокилометр.

Учитываются также экономические показатели передачи, в том числе

- расход рабочей силы,
- затраты на приобретение и эксплуатацию транспортных средств,
- затраты на строительство и эксплуатацию дорог,
- удельная стоимость перевозок на производство единицы массы топлива и дальности передачи, например, в кронах на тоннокилометр.

На рисунках 4.2.1, 4.2.2 и 4.2.3 для приблизительной ориентации представлены некоторые примеры по средней дальности, по мощности и по себестоимости передачи топлива.

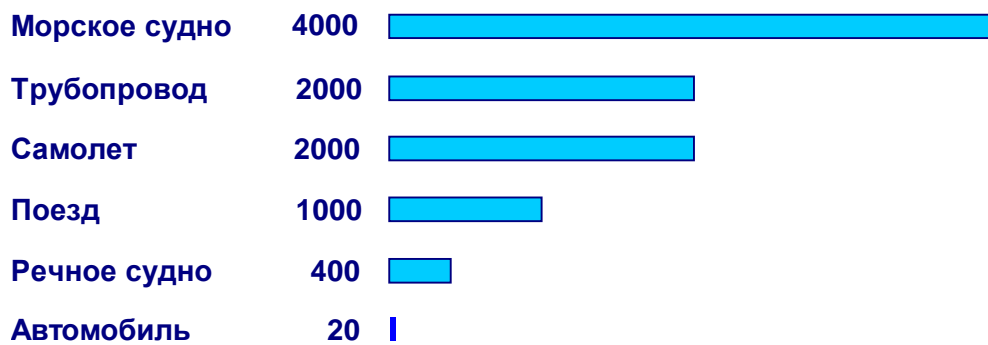


Рис. 4.2.1. Некоторые примеры средней дальности перевозок (km)

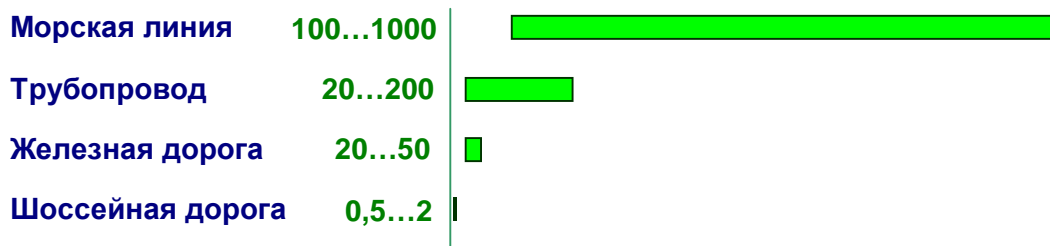
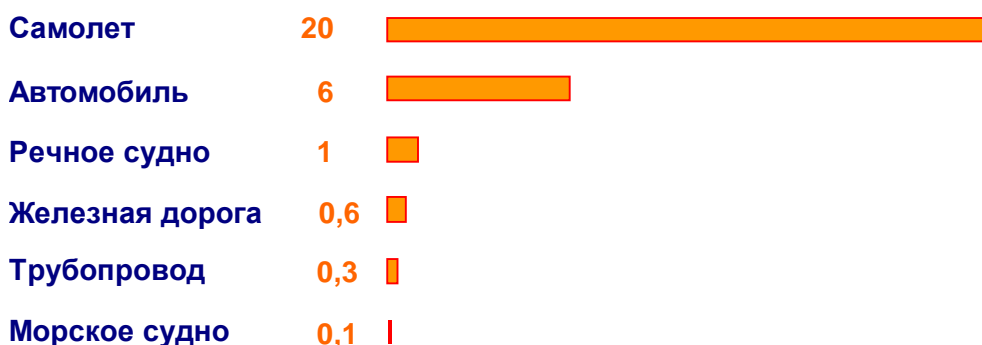


Рис. 4.2.2. Некоторые примеры возможного грузового потока (Mt/a) при некоторых способах транспортировки топлива



**Рис. 4.2.3. Средняя себестоимость перевозки топлива в евроцентах на тоннокилометр при некоторых видах передачи топлива (очень приближенно)**

Наибольшие количества топлива на наибольшие расстояния (например, с одного материка на другой) и с наименьшими удельными расходами могут перевозиться **океанскими судами**. Обычно этим способом перевозятся нефть и нефтепродукты, но весьма часто и другие жидкости, сжиженный газ и каменный уголь. Танкеры для местных перевозок жидкого топлива строятся с расчетом на грузоподъемность (500...5000) t, океанские танкеры на (30 000 ... 550 000) t. При грузоподъемности более 250 000 t их называют *супертанкерами*.

Первоначально суда перевозили нефть и нефтепродукты в бочках, и первый полностью загруженный парусник *Elisabeth Watts* (с 1329 бочками керосина на борту) прибыл из Америки в Лондон в 1861 году. Первый в мире нефтяной танкер *Zoroaster* был построен в 1877 году по заказу действовавшего в России (в Баку) шведского нефтепромышленника Людвиг Нобеля (Ludvig Nobel, 1831–1888) [1.16]. Крупнейший танкер – самое крупное судно мира – (565 000 t, длиной 458 m), носящий в настоящее время имя *Нок Невис* (*Knock Nevis*), был построен в Японии в 1979 году и несколько раз переходил от одного владельца к другому. С 2004 года он стоит в нефтяной гавани Катара как судно для приема, хранения и перекачивания нефти.

Перевозка больших объемов нефти по океану чревата риском кораблекрушений и, как следствие, загрязнением воды и побережья. Например, 16 марта 1978 года из-за отказа руля около побережья Бретани (Bretagne, Франция) попал на риф плавающий под флагом Либерии супертанкер *Амоко Кадиз* (*Amoco Cadiz*) длиной 334 m. Большая часть из 234 000 t нефти вытекла в море и вызвала небывалое загрязнение как моря, так и 200 km побережья. Однако наиболее катастрофическое в истории Европы загрязнение моря, а также побережья Португалии, Испании и Франции произошло после 19 ноября 2002 года, когда на расстоянии 250 km от берега Португалии сломался пополам и утонул плававший под флагом Багамских Островов танкер *Престиж* (*Prestige*) с грузом мазута (77 000 t), принятого на борт в Вентспилсе (Ventspils). 28 января 2006 года произошло крупнейшее загрязнение побережья Эстонии мазутом, попавшим в море из неустановленного танкера, на полосе Дирхам–Виһтерпалу (Dirham–Vihterpalu) длиной 35 km; предполагают, что вследствие загрязнения погибло приблизительно 35 000 зимующих там морских птиц.

Из-за тяжелых последствий морских аварий с 1989 года предъявляются более строгие требования к конструкции танкеров (двойные дно и борты и др.), что привело к удорожанию океанского транспорта. Использование крупных танкеров остается, однако, по-прежнему самым дешевым способом транспортировки топлива. Наглядно показывает это и таблица 4.2.2, где приведены данные, на какое расстояние за 1 евроцент может передаваться один литр жидкого топлива.



**Таблица 4.2.2. Дальность передачи одного литра жидкого топлива за 1 евроцент**

Способ передачи	Дальность передачи, km
Супертанкер	10 000
Трубопровод	500
Речной танкер	250
Железнодорожный поезд	140
Автоцистерна	60

Для транспортировки каменного угля на судах используется речной транспорт грузоподъемностью от 500 t до 2000 t и морские суда грузоподъемностью до 120 000 t. К примеру, стоимость перевозки каменного угля из США в Европу специальными углевозными судами составляет приблизительно (10...15) евро за тонну.

Для перевозки топлива широко используется и **железнодорожный транспорт**. Для передачи больших грузопотоков твердого топлива по суше этот способ является почти единственным, однако он применяется и для транспортировки жидкого топлива, когда сооружение трубопроводов себя не оправдывает. Поезда для перевозки угля состоят обычно из 50...100 вагонов общей вместимостью от 2000 t до 10 000 t; на Эстонской железной дороге средней вместимостью поезда считается 2900 t. Рассматривается применение и сверхтяжеловесных составов вместимостью до 20 000 t, например, для перевозок угля из России в Центральную Европу. По железным дорогам Эстонии в 2006 году перевезено 50 Mt топливных грузов, в том числе 28 Mt нефти (главным образом, в виде транзита), 14 Mt горючего сланца и 8 Mt каменного угля; топливные перевозки составляли 82 % всего грузооборота дороги [4.1].

Примитивный рельсовый транспорт был известен уже 3000 лет д. р. Х. в Месопотамии. С 14-го века на шахтах Европы применялись деревянные рельсы, и в 1767 году на шахтных конных рельсовых дорогах Англии начали прокладывать чугунные рельсы. Первую в мире железную дорогу с применением паровозов Стоктон–Дарлингтон (Stockton–Darlington, Англия), которая была открыта 27 сентября 1825 года, сразу стали использовать, кроме прочего, и для перевозки каменного угля [1.16]. Поезд рекордной длины (правда, для перевозки не угля, а руды) был составлен 26 августа 1989 года в Южно-Африканской Республике. Он состоял из 660 вагонов общей массой (брутто) в 69 393 т и приводился в движение 9 электро- и 7 тепловозами, распределенными по длине состава. Длина поезда составляла 7,3 km, и расстояние в 861 km он покрыл за 22 часа и 40 минут.

Транспортировка топлива по железной дороге считается более надежной, чем другие виды перевозок. Однако и на железной дороге случаются аварии. Наиболее тяжелая железнодорожная катастрофа, связанная с перевозкой топлива, произошла 22 апреля 2004 года в Корейской Народной Демократической Республике на железнодорожной станции города Рионгчон (Ryongchon, на расстоянии 20 km от границы Китая), где столкнулись два поезда, нагруженные жидким топливом и сжиженным газом; при взрыве были полностью разрушены вокзал и близлежащие здания. Погибло или пострадало более 3000 человек.

Транспортировка топлива с низкой теплотворностью (например, бурого угля или горючего сланца) оправдывает себя только при доставке по железной дороге на небольшие расстояния (до нескольких десятков километров).

**Самолет**, как очень дорогое транспортное средство с относительно малой грузоподъемностью (до 250 t), используется для перевозок топлива лишь в исключительных случаях, например, для заправки военных самолетов в воздухе.

**Трубопроводный транспорт** весьма эффективен для передачи жидкого и газообразного топлива. Диаметр магистральных трубопроводов составляет обычно от 0,3 м до 1,5 м, в местных сетях применяются и меньшие диаметры (часто только несколько сантиметров). Магистральные **газопроводы** рассчитываются обычно на давление от 2,5 МПа до 10 МПа и на скорость газа приблизительно 10 м/с; в случае наземных газопроводов через каждые (50...100) км устанавливаются компрессорные станции (см. рис. 4.2.4). На морских газопроводах давление газа выше (например, 25 МПа), и компрессорная станция предусматривается обычно только в начале газопровода. Для привода компрессоров могут применяться как электродвигатели, так и газовые турбины, снабжаемые газом, как правило, с того же газопровода (вариант 2 на рис. 4.2.4). Газопотребление турбин обычно не превышает 1 % от количества перекачиваемого газа. В магистральных **нефтепроводах** и в других магистральных трубопроводах жидкого топлива скорость жидкости составляет чаще всего (1...2) м/с, и насосные станции наземных трубопроводов сооружаются через каждые (100...250) км.

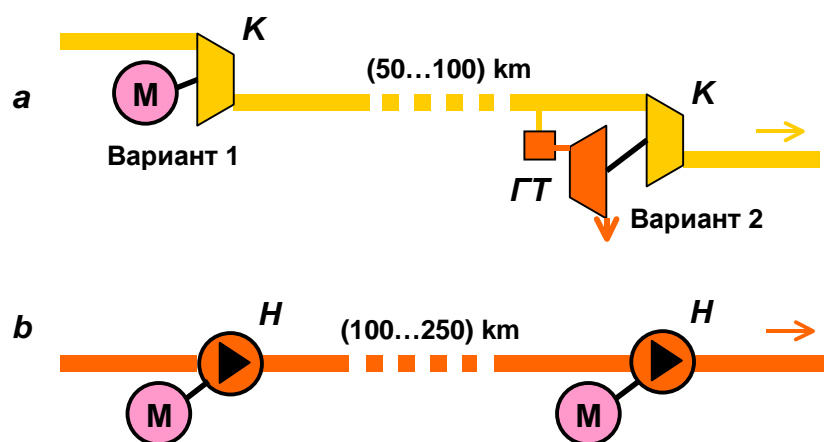


Рис. 4.2.4. Принципиальные схемы наземных трубопроводов для газа (а) и для жидкого топлива (b). ГТ газовая турбина, К компрессор, М электродвигатель, Н насос

По трубопроводам может передаваться и твердое топливо, в первую очередь, каменный уголь. Для этого он размалывается в зерна диаметром около 1 мм и перемешивается с водой в пропорции приблизительно 1:1. Такая смесь называется **пульпой** и может перекачиваться на расстояние до нескольких сотен километров, где воду отфильтровывают, а уголь размалывают в порошок и направляют в топку. Наиболее длинный трубопровод такого типа (439 км) снабжает углем электростанцию города Мохаве (Mojave, Калифорния, США) от шахты Блек Меза (Black Mesa, Аризона). Вместо воды в пульпе может использоваться и жидкое топливо (например, нефть или метанол).

Утверждают, что природный газ для испарения морской воды с целью получения соли передавали по бамбуковому трубопроводу небольшой длины уже 500 лет д. р. Х. в Китае с месторождения газа на побережье моря. Первый современный нефтепровод (диаметром 2 дюйма и длиной около 2 км) был построен в 1863 году в Пенсильвании (Pennsylvania, США). В 1990 году в Канаде вступил в строй самый длинный в мире нефтепровод Эдмонтон–Чикаго–Монреаль (Edmonton–Chicago–Montreal) – 3787 км, по которому передается 6000 м<sup>3</sup> нефти в сутки. Через Канаду проходит и самый длинный в мире газопровод – 13 955 км, по которому в 1995 году передали 67 миллионов кубометров природного газа. В настоящее время на всех континентах, прежде всего в Европе и Северной Америке, действуют густые сети нефте- и газопроводов. Недостатком этого вида транспортировки следует считать риск утечки, которая может привести к загрязнению природы или (в случае газопроводов) к взрыву. Наиболее тяжелые последствия имел взрыв, произошедший 13 июня 1989 года из-за утечки сжиженного газа из трубопровода, проходящего вблизи железной дороги между городами Уфа и Аша (Россия), в момент, когда в этом месте проезжали два встречных пассажирских поезда; погибло 575 и пострадало более 600 человек.

**Автомобильные перевозки** неизбежны для топливоснабжения малых и рассредоточенных потребителей. Для этой цели обычно применяются специальные дизельные топливовозы вместимостью от 5 t до 20 t. Суммарная масса топливовоза с грузом ограничена законодательными актами и составляет в разных странах обычно от 30 t до 60 t. Так как удельный расход энергии в виде дизельного топлива дизельных грузовиков (в том числе и топливовозов) составляет (1,4...4,6) MJ/(t km), что намного больше, чем в железнодорожном транспорте (где он в среднем равен 0,31 MJ/(t km)) или при трубопроводной передаче, то дальность автомобильных перевозок обычно не превышает нескольких десятков километров.

Первый грузовой автомобиль (рассчитанный на груз 1,5 t, с двигателем мощностью 4 л.с. и развивающий скорость до 16 km/h) изготовил в 1896 году немецкий промышленник Готтлиб Даймлер (Gottlieb Daimler, 1834–1900). Аварийные происшествия на автомобильном транспорте более часты, чем на железнодорожном или водном. Поэтому при перевозке жидкого топлива или газа следует строже выполнять требования безопасности (использование ночного времени, запрет на передвижение по определенным улицам или шоссе, ограничение скорости и т. п.). Наиболее тяжелая авария при перевозке сжиженного газа (пропана) имела место 11 июля 1978 года в Испании, вблизи курорта Коста Дорада (Costa Dorada), когда при взрыве автоцистерны на пляже погибло 216 отдыхающих. 3 ноября 1982 г. в Салангском туннеле (в Афганистане) столкнулись автоцистерна с жидким топливом и военный грузовик; в возникшем пожаре погибло по официальным данным 178 военнослужащих СССР и около 800 гражданских лиц Афганистана. Высказывались предположения и о большем числе жертв.

Твердое топливо может транспортироваться и **конвейерами**. Такой способ перевозок распространен в шахтах и внутри зданий, но встречается и в сложных горных условиях, где прокладка автомобильных или железных дорог затруднена. Конвейеры, как и трубопроводы, обеспечивают непрерывную подачу топлива, и их длина может достигать нескольких десятков километров. Недостатком являются большие потери на трение и, вследствие этого, большее удельное потребление энергии, чем на железнодорожном или на автомобильном транспорте. Наиболее длинная конвейерная линия (100 км, для транспортировки фосфорита) была построена в 1972 году в Испанской Сахаре от Минеа Букра (Minea Bucra) до Атлантического побережья.

Транспортировку топлива следует считать очень старым способом передачи энергии, изобретенным человеком, так как он был необходим уже в виде доставки дров к первым кострам.

### 4.3 ПЕРЕДАЧА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Применение любого механического орудия труда предполагает передачу механической энергии от мышц человека (обычно от мышц руки) к обрабатываемому предмету. Передавать механическую энергию таким способом человек научился, следовательно, уже при помощи первых примитивных необработанных каменных **ударных орудий** (рис. 4.3.1) – около 3 млн. лет назад.

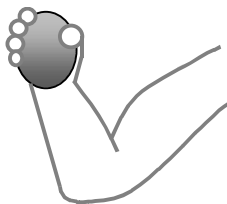


Рис. 4.3.1. Необработанный булыжник как первое (ударное) орудие труда и средство передачи энергии

Со временем из камня, путем обработки, научились изготавливать скребки, ножи, топоры, молоты и другие ручные орудия труда. Для понимания же, что энергию можно передать и при помощи **броска**, человеку потребовалось более двух миллионов лет. Чтобы бросить камень или другой предмет в цель, нужна определенная осмысленная координация движений. Предполагают, что именно с этим связано начало более быстрого развития мозга и человеческого разума.

Как уже сказано (см. раздел 1.4), приблизительно 50 000 лет назад в Южной и Юго-западной Африке в развитии интеллектуальных способностей человека произошел некоторый скачок. Это привело к тому, что для передачи механической энергии он стал пользоваться **передаточными механизмами силы**. Древнейшим из них считается **рычаг** (рис. 4.3.2). Приблизительно тогда же человек научился производить огонь, вращая между ладонями сухой сучок, который своим нижним концом терся о сухую древесную основу; таким образом возник первый примитивный **вал**. Несколько позже были изобретены такие охотничьи и военные орудия как **метательное копье** и **лук**. Копья и стрелы оказались эффективными носителями, а лук эффективным **аккумулятором** механической энергии.

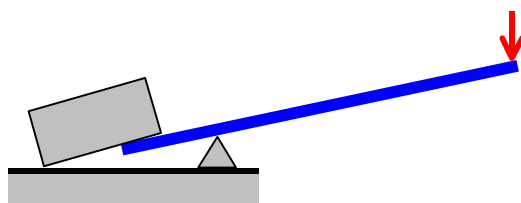


Рис. 4.3.2. Рычаг

Приблизительно 5000 лет д. р. Х. человек умел приводить в движение сучок для получения огня путем натирания уже быстрее и более эффективно – при помощи **петлевого смычка** (рис. 4.3.3). В этом механизме уже можно различить комбинацию вала и шнуровой передачи, а также преобразование

возвратно-поступательного движения во вращательное. Примерно через 1000 лет на основе этого механизма возникли первые дрели и токарные станки.

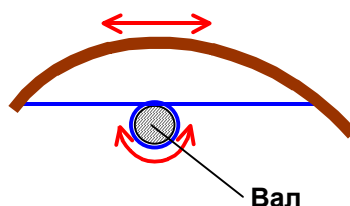


Рис. 4.3.3. Петлевой смычок

Приблизительно за 3000 лет д. р. Х. было изобретено колесо и началось изготовление различных колесных механизмов. В первую очередь следует, естественно, назвать **колесницу**, но за полтора тысячелетия д. р. Х. стали применяться **подъемные механизмы**, состоявшие из колеса и вóрота (рис. 4.3.4). Уже до этого появились многие рычажные механизмы, в том числе весла и колодезные журавли.

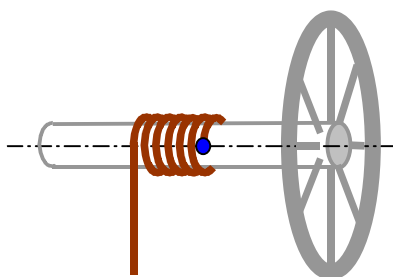
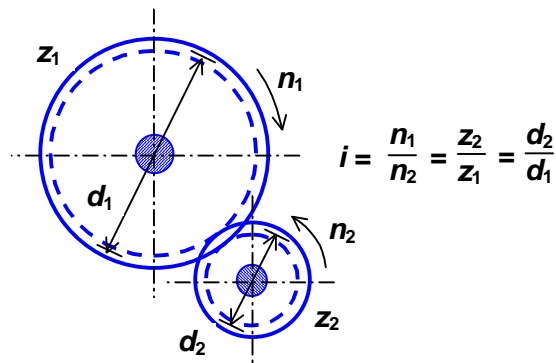


Рис. 4.3.4. Подъемный механизм, состоящий из колеса и вóрота (передача энергии от колеса к веревке)

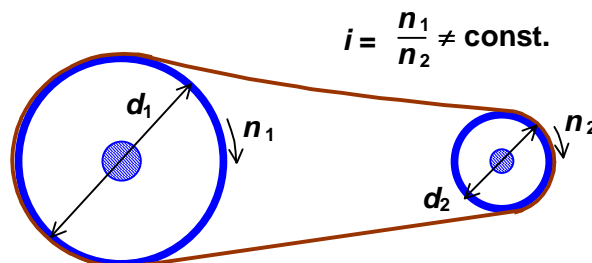
Первые **зубчатые передачи** появились в мощных (приводимых в движение тягловыми животными) насосных приводах приблизительно за 1000 лет д. р. Х. и вскоре (около 200 лет д. р. Х.) стали использоваться на **водяных мельницах**. Принципы и свойства зубчатых передач описывал Аристотель в своих трудах в 330 году д. р. Х.. В настоящее время разнообразные зубчатые передачи применяются в **редукторах** и в других механизмах, предназначенных для изменения скорости вращения, а иногда и вида движения. На рис. 4.3.5 представлено условное обозначение простейшей одноступенчатой зубчатой передачи.

На высококвалифицированном применении зубчатых передач основывается, между прочим, первое в мире аналоговое вычислительное устройство, сконструированное для вычисления предстоящих небесных явлений (в том числе лунных и солнечных затмений) предположительно в 60-е годы д. р. Х. на острове Родос греческим астрономом и философом Посейдониосом (Poseidonios, 135 – 51 д. р. Х.) и найденное в 1902 году в утонувшем древнем паруснике около острова Антикютера (Antikythera).



**Рис. 4.3.5.** Одноступенчатая цилиндрическая зубчатая передача.  $n_1$  и  $n_2$  частоты вращения,  $z_1$  и  $z_2$  числа зубьев,  $d_1$  и  $d_2$  диаметры начальных окружностей ведущего и ведомого колеса (начальные окружности на рисунке не показаны),  $i$  передаточное число

**Ременную передачу** (рис. 4.3.6) впервые описал Архимед приблизительно в 250 году д. р. Х. В отличие от зубчатой, эта разновидность передачи позволяет передать энергию на расстояние до нескольких десятков метров. Коэффициент передачи определяется диаметрами ведущего и ведомого шкивов, но фактическая скорость ведомого шкива из-за *скольжения* ремня несколько меньше теоретической и зависит от нагрузки. Скольжение может быть исключено путем применения не гладкого, а зубчатого ремня. Очень похожими на ременные передачи по принципу и свойствам являются **канатные** и **цепные** передачи; некоторые из них позволяют передавать энергию на расстояние до нескольких километров.



**Рис. 4.3.6.** Одноступенчатая ременная передача.  $d_1$  диаметр ведущего шкива,  $d_2$  диаметр ведомого шкива,  $n_1$  и  $n_2$  частоты вращения ведущего и ведомого шкивов,  $i$  коэффициент передачи

Механическую энергию можно передать и при помощи **потока жидкости** (чаще всего – воды или масла) и **сжатого газа** (чаще всего – сжатого воздуха). Использование потока жидкости началось с подвода воды к водяным колесам и продолжается в наше время в виде напорных трубопроводов и подводящих (*деривационных*) каналов гидроэлектростанций. В некоторых станках и других рабочих машинах находит применение и **гидропривод**, изобретенный в 1874 г. братьями Саломоном и Йоганном Яковом Зульцер (Salomon и Johann Jacob Sulzer, Швейцария). В таком приводе в качестве энергоносителя используется масло (рис. 4.3.7), и его преимуществом считают обычно то, что гидродвигатель более прост по конструкции, занимает меньше места и вписывается в некоторые механизмы лучше, чем электродвигатель.

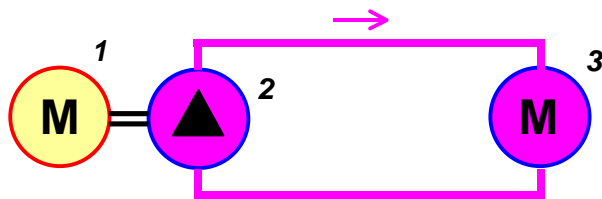


Рис. 4.3.7. Схема гидропривода. 1 электродвигатель, 2 масляной насос, 3 гидродвигатель

**Сжатый воздух** впервые применил приблизительно в 230 году д. р. Х. в своем опытном стреляющем устройстве греческий механик Ктесибий (Ktesibios, 3-ий век д. р. Х.) в Александрии. Основы современной техники сжатого воздуха (системы, изображенной на рис. 4.3.8 и состоящей из компрессора, аккумулятора и потребителей сжатого воздуха) заложил в 1687 г. французский физик Дени Папен (Denis Papin, 1647–1712). Такая система находит широкое применение в промышленности и строительстве, так как пневматические рабочие инструменты зачастую проще, легче и менее опасны, чем электрические. Сжатый воздух находит применение и на электростанциях и подстанциях, в приводах мощных электрических аппаратов (например, высоковольтных выключателей).

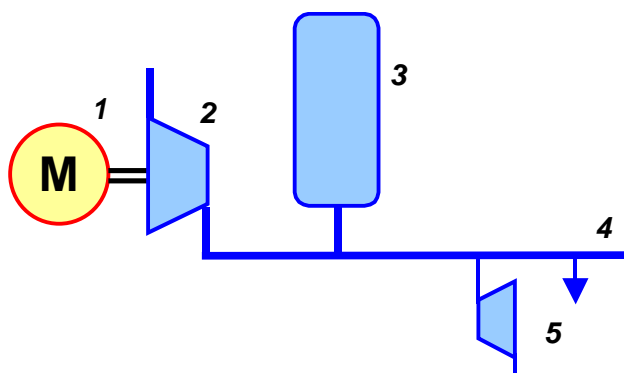


Рис. 4.3.8. Передача энергии при помощи сжатого воздуха. 1 электродвигатель, 2 компрессор, 3 аккумулятор (ресивер) сжатого воздуха, 4 магистраль сжатого воздуха, 5 к потребителям

Передача механической энергии может происходить с одновременным изменением ее *параметров* (например, скорости вращения). Для этого, кроме рассмотренных зубчатых, ременных и других передач, могут использоваться специальные преобразователи механической энергии – **редукторы** и **вариаторы** (рис. 4.3.9). Коэффициент передачи редукторов является постоянным или меняется несколькими (обычно 2...6) ступенями, а в вариаторах может в некоторых пределах изменяться плавно.

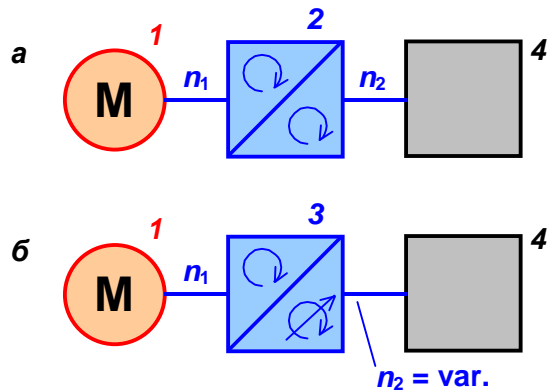


Рис. 4.3.9. Принцип использования редуктора (а) и вариатора (б). 1 силовая машина (двигатель, турбина или др.), 2 редуктор, 3 вариатор, 4 рабочая машина.  $n_1$  входная частота вращения,  $n_2$  выходная частота вращения

Редукторы и вариаторы с регулируемым коэффициентом передачи часто настолько сложны и тяжелы, что вместо них для регулирования скорости рабочей машины целесообразно использовать промежуточный регулируемый электропривод (обычно с преобразователем частоты), как показано на рис. 4.3.10.

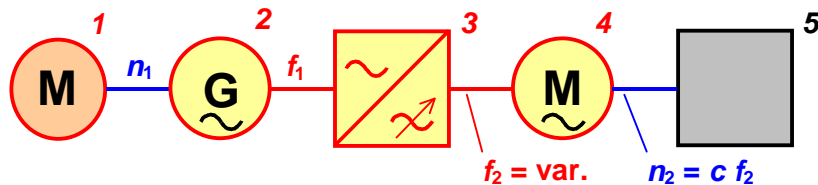


Рис. 4.3.10. Принцип использования электропривода с преобразователем частоты для плавного регулирования частоты вращения рабочей машины. 1 силовая машина (двигатель, турбина или др.), 2 генератор переменного тока, 3 преобразователь частоты, 4 двигатель переменного тока, 5 рабочая машина.  $f_1$  первичная,  $f_2$  вторичная частота,  $n_1$  постоянная частота вращения силовой машины,  $n_2$  регулируемая частота вращения рабочей машины,  $c$  коэффициент пропорциональности

В заключение следует отметить, что механическую энергию можно использовать и преобразовывать весьма разнообразными способами, но передавать ее целесообразно на сравнительно небольшие расстояния. Открытие первых примитивных способов передачи механической энергии вместе с первыми орудиями труда может считаться **рождением техники**.



## 4.4 ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА

Тепло может передаваться при помощи твердых, жидких и газообразных **теплоносителей**. В главе 3, например, рассматривалась передача энергии при помощи перегретого пара от парогенератора к паровой турбине; передаваемая мощность могла достигать при этом до нескольких гигаватт. В разделе 3.15 рассматривались теплообменники, холодильники и тепловые насосы, в которых тепло тоже передавалось из одной среды в другую.

Наиболее широко передачу тепловой энергии используют в различных системах **отопления**. При обычном печном отоплении тепло распространяется в помещении путем естественной конвекции воздуха (рис. 4.4.1). По такому же принципу можно устроить и *центральное* отопление, как это делалось уже в старом Риме за 100 лет д. р. Х. (рис. 4.4.2).

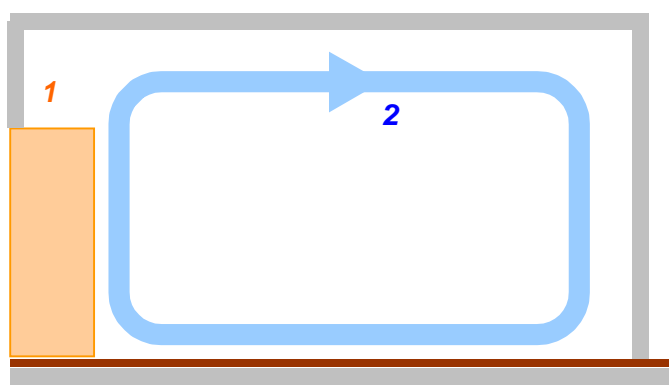


Рис. 4.4.1. Передача тепла в помещении при печном отоплении. 1 печь, 2 направление циркуляции воздуха

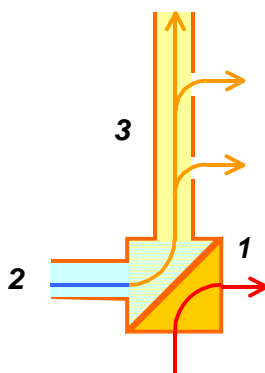
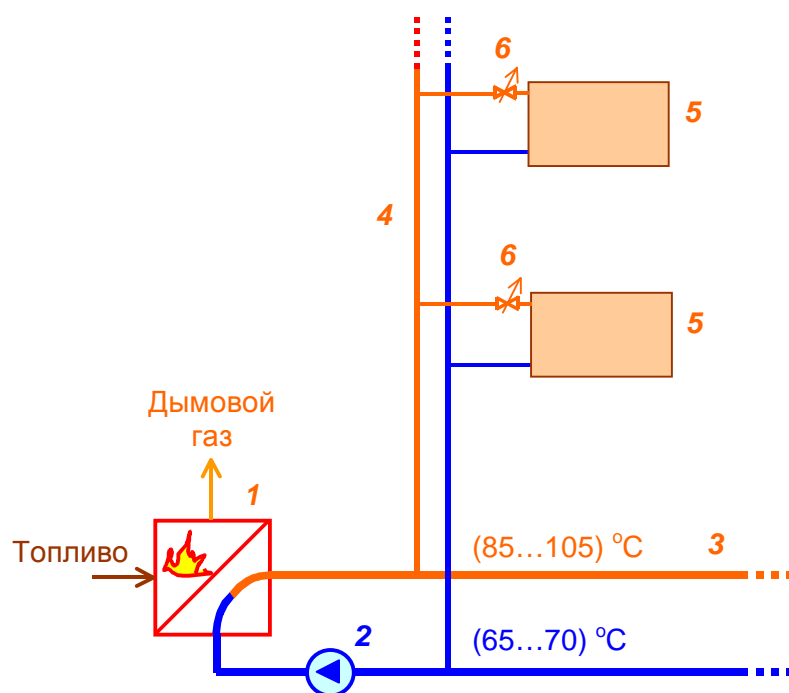


Рис. 4.4.2. Принцип передачи тепла при воздушном центральном отоплении. 1 печь, 2 вход холодного воздуха, 3 канал нагретого воздуха

**Водяное центральное отопление** впервые реализовал в 1716 г. в Ньюкасле (Newcastle, Англия) шведский механик Мортен Тривальд (Mårten Triewald, 1691–1747) [3.7]. К настоящему времени горячая вода стала главным теплоносителем в системах центрального отопления зданий и в *теплофикации*. В центральном отоплении могут применяться различные

способы распределения воды между батареями отопления [4.2]; на рис. 4.4.3 представлен принцип *двухтрубной* системы центрального отопления многоэтажного здания при *нижнем распределении*.



**Рис. 4.4.3. Передача тепла при водяном центральном отоплении (пример).**  
**1 котел горячей воды, 2 циркуляционный насос, 3 распределительная магистраль, 4 двухтрубный стояк, 5 отопительная батарея (конвектор или радиатор), 6 вентиль регулирования**

**Теплофикация** от центральных котельных и *теплоэлектроцентралей (ТЭЦ)* возникла в 1893 г., когда в Гамбурге (Hamburg, Германия) была построена первая ТЭЦ. Сейчас этот способ передачи тепла на расстояние приблизительно до 20 км широко применяется в городах (рис. 4.4.4). Теплофикация требует однако материалоемких подземных или наземных трубопроводов горячей воды и их высокоэффективной теплоизоляции. Это может существенно увеличить стоимость поставляемого потребителям тепла, вследствие чего в последнее время иногда стали возвращаться к индивидуальному отоплению зданий.

**Паровое центральное отопление** (рис. 4.4.5) находит применение главным образом на промышленных предприятиях, имеющих собственную паротурбинную электростанцию, для отопления больших помещений в радиусе приблизительно до 1 км. В батареях отопления пар конденсируется и возвращается обратно в питательную систему парогенератора. Таким же способом пар, как теплоноситель, может использоваться в различных производственных процессах (например, для паровой сушки древесины).

Первым паровое отопление своего рабочего помещения в 1784 году применял Джеймс Уатт (см. раздел 3.2).

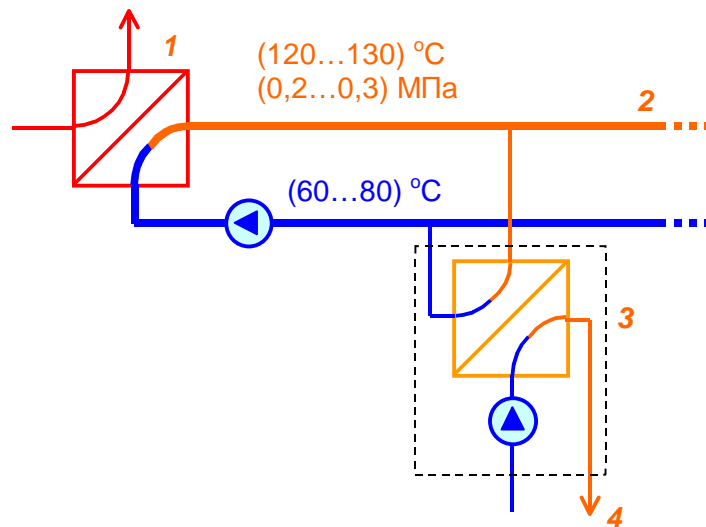


Рис. 4.4.4. Передача тепла при теплофикации. 1 теплообменник (бойлер), 2 тепловая магистраль, 3 теплоузел здания, 4 ввод центрального отопления

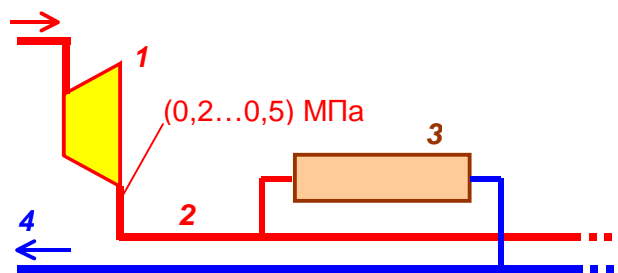


Рис. 4.4.5. Принцип парового центрального отопления. 1 паровая турбина с противодавлением или промежуточным отбором пара, 2 паровая магистраль, 3 отопительная батарея, 4 возврат конденсата

Передачу тепла при помощи **твердых теплоносителей** используют сравнительно редко, преимущественно в химической промышленности (в частности, в установках производства сланцевого масла) и при тепловой обработке материалов. Могут применяться и *предметные* теплоносители (утюги, паяльники и др.).

Теплопередачу **излучением** (главным образом – *инфракрасным излучением*) используют при тепловой обработке некоторых материалов (при сушке слоя краски, в некоторых металлургических установках и др.). Источниками энергии в таком случае могут служить электрические излучатели, например, инфракрасные лампы накаливания (рис. 4.4.6).

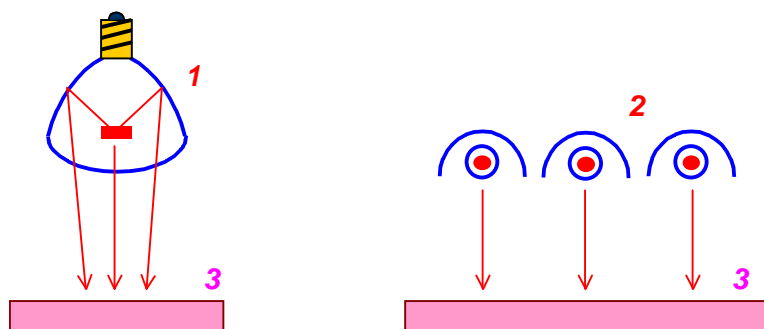


Рис. 4.4.6. Примеры использования инфракрасных ламп накаливания. 1 зеркальная инфракрасная лампа, 2 трубчатые инфракрасные лампы с зеркальными рефлекторами, 3 нагреваемый предмет

## 4.5 ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Электроэнергия может передаваться

- по проводникам (например, по линиям электропередачи),
- без применения проводников (электромагнитным полем).

В энергетической технике в подавляющем большинстве случаев используется первый способ, а второй распространен в высокочастотной технике (прежде всего, в радиотехнике).

Термин *электрический проводник* имеет два значения:

- 1) электропроводящее вещество (например, металл или электролит),
- 2) деталь, изделие или конструкция, позволяющие передавать электричество.

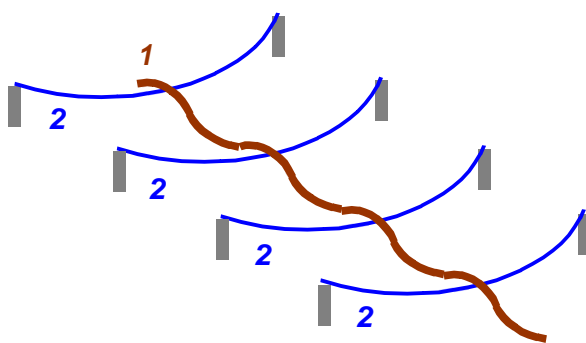
Первое значение используется в физике и в материаловедении, где все материалы по своей электропроводности делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники. В энерготехнике чаще пользуются вторым значением этого термина.

Передача электрической энергии по проводникам может происходить

- от одного элемента источника, преобразователя или приемника электрической энергии к другому по **соединяющим проводникам** на расстояние от нескольких нанометров (например, в интегральных схемах) до нескольких метров (например, в мощном силовом оборудовании);
- от одного элемента электроустановки к другому или от одной электроустановки к другой по **электрическим линиям** на расстояние от нескольких метров (например, в пределах одной установки) до нескольких тысяч километров (между крупными энергосистемами).

Совокупность линий и их узлов в электроустановке называется **электропроводкой**, а совокупность линий и их узлов, связывающая между собой электроустановки, – **электрической сетью**. По назначению и протяженности в энергосистемах различают *системообразующие (основные)* и *распределительные* сети, на предприятиях межцеховые и цеховые сети и др.

Передачу электрического заряда по проводнику (льняной нити) обнаружил в 1663 г. мэром города Магдебурга Отто фон Гюрике (Otto von Guericke, 1602–1686), который перед этим в том же году изготовил первый в мире электростатический генератор. Более подробное исследование электрических явлений началось в 18-м веке, и **2 июля 1729 года** английский физик-любитель Стивен Грей (Stephen Gray, 1666–1735) проложил, используя для проверки передаваемости электричества, конопляную веревку длиной в 80,5 футов на горизонтальных шелковых шнурах (рис. 4.5.1); этим он создал первую в мире **электрическую линию**. 14 июля он провел публичную демонстрацию линии, длина которой была уже 650 футов, а проводом в которой по-прежнему служила конопляная веревка, проложенная по шелковым шнурам, натянутым между опорами (первая **воздушная линия**). Опыт, несмотря на очень плохую проводимость провода, удивительным образом удался; веревка, очевидно, была (благодаря английскому климату) достаточно влажной. Грей впервые ввел также классификацию веществ на *проводящие* и *непроводящие*. Спустя 10 лет (в 1739 году) другой английский физик Жан Теофил Дезагюлье (Jean Théophile Desaguliers, 1683–1744) ввел понятие **проводник** (англ. *conductor*). Первую воздушную линию с **металлическими** (железными) проводами построил в 1744 году в Эрфурте (Erfurt, Германия) немецкий профессор философии Андреас Гордон (Andreas Gordon, 1712–1751), а первую опытную **кабельную** (телеграфную) линию проложил в 1841 году в Санкт-Петербурге Борис Семенович Якоби (Moritz Hermann Jacobi, см. раздел 3.13).



**Рис. 4.5.1. Принцип устройства первой электрической линии Стивена Грея. 1 конопляная веревка (провод), 2 шелковые шнуры (изоляторы)**

В технике электропередачи находят применение как гибкие, так и жесткие проводники. К первым относятся различные **провода** и **кабели**, ко вторым **шины**. Провода и шины могут быть изолированными или неизолированными (*голыми*). Изолированные провода и кабели могут содержать от одной до нескольких **токоведущих жил**, изолированных друг от друга. Отличительным признаком кабеля является **герметичная оболочка**, изготовленная из полимерных материалов (например, из поливинилхлорида) или из металла (в настоящее время чаще всего из алюминия, раньше главным образом из свинца), защищающая жилы от вредных воздействий окружающей среды. Упрощенная классификация проводников по их гибкости, изоляции и области применения приведена на рис. 4.5.2.

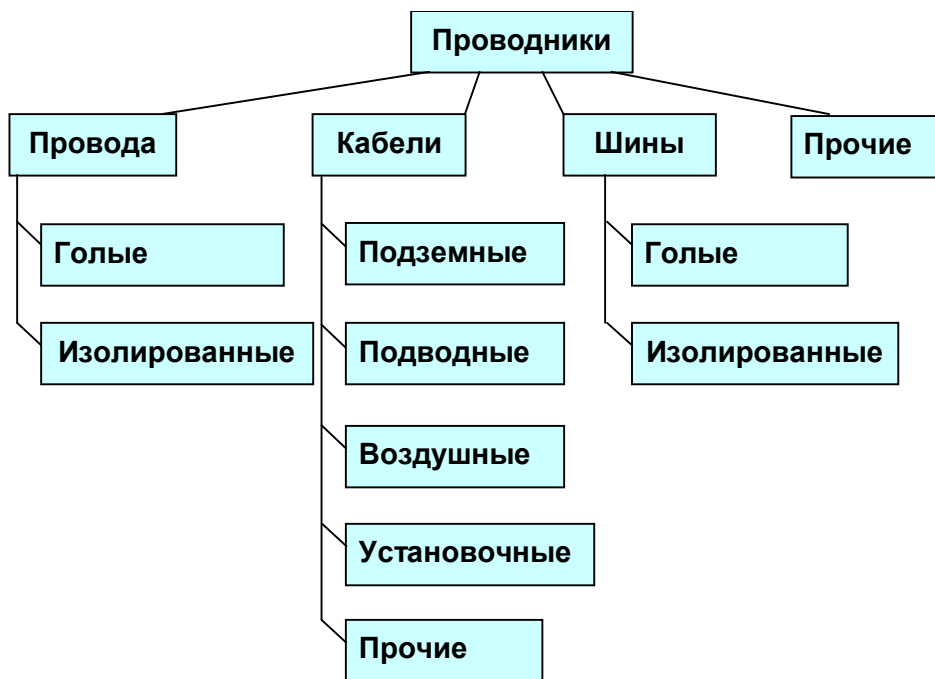


Рис. 4.5.2. Классификация проводников (упрощенно)

Металлическая часть жил, в зависимости от сечения и требуемой гибкости, может быть *массивной* или состоять из *проволок*; диаметр проволок может при этом составлять от десятых долей миллиметра (в *тонкопроволочных* жилах) до нескольких миллиметров.

От проводников требуется

- высокая электропроводность,
- хорошие контактные свойства,
- высокая электрическая прочность изоляции,
- достаточная механическая прочность,
- достаточная гибкость (в случае проводов и кабелей),
- долгосрочная химическая стабильность,
- достаточная стойкость при нагреве,
- достаточная теплоемкость,
- защищенность от внешних воздействий,
- безвредность для окружающей среды,
- простота использования в электромонтажных работах,
- умеренная стоимость.

Из электропроводных материалов этим требованиям лучше всех соответствуют

- чистая (без каких-либо примесей) медь,
- чистый алюминий (по соображениям надежности – начиная с сечения  $16 \text{ mm}^2$ ),
- в проводах воздушных линий – комбинации алюминия и стали.

Из изоляционных материалов наиболее часто используют

- полиэтилен  $[\text{C}_2\text{H}_4]_n$ ,

- поливинилхлорид  $[C_2H_3Cl]_n$ , который лучше других материалов сопротивляется воспламенению, но который содержит ядовитый и опасный для окружающей среды хлор,
- синтетические (в том числе особо нагревостойкие кремнийорганические) каучуки.

Электрические линии характеризуют обычно следующие показатели:

- род тока (переменный или постоянный); чаще всего применяют трехфазный переменный ток частотой 50 или 60 Hz;
- номинальное напряжение, находящееся в электропроводках обычно в пределах от 12 V до 1000 V, в электрических сетях низкого напряжения – от 230 V до 690 V, а в электрических сетях высокого напряжения – от 3 kV до 1200 kV;
- передаваемая мощность, которая может быть в пределах от нескольких ватт до нескольких гигаватт;
- сечение проводников (в установках электроснабжения обычно от 1 mm<sup>2</sup> до 10 000 mm<sup>2</sup>);
- длина (от нескольких метров до нескольких тысяч километров),
- конструктивное исполнение (воздушная или кабельная линия, шинопровод или др.).

**Номинальным напряжением** сети  $U_n$  считается *междуфазное* (в случае постоянного тока – *междуполусное*) номинальное напряжение питаемых от сети электроприемников. Если для однофазных электроприемников может предусматриваться как междуфазное, так и фазное напряжение ( $U_f$ ), то номинальное напряжение сети представляют в виде дроби  $U_{fn} / U_n$ , например, 230 V / 400 V.

Значения фазного и междуфазного напряжения иногда представляют более кратко в виде дроби, например, 230/400 V, однако такая форма записи не соответствует стандарту на обозначения электротехнических величин и единиц [1.6].

**Низким** называется переменное напряжение до 1000 V и постоянное напряжение до 1500 V. Напряжение, превышающее эти значения, называется **высоким**. В диапазоне низких напряжений различают область **малого напряжения** (до 50 V переменного или до 120 V постоянного тока).

В Эстонии обычно используются следующие номинальные напряжения:

- из малых напряжений – 6 V, 12 V, 24 V, 36 V и 48 V,
- из остальных низких напряжений – 230 V, 400 V и (реже) 690 V,
- из высоких напряжений 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV, 220 kV и 330 kV; предусматривается отказ от напряжений 15 kV и 220 kV.

Вместо стандартных напряжений 230 V и 400 V во многих сетях низкого напряжения Эстонии встречаются еще старые напряжения 220 V и 380 V, не предусмотренные действующими международными стандартами.

Проводники (и жилы многожильных проводников) делятся по их назначению

- на **рабочие проводники** (к которым в случае переменного тока относятся фазные и нейтральные проводники; в некоторых сетях или установках нейтральные проводники могут отсутствовать);

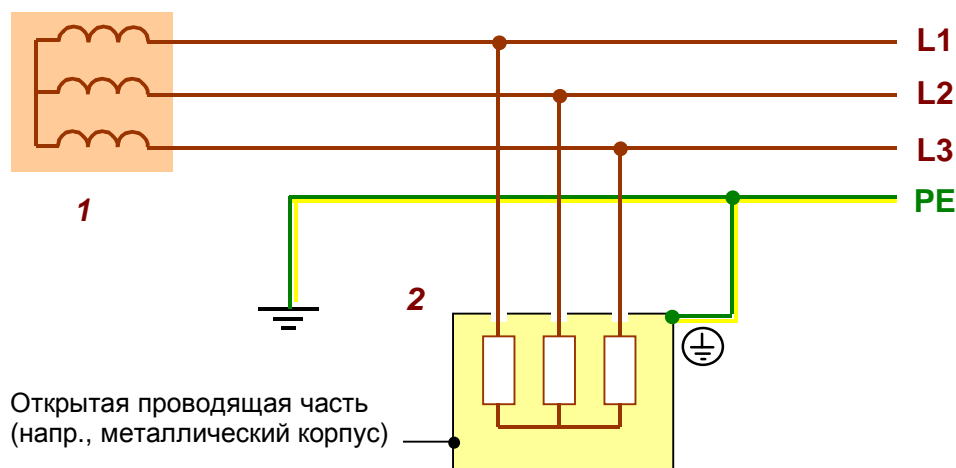
- на **защитные проводники**, необходимые для обеспечения безопасности людей;
- на **вспомогательные проводники** (например, для управления, связи или сигнализации).

Рабочие проводники могут быть все изолированы от земли, но часто один из них (обычно нейтральный) **заземлен**. Таким **рабочим заземлением** достигается более низкое и равномерно распределенное напряжение фазных проводников относительно земли, что, например, в сетях высокого напряжения позволяет снизить стоимость изоляции.

Защитные проводники предусмотрены для надежного заземления тех частей электроустановок, которые при нарушении изоляции могут оказаться под напряжением (*открытых проводящих частей*). Такое **защитное заземление** должно исключить возникновение опасного напряжения между этими частями и землей и тем самым исключить возможность поражения людей электрическим током. В электрических сетях низкого напряжения ранее практиковалось совмещение защитного и нейтрального проводников; в настоящее время эти проводники, по соображениям надежности и безопасности, друг от друга отделены.

В Эстонии встречаются, главным образом, три стандартные системы низковольтных сетей [4.3]:

- **система IT**, с изолированием всех рабочих проводников от земли (рис. 4.5.3);
- **система TN-C**, в которой защитный проводник совмещен с заземленным нейтральным проводником (рис. 4.5.4);
- **система TN-S**, с отдельными защитным и нейтральным проводниками (рис. 4.5.5).



**Рис. 4.5.3. Система IT. 1** вторичная обмотка трансформатора, питающего данную сеть, **2** электроприемник. В установке обычно используется общий для всех электроприемников защитный проводник (PE), но электроприемники могут заземляться и отдельно или группами



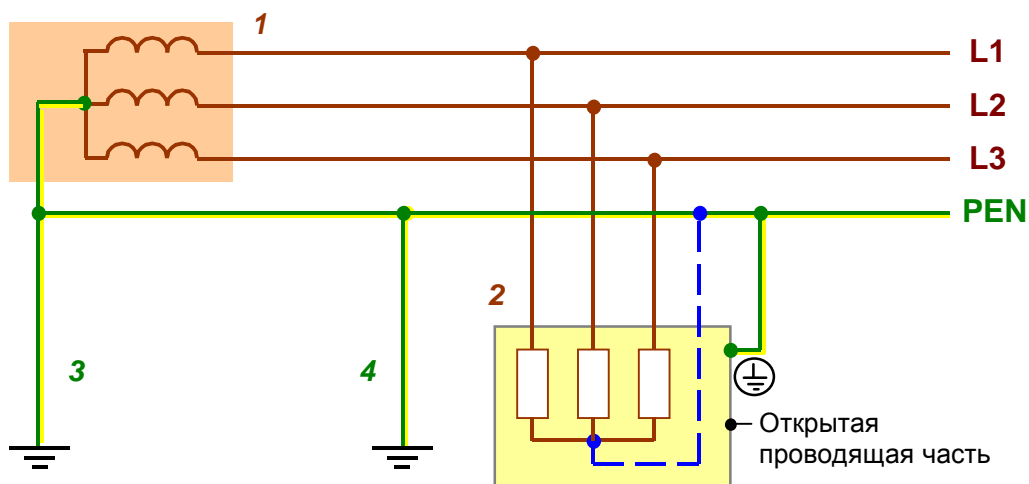


Рис. 4.5.4. Система TN-C. 1 вторичная обмотка трансформатора, питающего данную сеть, 2 электроприемник, 3 заземление сети, 4 заземление установки

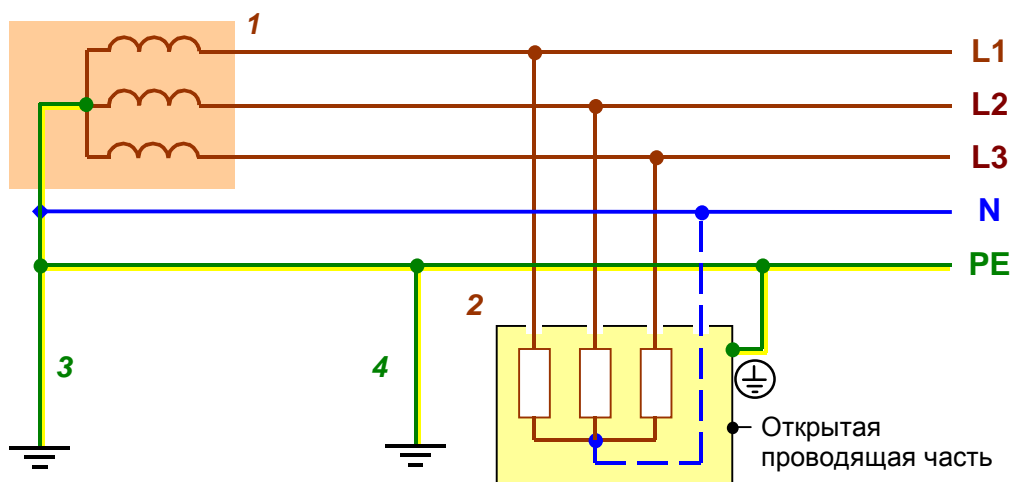


Рис. 4.5.5. Система TN-S. 1 вторичная обмотка трансформатора, питающего данную сеть, 2 электроприемник, 3 заземление сети, 4 заземление установки

Международные обозначения систем низковольтных сетей происходят от французского языка. Первая буква показывает, изолирована ли сеть от земли (*I – isolé*) или используется рабочее заземление (*T – terre*, 'земля'). Вторая буква показывает, соединены ли защитные проводники только с землей (*T – terre*) или еще и с нейтральной точкой сети (*N – neutre*). Дополнительная буква показывает, совмещены ли нейтральный и защитный проводники (*C – combiné*) или они отделены друг от друга (*S – séparé*).

Международные обозначения проводников на рисунках 4.5.3, 4.5.4 и 4.5.5 взяты из английского языка. Фазные проводники обозначаются буквами и цифрами **L1**, **L2** и **L3** (*live*, 'под напряжением'), нейтральный – буквой **N** (*neutral*), защитный – буквой **P** (*protection*, 'защита'), заземляющий – буквой **E** (*earth*, 'земля'), защитный заземляющий – буквами **PE**, совмещенный защитно-нейтральный буквами **PEN**. В однофазном оборудовании фазный проводник обычно обозначается буквой **L**. Чтобы различать проводники во время монтажа

и при обслуживании установки по расцветке, изоляцию фазных проводников окрашивают в коричневый, черный или серый цвета; изоляцию нейтрального проводника – в голубой, а изоляцию защитного проводника в желто-зеленый цвет (полосатый, с приблизительно одинаковой шириной полос). Проводник PEN маркируется на концах дополнительными голубыми кольцами или другим подобным способом. Особенно важным считается правильное и отчетливое обозначение **защитных проводников**. Место присоединения защитного проводника к электрооборудованию, как показано на рисунках, обозначается *символом защитного заземления*.

Раньше использовались и другие обозначения, например, для фазных проводников *A, B и C* (в СССР) или *R, S и T* (в Центральной и Восточной Европе). Для нейтральных и защитных проводников применялась цифра *0*. Незаземленные нейтральные проводники в электроустановках обозначались довольно часто белым, заземленные нейтральные и защитные проводники – черным цветом. Заземленный нейтральный проводник назывался *нулевым проводником* (сейчас международными стандартами такое название не предусматривается).

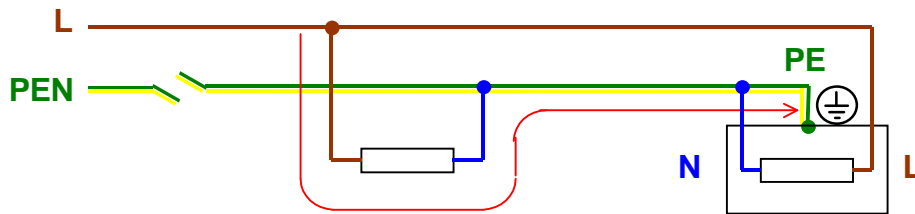
**В сетях типа IT** повреждение изоляции одной фазы относительно земли не вызывает никакой прямой опасности для людей или оборудования и не требует, следовательно, немедленного отключения. Эта система отличается поэтому повышенной надежностью электроснабжения и ее применяют в ответственных случаях (в больницах, на железнодорожных вокзалах, в аэропортах, в установках обработки информации, управления и связи и т. п.). Такие сети должны быть снабжены автоматическими устройствами постоянного контроля сопротивления изоляции и обнаружения токов утечки.

В 1873 году, когда французский инженер Ипполит Фонтен (Hippolyte Fontaine, 1833–1917) на Венской международной электротехнической выставке продемонстрировал передачу электроэнергии с генератора на двигатель по проводам длиной в 1 км, показал необходимость тщательно изолировать провода и электрооборудование от земли. Поэтому систему IT следует считать старейшей системой передачи электрической энергии. Защитное заземление появилось в этой системе в 1898 году по предложению Германского союза электротехников. В Эстонии сети IT с номинальным напряжением 220 В встречаются в старых частях некоторых городов (включая Таллинн) в устаревшем виде – без упомянутой контрольной аппаратуры и без защитного заземления у большинства потребителей. Постепенно они будут заменены сетями типа TN-C / TN-S или TN-S. В новых установках сети IT предусматриваются в случае повышенных требований по бесперебойности электроснабжения.

**В сетях типа TN** при нарушении изоляции (например, при *замыкании на корпус*) открытые проводящие части попадают под опасное напряжение. Чтобы обеспечить защиту людей от поражения электрическим током, защитные аппараты (плавкие предохранители или автоматические выключатели) должны быстро отключить поврежденную часть проводки или электрооборудования. Отключения происходят, следовательно, несколько чаще, чем в системах IT, но отпадает необходимость в непрерывном контроле состояния изоляции, что приводит к упрощению сети и к снижению ее стоимости.

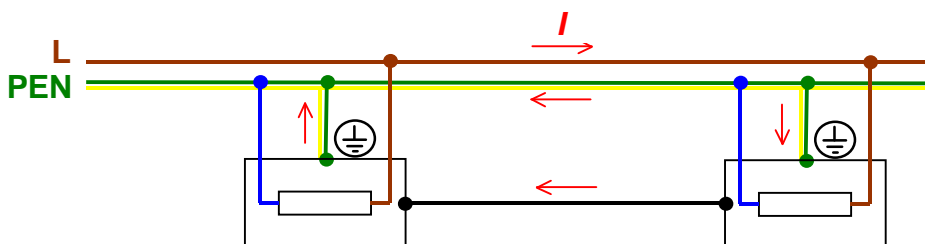
В системе TN-C, предложенной немецким концерном АЭГ (*AEG, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft*) в 1913 году, совмещение нейтрального и защитного проводников дает некоторую экономию, но сопровождается недостатками, которые в настоящее время стали неприемлемыми. Наиболее существенными следует считать два из них:

- 1) так как проводник PEN через электроприемники гальванически связан с фазными проводниками, то его обрыв может привести к опасному повышению напряжения в той его части, которая после обрыва уже не соединена с землей, и на корпусах электрооборудования, а также на других открытых проводящих частях может возникать опасное напряжение (рис. 4.5.6);



**Рис. 4.5.6. Возникновение опасного напряжения на корпусах электрооборудования при обрыве провода PEN**

- 2) так как в нейтральном проводнике всегда протекает некоторый ток, вызванный неравномерной нагрузкой фаз, то напряжение проводника PEN относительно земли не равно нулю (составляя обычно несколько вольт) и имеет в разных точках электропроводки разные значения; такая неравномерность напряжения может оказаться опасной для микроэлектронных устройств (например, ЭВМ), заземленных через проводник PEN и соединенных между собой по экранированным линиям слабого тока (рис. 4.5.7).



**Рис. 4.5.7. Возникновение паразитного тока в экране кабеля связи между электронными устройствами при заземлении их корпусов через проводник PEN. Электронная часть электронных устройств не показана**

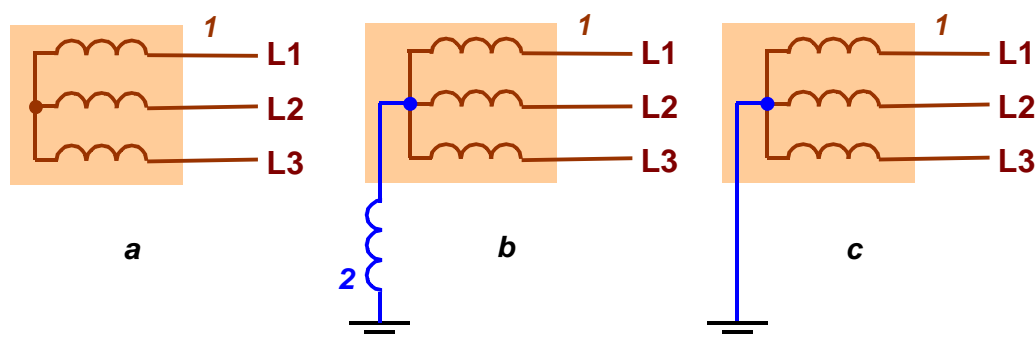
Система TN-C в настоящее время уже не может рекомендоваться для электроустановок зданий, а может применяться только в сети между питающей подстанцией и зданиями. В вводном устройстве здания проводник PEN разветвляется на нейтральный и защитный (PE- и N-) проводники, а зажим разветвления соединяется с заземляющим устройством установки. Другими словами, в вводе в здание переходят с системы TN-C на систему TN-S.

В Эстонии с 1945 по 1995 год строились, главным образом, сети TN-C с номинальным напряжением 220 V / 380 V; частично они переведены на новое стандартное напряжение 230 V / 400 V. В ближайшие годы этот переход должен завершиться и одновременно планируется ускорить переход на систему TN-S во всех зданиях.

**В системе TN-S**, применение которой началось в Европе в 1930-х годах, защитный проводник не имеет гальванического соединения с рабочими проводниками, и в нормальном режиме работы в нем нет тока. Это обеспечивает как более надежную защиту людей от поражения электрическим током, так и требуемый режим работы микроэлектронных устройств. В настоящее время в Эстонии и в других странах восточной Европы начато постепенное переоборудование систем TN-C на системы TN-S. При проектировании новых зданий система TN-C уже не предусматривается.

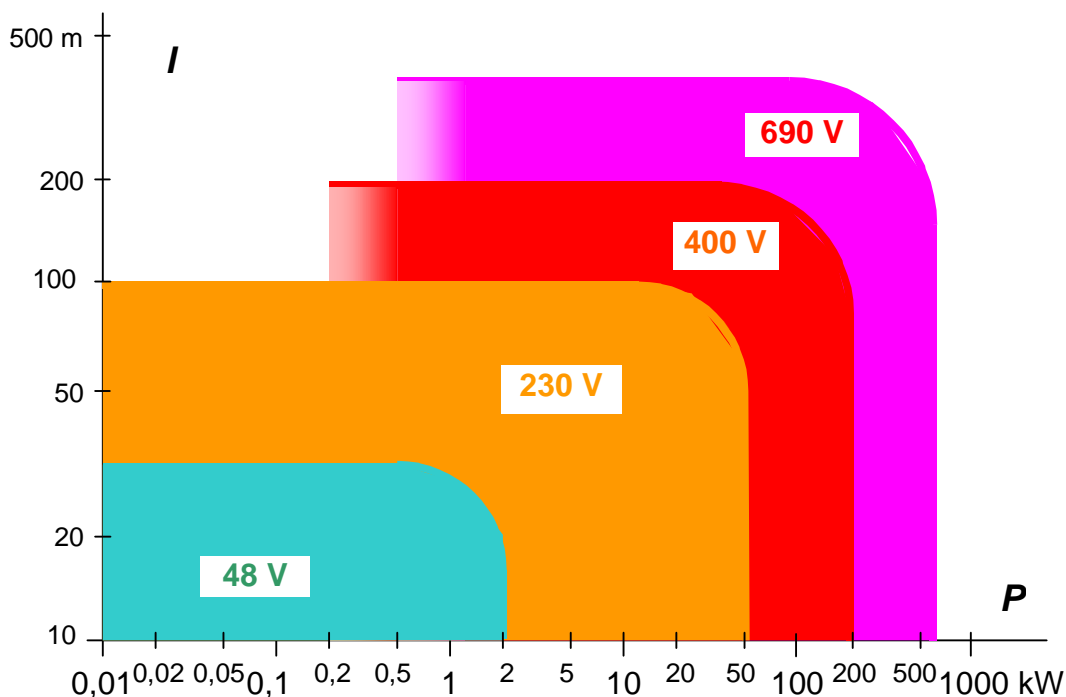
**В сетях высокого напряжения** с напряжением до 35 kV нейтральная точка источника питания в простейшем случае не заземлена (рис. 4.5.8,а). В случае однофазного замыкания на землю контур тока, аналогично сетям IT низкого напряжения, имеет емкостной характер; ток замыкания на землю относительно мал и не требует немедленного отключения. Но если протяженность сети и, как следствие, емкость фаз относительно земли настолько велики, что ток замыкания на землю превышает некоторое максимально допустимое значение, то нейтраль сети может заземляться через индуктивное сопротивление (*заземляющий реактор*) (рис. 4.5.8,б). Индуктивность рассчитывают таким образом, чтобы в месте замыкания на землю возник резонанс токов и ток замыкания на землю уменьшился практически до нуля (*резонансное заземление*). В обоих случаях замыкание одной фазы на землю приводит к повышению напряжения остальных фаз относительно земли до междуфазного напряжения, поэтому изоляцию между фазами и землей приходится выбирать на это напряжение.

При напряжении 110 kV или выше нейтраль сети непосредственно (*глухо*) заземлена (рис. 4.5.8,с), в результате чего напряжение фаз относительно земли не может повышаться выше фазного напряжения, что соответственно снижает стоимость изоляции линий электропередачи.



**Рис. 4.5.8. Сеть высокого напряжения с незаземленной (а), с резонансно-заземленной (б) и глухо заземленной (с) нейтралью. 1 вторичная обмотка трансформатора, питающего данную сеть, 2 заземляющий реактор**

Номинальное напряжение линий как низкого, так и высокого напряжений выбирается тем выше, чем больше дальность передачи и передаваемая мощность. На рис. 4.5.9 очень приблизительно показаны области применения стандартных низких напряжений по длине и мощности линий. Если линии длиннее, то в них могут возникать неприемлемые потери напряжения и мощности.



**Рис. 4.5.9. Зависимость необходимого номинального напряжения линии низкого напряжения от длины линии ( $l$ ) и передаваемой мощности ( $P$ ) (очень приблизительно)**

Еще более приблизительно требуемое номинальное напряжение линии может определяться грубыми ориентировочными формулами

$$U_n \geq 1 l \quad \text{и} \quad U_n \geq 1 P$$

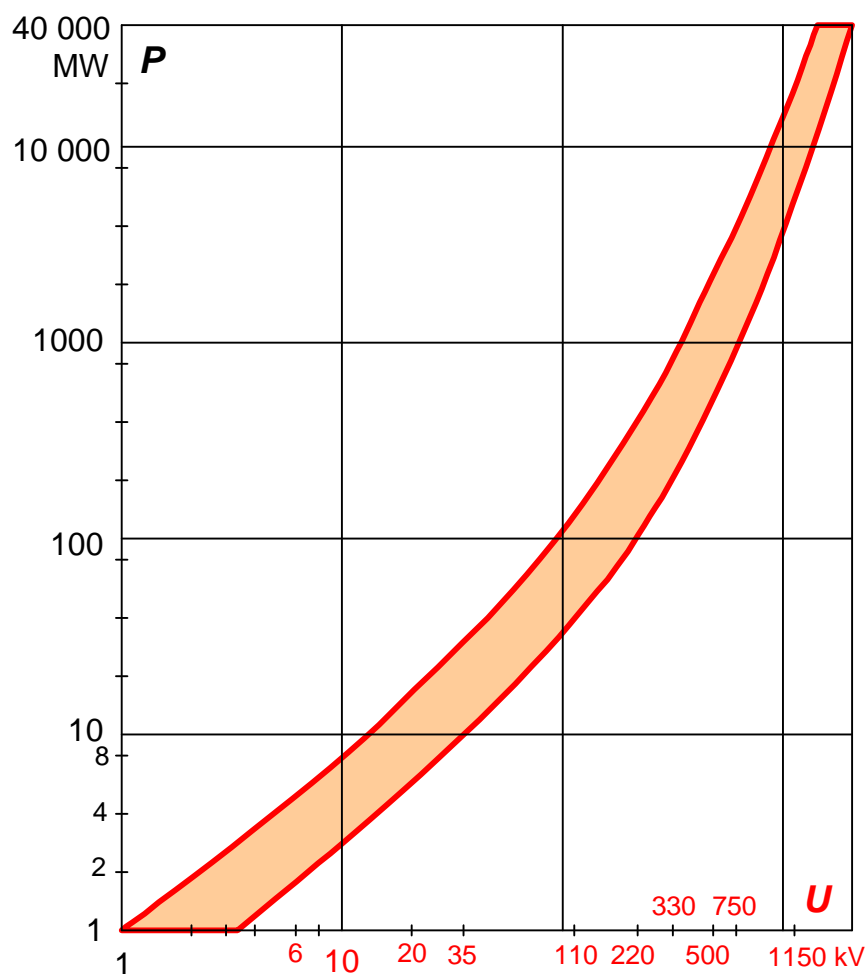
$U_n$  требуемое номинальное напряжение V

$l$  длина линии m

$P$  передаваемая мощность kW

Те же формулы действительны и в случае высокого напряжения, если считать единицей напряжения kV, единицей длины km и единицей мощности MW.

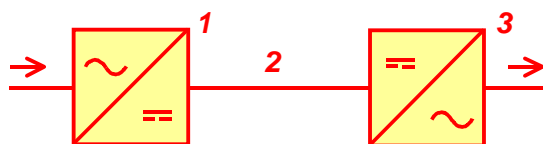
На самом деле номинальные напряжения и другие характеристики электрических линий, проводок и сетей выбираются на основании технико-экономического сравнения вариантов, учитывая как требуемые капиталовложения, так и текущие расходы, неравномерность нагрузок во времени и рост нагрузок в будущем. Фактическая средняя длина линий электропередачи высокого напряжения приблизительно в три раза меньше, чем по вышеприведенным грубым формулам; зависимость фактической передаваемой мощности от номинального напряжения представлена для большинства существующих линий на рис. 4.5.10.



**Рис. 4.5.10. Зависимость передаваемой мощности трехфазной линии электропередачи от номинального напряжения (приблизительно)**

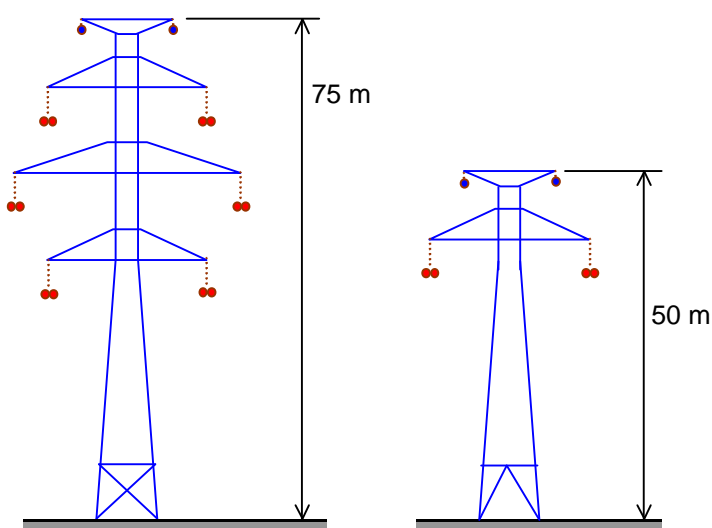
Быстрое развитие передачи электрической энергии на переменном токе высокого напряжения началось после того, как Никола Тесла (Nikola Tesla) в 1888 году в США и Михаил Доливо-Добровольский в 1889 году в Германии изобрели многофазную систему переменного тока (см. также раздел 3.12). Первую трехфазную линию для передачи электроэнергии на большое расстояние построили в 1891 году по случаю Франкфуртской электротехнической выставки владелец частного проектного бюро в Мюнхене (München, Германия) Оскар фон Миллер (Oskar von Miller, 1855–1934) и Михаил Доливо-Добровольский. Линия длиной 175 км шла от ГЭС Лауффен (Lauffen) до Франкфурта (Frankfurt) и ее номинальное напряжение было 15 кВ. В 1906 году в США была построена первая линия на 110 кВ, а в 1953 году в Швеции – первая линия на 380 кВ. В 1967 году в России построили первую опытную линию на 750 кВ (Конаково–Москва, 90 км), а в 1986 году в Казахстане – линию на напряжение 1150 кВ (Экибастуз–Кустанай, 900 км). В Эстонии первая линия напряжением 110 кВ появилось в 1951 году, а первая линия напряжением 330 кВ – в 1962 году.

Когда требуется передавать очень большую мощность (например, несколько гигаватт) на большое расстояние (например, несколько тысяч километров), вместо трехфазных линий высокого напряжения могут использоваться линии постоянного тока высокого напряжения по принципу, изображенному на рис. 4.5.11.



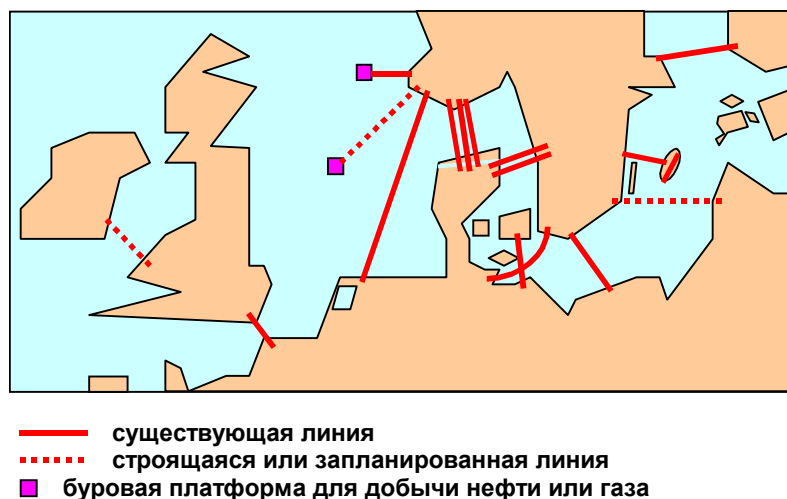
**Рис. 4.5.11. Принцип электропередачи на постоянном токе.**  
**1 выпрямитель, 2 линия постоянного тока высокого напряжения, 3 инвертор**

Как воздушные, так и кабельные линии постоянного тока проще и дешевле, чем линии трехфазного переменного тока той же мощности (см., например, рис. 4.5.12), но для передачи энергии постоянным током на обоих концах линии требуются мощные и дорогие тиристорные или силовые транзисторные преобразователи. Поэтому во всем мире к началу 2008 года имелось приблизительно лишь 70 линий такого типа. Самая длинная линия электропередачи в мире (1700 km) была построена в 1979 году для передачи энергии от ГЭС Инга (Inga, на реке Конго) промышленному городу Колвези (Kolwezi, Демократическая Республика Конго); напряжение линии составляет  $\pm 500$  kV, передаваемая мощность равна 560 MW. В 1985 году должна была войти в эксплуатацию линия Экибастуз–Тамбов (Казахстан – Россия,  $\pm 750$  kV, 6000 MW) длиной 3000 km, но сейчас ее строительство приостановлено. За последнее время полупроводниковые преобразователи стали дешевле, и передачу на постоянном токе начали применять и при относительно малой передаваемой мощности. Первым в мире такие *легкие линии постоянного тока высокого напряжения*, передаваемой мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен мегаватт и длиной приблизительно до 100 km (*HVDC Light*), стал строить в 1997 году электротехнический концерн АББ (ABB). Передаваемая мощность первой такой линии Хельшён–Грянгесберг (Hellsjön–Grängesberg, Южная Швеция) была только 3 MW, номинальное напряжение –  $\pm 10$  kV и длина – 10 km.



**Рис. 4.5.12. Сравнение воздушных линий переменного и постоянного тока при напряжении 400 kV и передаваемой мощности 1400 MW.**  
**Слева – промежуточная стальная опора линии переменного тока, справа – постоянного тока. Фермы опор показаны только в виде контуров. Обе линии снабжены молниезащитными тросами**

Линии постоянного тока применяются и для соединения между собой энергетических систем, работающих друг относительно друга *несинхронно*. Через морские кабельные линии постоянного тока, например, энергосистемы Норвегии и Швеции связаны с энергосистемами Дании, Германии, Польши и Нидерландов, а также энергосистема Эстонии с энергосистемой Финляндии (рис. 4.5.13). С той же целью между соседними энергосистемами могут устанавливаться преобразовательные звенья постоянного тока (например, между энергосистемами России и Финляндии в Выборге).



**Рис. 4.5.13. Морские кабельные линии постоянного тока в Балтийском море, в Датских проливах и в Северном море в начале 2008 года**

Первую линию постоянного тока высокого напряжения – Мисбах–Мюнхен (Miesbach–München, Германия), длиной 57 km, напряжением 1,3 kV и передаваемой мощностью 0,8 kW, включил в работу 25 сентября 1882 года французский горный инженер, основоположник передачи электроэнергии на расстояние Марсель Депре (Marcel Deprez, 1843–1918). Первая опытная линия по схеме рис. 4.5.11 (со ртутными преобразователями) была построена в 1934 году в Шенектеди (Schenectady, США) фирмой Джeneral Электрик (*General Electric*). Сооружение первой промышленной линии Дессау–Берлин (Dessau–Berlin, ±200 kV, 60 MW, 100 km) началось в Германии в 1941 году, но из-за войны не было закончено. После войны оборудование этой линии было демонтировано и установлено на линии Кашира–Москва (200 kV, 30 MW, 112 km), которая была сдана в эксплуатацию в 1950 году и снесена в 1980-е годы. С 1950 по 1953 год научный сотрудник шведской фирмы ASEA (*Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget*) Аугуст Уно Ламм (August Uno Lamm, 1904–1989) разработал для электропередач постоянного тока высоконадежные ртутные преобразователи, и в 1954 году эта фирма построила первую морскую кабельную линию постоянного тока (100 kV, 30 MW) с материковой части Швеции на остров Готланд (Gotland). В 1972 году на линиях постоянного тока стали применять тиристорные преобразователи, а 2000 году – преобразователи на биполярных транзисторах с изолированным управляющим электродом (*insulated gate bipolar transistor, IGBT*). 4 декабря 2006 года между подстанциями Харку (Harju, вблизи Таллинна) и Эспоо (Espoo, рядом с Хельсинки) вступила в строй система электропередачи, состоящая из двух одножильных кабелей и транзисторных преобразователей; длина линии, включая наземные отрезки, составляет 105 km. Регулярная эксплуатация этой линии началась 4 января 2007 года [3.4].

После того, когда в апреле 1986 года физики научно-исследовательской лаборатории фирмы IBM в Рюшликоне (Rüschlikon, Швейцария) Карл



Александр Мюллер (Karl Alexander Müller, 1927 г. рожд.) и Йоганнес Георг Беднорц (Johannes Georg Bednorz, 1950 г. рожд.) открыли **высокотемпературную сверхпроводимость** (имеющую место при температуре от  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), появились реальные возможности использовать это явление для создания кабелей с нулевым активным сопротивлением и, следовательно, с нулевыми потерями электроэнергии. Первая такая кабельная линия (30 kV, 2000 A, 30 м), в которой в качестве проводящего материала использовалась керамическая фольга Bi-Sr-Ca-Cu-O, охлаждаемая жидким азотом при температуре  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , была введена в опытную эксплуатацию в 2001 году на одной из подстанций Копенгагена (København, Дания). В конце того же года в Детройте (Detroit, США) была проложена кабельная линия длиной 120 м с номинальным напряжением 24 kV, в которой масса проводникового материала составляла всего 320 kg; масса меди в стандартном медном кабеле той же передаваемой мощности составляла бы 4,4 тонны. Более широкому применению сверхпроводящих линий пока препятствует их весьма высокая стоимость.

## Литература

- 4.1 Eesti statistika aastaraamat / Statistical yearbook of Estonia 2007. – Tallinn: Statistikaamet, 2007. – 496 lk.
- 4.2 Ingermann, K. Soojusvarustussüsteemid ('Системы теплоснабжения'). – Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2003. – 71 lk.
- 4.3 IEC 60364-1:2001. Electrical installations of buildings – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. – 42 p.
- 4.4 Abrahamsson, B. Submarine Baltic exchange // Power Engineering International **15** (2007), Issue 2, pp. 26...28.