



# Электрическая сеть

Электрическая **сеть** (или **электрическая сеть**) — это взаимосвязанная сеть для доставки электроэнергии от производителей к потребителям. Электрические сети состоят из электростанций, электрических подстанций для повышения или понижения напряжения, передачи электроэнергии для передачи электроэнергии на большие расстояния и, наконец, распределения электроэнергии

потребителям. На этом последнем этапе напряжение снова понижается до требуемого рабочего напряжения. Электростанции обычно строятся близко к источникам энергии и вдали от густонаселённых районов. Электрические сети различаются по размеру и могут охватывать целые страны или континенты. От малых до больших существуют микросети, широкополосные синхронные сети и суперсети. Объединённая сеть передачи и распределения является частью поставки электроэнергии, известной как *электрическая сеть*.

Сети почти всегда синхронны, то есть все распределительные области работают с синхронизированными частотами трёхфазного переменного тока (AC) (так что колебания напряжения происходят почти в одно и то же время). Это позволяет передавать переменный ток по всей области, соединяя генераторы электроэнергии с потребителями. Сети могут обеспечить более эффективные рынки электроэнергии.

Хотя электрические сети широко распространены, по состоянию на 2016 год 1,4 миллиарда человек во всем мире не были подключены к электросети.<sup>[1]</sup> По мере роста электрификации растёт и число людей, имеющих доступ к сетевому электричеству. Около 840 миллионов человек (в основном в Африке), что составляет около 11% населения мира, не имели доступа к сетевому электричеству в 2017 году, что меньше, чем 1,2 миллиарда в 2010 году.<sup>[2]</sup>

Электрические сети могут быть подвержены злонамеренному вторжению или атаке; таким образом, существует необходимость в обеспечении безопасности электрических сетей. Кроме того, по мере модернизации электрических сетей и внедрения компьютерных технологий киберугрозы начинают становиться риском безопасности.<sup>[3]</sup> Особые опасения связаны с более сложными компьютерными системами, необходимыми для управления сетями.<sup>[4]</sup>

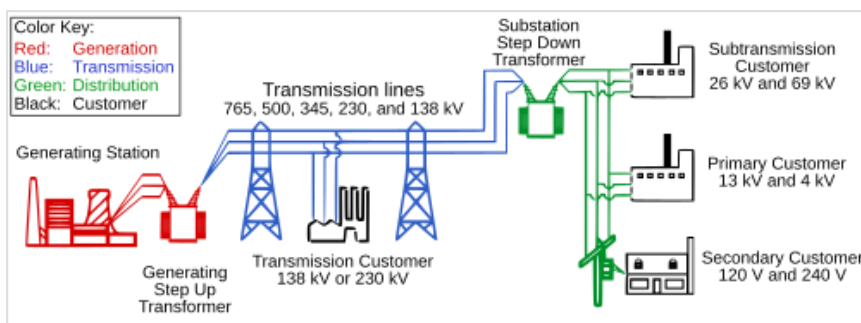


Схема электрической сети (система генерации обозначена красным, система передачи — синим, система распределения — зеленым)

## Типы (сгруппированы по размеру)

---

### Микросеть

Микросеть — это локальная сеть, которая обычно является частью региональной широкомасштабной синхронной сети, но которая может отключаться и работать автономно. <sup>[5]</sup> Она может делать это в моменты, когда основная сеть подвергается отключениям. Это известно как островное подключение, и она может работать неограниченно долго на собственных ресурсах.

По сравнению с более крупными сетями, микросети обычно используют распределительную сеть с более низким напряжением и распределенные генераторы. <sup>[6]</sup> Микросети могут быть не только более устойчивыми, но и более дешевыми в реализации в изолированных районах.

Целью проектирования является то, чтобы локальная территория производила всю потребляемую ею энергию. <sup>[5]</sup>

Примеры реализаций включают в себя:

- Хаджа и Лахдж, Йемен: микросети солнечных батарей, принадлежащие сообществу. <sup>[7]</sup>
- Пилотная программа Иль-д'Йё: шестьдесят четыре солнечные панели с пиковой мощностью 23,7 кВт на пяти домах и аккумуляторная батарея с емкостью хранения 15 кВт-ч. <sup>[8][9]</sup>
- Les Anglais, Гаити: <sup>[10]</sup> включает обнаружение хищения энергии. <sup>[11]</sup>
- Мпекетони, Кения: микросистема электроснабжения на дизельном топливе, работающая на местном уровне. <sup>[12]</sup>
- Винодельня Stone Edge Farm: винодельня в Сономе, Калифорния, оснащенная микротурбиной, топливными элементами, несколькими батареями, водородным электролизером и фотоэлектрическими системами. <sup>[13][14]</sup>

### Широкозонная синхронная сеть

Широкозонная *синхронная сеть* (также называемая «межсетевым соединением» в Северной Америке) — это электрическая сеть регионального масштаба или больше, которая работает на синхронизированной частоте и электрически связана вместе при нормальных условиях системы. Например, в Северной Америке существует четыре основных межсетевых соединения (Западное межсетевое соединение, Восточное межсетевое соединение, Квебекское межсетевое соединение и Техасское межсетевое соединение). В Европе одна большая сеть соединяет большую часть Западной Европы. Они также известны как синхронные зоны, крупнейшей из которых является синхронная сеть континентальной Европы (ENTSO-E) с 667 гигаваттами (ГВт) генерации, а самым обширным обслуживаемым регионом является система IPS/UPS, обслуживающая страны бывшего Советского Союза. Синхронные сети с достаточной мощностью облегчают торговлю на рынке электроэнергии на обширных территориях. В ENTSO-E в 2008 году на Европейской энергетической бирже (EEX) было продано более 350 000 мегаватт-часов в день. <sup>[15]</sup>

Каждая из межсоединений в Северной Америке работает на номинальной частоте 60 Гц, в то время как в Европе они работают на частоте 50 Гц. Соседние межсоединения с той же частотой и стандартами могут быть синхронизированы и напрямую соединены для формирования большего межсоединения, или они могут делиться питанием без синхронизации через высоковольтные линии

электродо передачи постоянного тока ( DC-связи ) или с частотно-регулируемыми трансформаторами (VFT), которые позволяют контролировать поток энергии, а также функционально изолируют независимые частоты переменного тока каждой стороны.

Преимущества синхронных зон включают в себя объединение генерации, что приводит к снижению затрат на генерацию; объединение нагрузки, что приводит к значительному выравнивающему эффекту; общее обеспечение резервов, что приводит к снижению затрат на первичную и вторичную резервную электроэнергию; открытие рынка, что приводит к возможности долгосрочных контрактов и краткосрочных обменов электроэнергией; и взаимопомощь в случае сбоев. <sup>[16]</sup>

Одним из недостатков широкомасштабной синхронной сети является то, что проблемы в одной части могут иметь последствия для всей сети. Например, в 2018 году Косово использовало больше электроэнергии, чем вырабатывало из-за спора с Сербией , что привело к отставанию фазы во всей синхронной сети континентальной Европы от того, что должно было быть. Частота упала до 49,996 Гц. Это привело к тому, что некоторые виды часов стали отставать на шесть минут. <sup>[17]</sup>



Синхронные сети Европы



Две основные и три второстепенные взаимосвязи Северной Америки

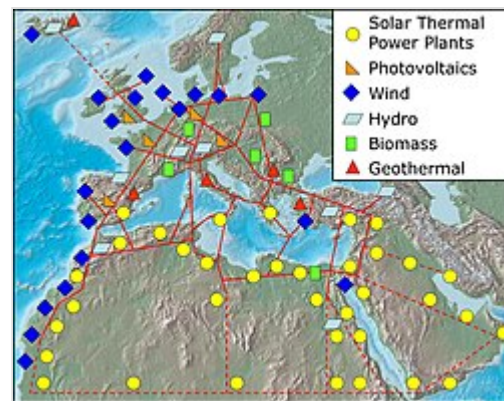


Крупнейшие WASG по всему миру

## Супер сетка

Суперсеть или *суперсеть* — это широкомасштабная сеть передачи, которая предназначена для обеспечения возможности торговли большими объемами электроэнергии на большие расстояния. Иногда ее также называют мегасеткой. Суперсети могут поддерживать глобальный энергетический переход, сглаживая локальные колебания энергии ветра и солнца. В этом контексте они рассматриваются как ключевая технология для смягчения глобального потепления. Суперсети обычно используют постоянный ток высокого напряжения (HVDC) для передачи электроэнергии на большие расстояния. Последнее поколение линий электропередач HVDC может передавать энергию с потерями всего 1,6% на 1000 км. <sup>[19]</sup>

Электроэнергетические компании между регионами многократно соединены между собой для улучшения экономики и надежности. Электрические соединения позволяют экономить за счет масштаба, позволяя закупать энергию из крупных и эффективных источников. Коммунальные компании могут получать электроэнергию из резервов генераторов из другого региона, чтобы обеспечить непрерывное и надежное электроснабжение и диверсифицировать свои нагрузки. Взаимосвязь также позволяет регионам иметь доступ к дешевой объемной энергии, получая электроэнергию из разных источников. Например, один регион может производить дешевую гидроэнергию в сезоны высокой воды, но в сезоны низкой воды другой регион может производить более дешевую электроэнергию с помощью ветра, что позволяет обоим регионам получать доступ к более дешевым источникам энергии друг от друга в разное время года. Соседние коммунальные компании также помогают другим поддерживать общую системную частоту, а также управлять передачей между коммунальными регионами. <sup>[ 20 ]</sup>



Один концептуальный план суперсети, связывающей возобновляемые источники энергии в Северной Африке, на Ближнем Востоке и в Европе. ( DESERTEC ) <sup>[ 18 ]</sup>

Уровень взаимосвязи электроэнергии (EIL) сети — это отношение общей мощности интерконнектора к сети, деленное на установленную производственную мощность сети. В ЕС установлена цель достижения национальными сетями 10% к 2020 году и 15% к 2030 году. <sup>[ 21 ]</sup>

## Компоненты

### Поколение

Генерация электроэнергии — это процесс выработки электроэнергии на электростанциях . Это в конечном итоге осуществляется из источников первичной энергии, как правило, с помощью электромеханических генераторов, приводимых в действие тепловыми двигателями из ископаемых , ядерных и геотермальных источников или приводимых в действие кинетической энергией воды или ветра. Другими источниками энергии являются фотоэлектрические элементы, приводимые в действие солнечной инсоляцией, и сетевые батареи . <sup>[ nb 1 ]</sup>



Турбогенератор

Сумма мощностей генераторов в сети составляет выработку сети, обычно измеряемую в гигаваттах (ГВт).



## Передача инфекции

Передача электроэнергии — это объемное перемещение электроэнергии от места генерации через сеть взаимосвязанных линий к электрической подстанции, которая подключена к распределительной системе. Эта сетевая система соединений отличается от локальной проводки между высоковольтными подстанциями и потребителями. Сети передачи построены с избыточными путями для предотвращения единой точки отказа. В случае отказа линии эта избыточность позволяет просто перенаправлять электроэнергию во время проведения ремонтных работ.

Поскольку электроэнергия часто генерируется далеко от места ее потребления, система передачи может охватывать большие расстояния. Для заданного количества мощности эффективность передачи выше при более высоком напряжении и более низком токе. Поэтому напряжение повышается на генерирующей станции и понижается на местных подстанциях для распределения потребителям.

Большинство передач трехфазные. Трехфазные, по сравнению с однофазными, могут выдавать гораздо больше мощности для заданного количества проводов, поскольку нейтраль и заземляющий провод являются общими. [ 23 ] Кроме того, трехфазные генераторы и двигатели более эффективны, чем их однофазные аналоги.

Однако для обычных проводников одной из основных потерь являются резистивные потери, которые являются квадратичным законом тока и зависят от расстояния. Высоковольтные линии передачи переменного тока могут терять 1-4% на сотню миль. [ 24 ] Однако, высоковольтный постоянный ток может иметь половину потерь переменного тока. На очень больших расстояниях эта эффективность может компенсировать дополнительные затраты на требуемые станции преобразования переменного тока в постоянный на каждом конце.

## Подстанции

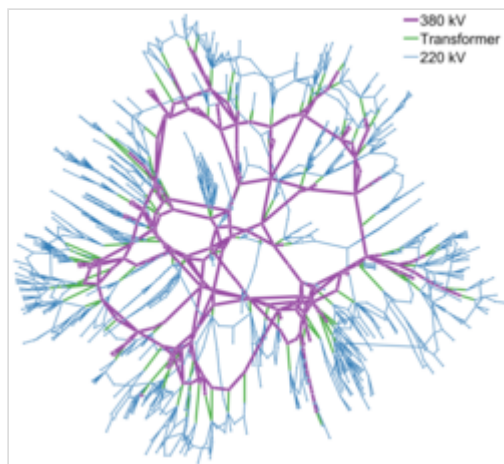
Подстанции могут выполнять множество различных функций, но обычно преобразуют напряжение с низкого на высокое (повышение) и с высокого на низкое (понижение). Между генератором и конечным потребителем напряжение может трансформироваться несколько раз. [ 25 ]

Три основных типа подстанций по функциям: [ 26 ]

- **Повышающие подстанции:** они используют трансформаторы для повышения напряжения, поступающего от генераторов и электростанций, чтобы электроэнергия могла передаваться на большие расстояния более эффективно, с меньшими токами.



Трехфазные линии электропередачи напряжением 500 кВ на плотине Гранд-Кули; показаны четыре цепи; две дополнительные цепи скрыты деревьями справа; вся генерирующая мощность плотины в 7079 МВт обеспечивается этими шестью цепями.



Сетевая диаграмма высоковольтной системы передачи, показывающая взаимосвязь между различными уровнями напряжения. Эта диаграмма изображает электрическую структуру [ 22 ] сети, а не ее физическую географию.

- **Понижающая подстанция:** эти трансформаторы понижают напряжение, поступающее от линий электропередачи, которое может использоваться в промышленности или направляться на распределительную подстанцию.
- **Распределительная подстанция:** она преобразует напряжение обратно в более низкое для распределения конечным потребителям.

Помимо трансформаторов, к другим основным компонентам или функциям подстанций относятся:

- **Автоматические выключатели** : используются для автоматического разрыва цепи и изоляции неисправности в системе. [ 27 ]
- **Переключатели** : для управления потоком электроэнергии и изоляции оборудования. [ 28 ]
- **Шина подстанции** : обычно набор из трех проводников, по одному на каждую фазу тока. Подстанция организована вокруг шин, и они подключены к входящим линиям, трансформаторам, защитному оборудованию, выключателям и исходящим линиям. [ 27 ]
- **Молниеотводы**
- **Конденсаторы** для коррекции коэффициента мощности
- **Синхронные конденсаторы** для коррекции коэффициента мощности и стабильности сети

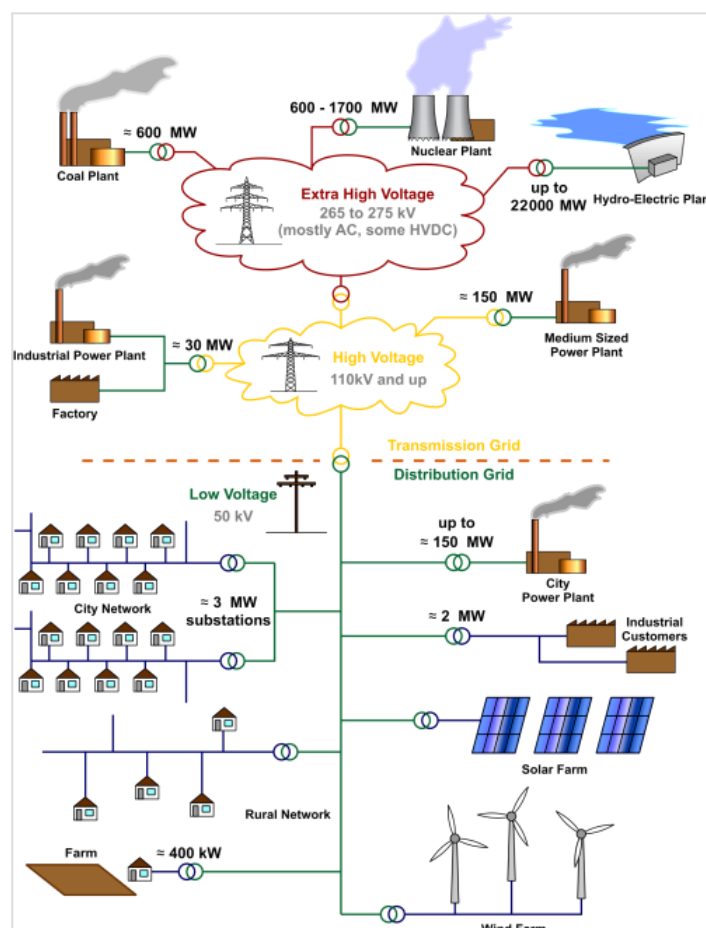
## Распределение электроэнергии

Распределение является конечным этапом в доставке электроэнергии; оно переносит электроэнергию из системы передачи к отдельным потребителям. Подстанции подключаются к системе передачи и понижают напряжение передачи до среднего напряжения в диапазоне от 2 кВ и 35 кВ . Но уровни напряжения сильно различаются в разных странах, в Швеции среднее напряжение обычно 10 кВ между 20 кВ . [ 29 ]

Первичные распределительные линии передают эту мощность среднего напряжения на распределительные трансформаторы , расположенные вблизи помещений клиента. Распределительные трансформаторы снова понижают напряжение до напряжения использования . Клиенты, которым требуется гораздо большее количество энергии, могут быть подключены напрямую к первичному уровню распределения или к уровню субпередачи . [ 30 ]

Распределительные сети делятся на два типа: радиальные и сетевые. [ 31 ]

В городах и поселках Северной Америки сеть имеет тенденцию следовать классической *радиально питаемой* схеме. Подстанция получает электроэнергию от сети передачи, мощность понижается трансформатором и отправляется на шину, от которой фидеры расходятся во всех направлениях по всей сельской местности. Эти фидеры несут трехфазное питание и, как правило, следуют по главным улицам вблизи подстанции. По мере увеличения расстояния от подстанции



Общая схема электросетей. Напряжения и изображения линий электропередач типичны для Германии и других европейских систем.

разветвление продолжается, поскольку более мелкие ответвления расходятся, чтобы покрыть области, пропущенные фидерами. Эта древовидная структура растет наружу от подстанции, но из соображений надежности обычно содержит по крайней мере одно неиспользуемое резервное соединение с близлежащей подстанцией. Это соединение может быть включено в случае чрезвычайной ситуации, так что часть территории обслуживания подстанции может альтернативно питаться от другой подстанции.

## Хранилище

*Сетевое хранение энергии* (также называемое *крупномасштабным хранением энергии*) представляет собой набор методов, используемых для хранения энергии в больших масштабах в электросети. Электрическая энергия хранится в то время, когда электричества много и оно недорогое (особенно из непостоянных источников энергии, таких как возобновляемая электроэнергия от ветроэнергетики, приливной энергетики и солнечной энергетики) или когда спрос низкий, а позже электроэнергия вырабатывается, когда спрос высок, а цены на электроэнергию, как правило, выше.

По состоянию на 2020 год крупнейшей формой хранения сетевой энергии является гидроэлектростанция, которая вырабатывает как традиционную гидроэлектроэнергию, так и гидроаккумулирующую электроэнергию.

Разработки в области аккумуляторных батарей позволили реализовать коммерчески выгодные проекты по хранению энергии во время пикового производства и ее выработке во время пикового спроса, а также для использования в случаях неожиданного спада производства, что дает время для подключения более медленно реагирующих ресурсов.

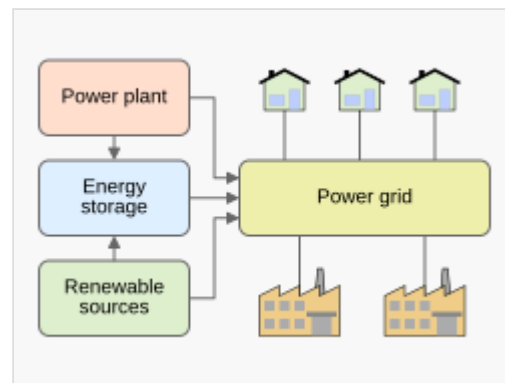
Две альтернативы сетевому хранению электроэнергии — это использование пиковых электростанций для покрытия пробелов в поставках и реагирование на спрос для переноса нагрузки на другое время.

## Функциональность

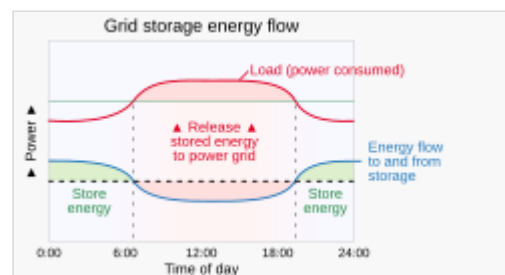
### Требовать

Спрос или нагрузка на электрическую сеть — это общая электроэнергия, потребляемая пользователями сети.

График спроса с течением времени называется *кривой спроса*.



Энергия от электростанций, работающих на ископаемом топливе, атомных электростанций и возобновляемых источников хранится для использования потребителями.



Упрощенный поток энергии в сети в течение дня



Базовая нагрузка — это минимальная нагрузка на сеть за любой заданный период, пиковый спрос — это максимальная нагрузка. Исторически базовая нагрузка обычно удовлетворялась оборудованием, которое было относительно дешевым в эксплуатации, которое работало непрерывно в течение недель или месяцев, но в глобальном масштабе это становится все менее распространенным. Дополнительные требования пикового спроса иногда производятся дорогими пиковыми установками, которые представляют собой генераторы, оптимизированные для быстрого выхода в сеть, но они также становятся все менее распространенными.

Однако если спрос на электроэнергию превысит возможности местной электросети, это может привести к возникновению проблем с безопасностью, например, к возгоранию. <sup>[ 32 ]</sup>

## Напряжение

Сети предназначены для поставки электроэнергии своим клиентам при в основном постоянном напряжении. Это должно быть достигнуто с изменяющимся спросом, переменными реактивными нагрузками и даже нелинейными нагрузками, при этом электроэнергия поступает от генераторов и распределительного и передающего оборудования, которые не являются абсолютно надежными. <sup>[ 33 ]</sup> Часто сети используют переключатели ответвлений на трансформаторах рядом с потребителями для регулировки напряжения и поддержания его в пределах спецификации.

## Частота

В синхронной сети все генераторы должны работать на одной частоте и должны оставаться практически в фазе друг с другом и сетью. Генерация и потребление должны быть сбалансированы по всей сети, поскольку энергия потребляется по мере ее производства. Для вращающихся генераторов локальный регулятор регулирует крутящий момент, поддерживая почти постоянную скорость вращения при изменении нагрузки. Энергия хранится в краткосрочной перспективе за счет вращательной кинетической энергии генераторов.

Хотя скорость поддерживается в основном постоянной, небольшие отклонения от номинальной частоты системы очень важны для регулирования отдельных генераторов и используются как способ оценки равновесия сети в целом. Когда сеть слабо загружена, частота сети превышает номинальную частоту, и это воспринимается системами автоматического управления генерацией (AGC) по всей сети как указание на то, что генераторы должны снизить свою выработку. И наоборот, когда сеть сильно загружена, частота естественным образом замедляется, и регуляторы регулируют свои генераторы так, чтобы вырабатывалась большая мощность ( управление скоростью спада ). Когда генераторы имеют идентичные настройки управления скоростью спада, это гарантирует, что несколько параллельных генераторов с одинаковыми настройками разделяют нагрузку пропорционально их номиналу.

Кроме того, часто имеется центральный контроль, который может изменять параметры систем AGC в течение минуты или дольше для дальнейшей регулировки региональных сетевых потоков и рабочей частоты сети.

В целях хронометража номинальная частота может изменяться в краткосрочной перспективе, но она корректируется таким образом, чтобы не допустить значительного опережения или отставания часов, работающих от сети, в течение всего 24-часового периода.

Соседние сети, которые не соединены напрямую, почти всегда не совпадают по фазе друг с другом. Вместо этого используются высоковольтные линии постоянного тока или частотно-регулируемые трансформаторы , которые позволяют двум несовпадающим по фазе синхронным сетям делиться мощностью.

## Мощность и гарантированная мощность

Сумма максимальных выходных мощностей ( паспортная мощность ) генераторов, подключенных к электросети, может считаться мощностью сети.

Однако на практике они никогда не работают на полную мощность одновременно. Обычно некоторые генераторы продолжают работать на более низкой выходной мощности ( резерв вращения ), чтобы справляться с отказами, а также с изменениями спроса. Кроме того, генераторы могут быть отключены для технического обслуживания или по другим причинам, таким как доступность входных источников энергии (топливо, вода, ветер, солнце и т. д.) или ограничения по загрязнению.

**Гарантированная мощность** — это максимальная выходная мощность в сети, которая доступна немедленно в течение определенного периода времени, и это гораздо более полезный показатель.

## Производство

Большинство сетевых кодексов указывают, что нагрузка распределяется между генераторами в порядке их предельной стоимости (т. е. сначала самые дешевые), а иногда и в соответствии с их воздействием на окружающую среду. Таким образом, дешевые поставщики электроэнергии, как правило, работают на пределе возможностей почти все время, а более дорогие производители работают только при необходимости.

## Неудачи и проблемы

---

Сбои обычно связаны с генераторами или линиями электропередачи, которые срабатывают автоматические выключатели из-за неисправностей, приводящих к потере генерирующей мощности для клиентов или избыточному спросу. Это часто приводит к снижению частоты, а оставшиеся генераторы реагируют и вместе пытаются стабилизироваться выше минимума. Если это невозможно, то может произойти ряд сценариев.

Крупный сбой в одной части сети — если его быстро не компенсировать — может привести к перенаправлению тока от оставшихся генераторов к потребителям по линиям электропередачи недостаточной мощности, что приведет к дальнейшим сбоям. Таким образом, одним из недостатков широко связанной сети является возможность каскадного сбоя и широкомасштабного отключения электроэнергии . Обычно назначается центральный орган для содействия коммуникации и разработки протоколов для поддержания стабильной сети. Например, North American Electric Reliability Corporation получила обязательные полномочия в Соединенных Штатах в 2006 году и имеет консультативные полномочия в соответствующих частях Канады и Мексики. Правительство США также обозначило коридоры передачи электроэнергии в интересах национальных интересов , где, по его мнению, образовались узкие места в передаче.

## Отключение электроэнергии

Снижение *напряжения* — это преднамеренное или непреднамеренное падение напряжения в системе электроснабжения. Преднамеренные понижения напряжения используются для снижения нагрузки в аварийной ситуации. <sup>[ 34 ]</sup> Снижение длится в течение минут или часов, в отличие от кратковременного падения напряжения (или провала). Термин «понижение напряжения» происходит от затемнения, испытываемого лампами накаливания при падении напряжения. Снижение напряжения может быть следствием нарушения работы электросети или может иногда применяться в попытке снизить нагрузку и предотвратить отключение электроэнергии, известное как отключение электроэнергии. <sup>[ 35 ]</sup>

## Блэкаут

*Отключение электроэнергии* ( также называемое *отключением электроэнергии* , *отключением питания* , *обесточиванием* , *сбоем в подаче электроэнергии* или *отключением электричества* ) — это потеря электроэнергии в определенном районе.

Перебои в подаче электроэнергии могут быть вызваны неисправностями на электростанциях, повреждением линий электропередачи, подстанций или других частей распределительной системы, коротким замыканием , каскадным отказом , срабатыванием предохранителя или автоматического выключателя , а также человеческим фактором.

Сбои в подаче электроэнергии особенно критичны на объектах, где под угрозой находится окружающая среда и общественная безопасность. Такие учреждения, как больницы , очистные сооружения, шахты , убежища и т. п., как правило, имеют резервные источники питания, такие как резервные генераторы , которые автоматически запускаются при отключении электроэнергии. Другие критически важные системы, такие как телекоммуникации , также должны иметь аварийное питание. В аккумуляторной комнате телефонной станции обычно имеются массивы свинцово-кислотных аккумуляторов для резервного питания, а также розетка для подключения генератора во время длительных периодов отключения электроэнергии.

## Сброс нагрузки

Системы генерации и передачи электроэнергии не всегда могут соответствовать требованиям пикового спроса — наибольшему количеству электроэнергии , необходимому всем потребителям коммунальных услуг в данном регионе. В таких ситуациях общий спрос должен быть снижен либо путем отключения обслуживания некоторых устройств, либо путем снижения напряжения питания ( провалы ), чтобы предотвратить неконтролируемые сбои в обслуживании, такие как отключения электроэнергии (широкомасштабные отключения) или повреждение оборудования. Коммунальные службы могут налагать сброс нагрузки на зоны обслуживания с помощью целевых отключений, веерных отключений или соглашений с конкретными промышленными потребителями с высокой нагрузкой на отключение оборудования в периоды пикового спроса в масштабах всей системы.

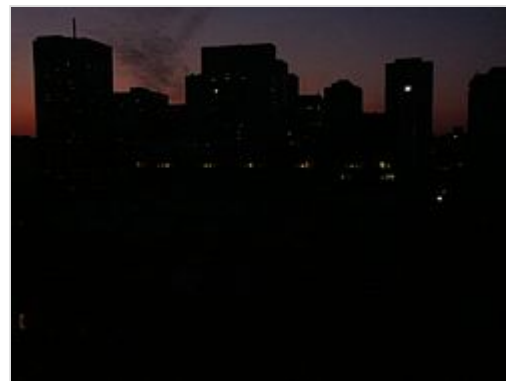


Отключение электроэнергии возле Токийской башни в Токио , Япония

## Черный старт

Черный пуск — это процесс восстановления работы электростанции или части электрической сети без использования внешней сети передачи электроэнергии для восстановления после полного или частичного отключения. <sup>[ 36 ]</sup>

Обычно электроэнергия, используемая на станции, обеспечивается собственными генераторами станции. Если все основные генераторы станции отключены, электроэнергия для обслуживания станции обеспечивается за счет отбора электроэнергии из сети через линию электропередачи станции. Однако во время отключения электроэнергии на большой территории электроэнергия из сети недоступна. При отсутствии электроэнергии из сети необходимо выполнить так называемый черный запуск, чтобы запустить электросеть в работу.



Торонто во время отключения электроэнергии на северо-востоке страны в 2003 году , что потребовало отключения электростанций.

Для обеспечения черного пуска на некоторых электростанциях имеются небольшие дизельные генераторы , обычно называемые *дизельными генераторами черного пуска* (BSDG), которые могут использоваться для запуска более крупных генераторов (мощностью в несколько мегаватт ), которые, в свою очередь, могут использоваться для запуска основных генераторов электростанции. Генерирующие установки, использующие паровые турбины, требуют мощности обслуживания станции до 10% от их мощности для насосов питательной воды котла , воздуходувок с принудительной тягой котла и для подготовки топлива. Неэкономично обеспечивать такую большую резервную мощность на каждой станции, поэтому мощность черного пуска должна подаваться по выделенным соединительным линиям с другой станции. Часто гидроэлектростанции назначаются в качестве источников черного пуска для восстановления сетевых взаимосвязей. Гидроэлектростанции требуются очень мало начальной мощности для запуска (достаточно, чтобы открыть впускные ворота и подать ток возбуждения на катушки возбуждения генератора), и она может очень быстро включить большой блок мощности в линию, чтобы обеспечить запуск станций, работающих на ископаемом топливе или атомных станций. Некоторые типы турбин сгорания могут быть настроены для черного пуска, что обеспечивает еще один вариант в местах, где нет подходящих гидроэлектростанций. <sup>[ 37 ]</sup> В 2017 году коммунальное предприятие в Южной Калифорнии успешно продемонстрировало использование системы хранения энергии на основе аккумуляторных батарей для обеспечения черного пуска, запуская газовую турбину комбинированного цикла из состояния простоя. <sup>[ 38 ]</sup>

## Устаревание

Несмотря на новые институциональные механизмы и сетевые конструкции, инфраструктуры электроснабжения в развитых странах мира стареют. Факторы, способствующие этому, включают:

- Старееющее оборудование – у старого оборудования выше частота отказов , что приводит к перебоям в работе клиентов, что влияет на экономику и общество; кроме того, устаревшие активы и объекты приводят к более высоким расходам на техническое обслуживание и дальнейшие затраты на ремонт и восстановление .
- Устаревшая схема системы — старые районы требуют значительных дополнительных площадок подстанций и права прохода, которые невозможно получить в нынешнем районе, и вынуждены использовать существующие недостаточные мощности.

- Устаревшее проектирование — традиционные инструменты планирования и проектирования электроснабжения неэффективны при решении текущих проблем, связанных с устаревшим оборудованием, устаревшими схемами систем и современными нерегулируемыми уровнями нагрузки.
- Старые культурные ценности – планирование , проектирование , эксплуатация системы с использованием концепций и процедур, которые работали в вертикально интегрированной промышленности, усугубляют проблему в нерегулируемой промышленности. [ 39 ]

## Тенденции

### Реагирование на спрос

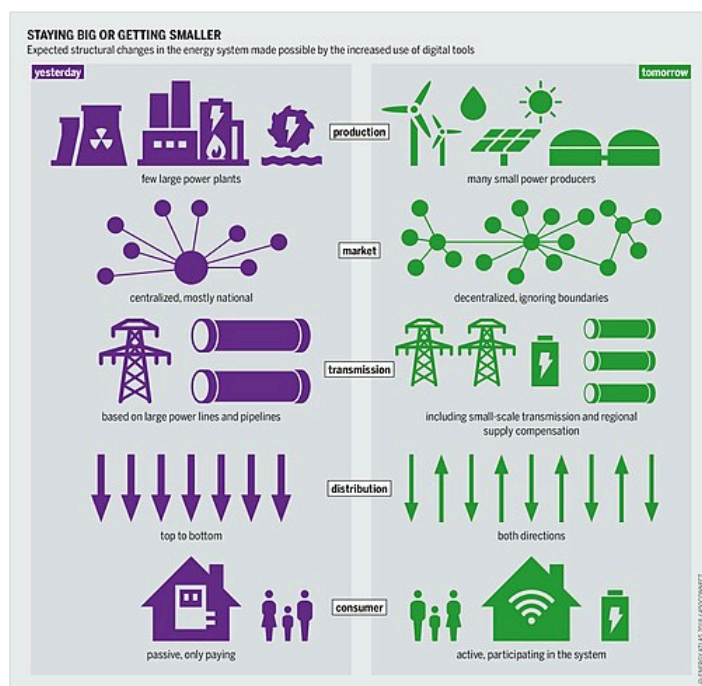
Реагирование на спрос — это метод управления сетью, при котором розничных или оптовых клиентов просят или стимулируют либо электронным способом, либо вручную снизить нагрузку. В настоящее время операторы передающих сетей используют реагирование на спрос, чтобы запросить снижение нагрузки у крупных потребителей энергии, таких как промышленные предприятия. [ 40 ] Такие технологии, как интеллектуальный учет, могут стимулировать потребителей использовать электроэнергию, когда ее много, позволяя устанавливать переменные цены.

### Умная сеть

Интеллектуальная сеть — это усовершенствование электрической сети 20-го века, использующее двустороннюю связь и распределенные так называемые интеллектуальные устройства. [ 41 ]

Двусторонние потоки электроэнергии и информации могут улучшить сеть доставки. Исследования в основном сосредоточены на трех системах интеллектуальной сети — системе инфраструктуры, системе управления и системе защиты. [ 42 ] Электронное кондиционирование мощности и контроль производства и распределения электроэнергии являются важными аспектами интеллектуальной сети. [ 43 ]

Интеллектуальная сеть представляет собой полный набор текущих и предлагаемых ответов на проблемы электроснабжения. Ожидается, что внедрение технологии интеллектуальной сети внесет многочисленные вклады в общее улучшение эффективности энергетической инфраструктуры, в частности, включая управление спросом . Улучшенная гибкость интеллектуальной сети позволяет больше проникать в высокоизменяемые возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия и энергия ветра , даже без добавления накопителей энергии . Интеллектуальные сети также могут контролировать/управлять бытовыми устройствами, которые не являются критическими в периоды пикового потребления энергии, и возвращать их функции в непиковые часы. [ 44 ]



Характеристики традиционной централизованной электрической системы (слева) по сравнению с характеристиками интеллектуальной сети (справа)



Интеллектуальная сеть включает в себя ряд эксплуатационных и энергетических мер:

- Расширенная инфраструктура учета (в которой интеллектуальные счетчики являются общим названием для любого устройства на стороне коммунального предприятия, даже если оно обладает большими возможностями, например, оптоволоконный маршрутизатор)
- Интеллектуальные распределительные щиты и автоматические выключатели, интегрированные с домашним управлением и реагированием на спрос ( за счетчиком с точки зрения коммунальной службы)
  - Переключатели управления нагрузкой и интеллектуальные приборы , часто финансируемые за счет повышения эффективности муниципальных программ (например, финансирование RACE )
- Возобновляемые источники энергии, включая возможность зарядки аккумуляторов припаркованных ( электромобилей ) или более крупных массивов аккумуляторов, переработанных из них, или других накопителей энергии .
- Энергоэффективные ресурсы
- Распределение излишков электроэнергии по линиям электропередач и автоматическим интеллектуальным выключателем
- Достаточное количество широкополосного оптоволоконного подключения коммунального класса для подключения и мониторинга вышеперечисленного, с беспроводным подключением в качестве резерва. Достаточное количество резервных, если "темная" емкость, для обеспечения отказоустойчивости, часто сдается в аренду для получения дохода. <sup>[ 45 ]</sup> <sup>[ 46 ]</sup>

Проблемы с технологией интеллектуальной сети в основном касаются интеллектуальных счетчиков, элементов, которые они поддерживают, и общих вопросов безопасности. Развертывание технологии интеллектуальной сети также подразумевает фундаментальную перестройку отрасли электроэнергетических услуг, хотя типичное использование этого термина сосредоточено на технической инфраструктуре. <sup>[ 47 ]</sup>

Политика в отношении интеллектуальных сетей организована в Европе как Европейская технологическая платформа интеллектуальных сетей. <sup>[ 48 ]</sup> Политика в Соединенных Штатах описана в Разделе 42 Свода законов Соединенных Штатов . <sup>[ 49 ]</sup>

## Отказ от сети

Сопротивление распределенной генерации среди сетевых операторов может побудить поставщиков покинуть сеть и вместо этого распределять электроэнергию по более мелким географическим районам. <sup>[ 50 ]</sup> <sup>[ 51 ]</sup> <sup>[ 52 ]</sup>

Rocky Mountain Institute <sup>[ 53 ]</sup> и другие исследования <sup>[ 54 ]</sup> предвидят широкомасштабный отказ от сети. Однако отказ от сети может быть менее вероятным в таких местах, как Германия, где зимой наблюдается более высокий спрос на электроэнергию. <sup>[ 55 ]</sup>

## История

---

Первоначально электроэнергия вырабатывалась вблизи устройства или сервиса, требующего эту энергию. В 1880-х годах электричество конкурировало с паром, гидравликой и особенно угольным газом . Угольный газ сначала производился на территории потребителя, но позже превратился в газификационные установки, которые пользовались экономией масштаба . В индустриальном мире города имели сети трубопроводного газа, использовавшегося для освещения. Но газовые лампы

давали плохой свет, тратили тепло впустую, делали комнаты жаркими и дымными, а также выделяли водород и оксид углерода . Они также представляли опасность возгорания. В 1880-х годах электрическое освещение вскоре стало выгоднее газового.

Электроэнергетические компании создали центральные станции , чтобы воспользоваться экономией масштаба, и перешли к централизованному производству электроэнергии, распределению и управлению системой. <sup>[ 56 ]</sup> После того, как война токов была урегулирована в пользу переменного тока , с передачей электроэнергии на большие расстояния стало возможным соединять станции для балансировки нагрузок и улучшения коэффициентов нагрузки. Исторически линии передачи и распределения принадлежали одной и той же компании, но начиная с 1990-х годов многие страны либерализовали регулирование рынка электроэнергии способами, которые привели к разделению бизнеса по передаче электроэнергии от бизнеса по распределению. <sup>[ 57 ]</sup>

В Соединенном Королевстве Чарльз Мерц из консалтингового партнерства Merz & McLellan построил электростанцию Neptune Bank недалеко от Ньюкасл-апон-Тайн в 1901 году <sup>[ 58 ]</sup> , и к 1912 году она превратилась в крупнейшую интегрированную энергосистему в Европе. <sup>[ 59 ]</sup> Мерц был назначен главой парламентского комитета, и его выводы привели к докладу Уильямсона 1918 года, который, в свою очередь, создал Закон об электроэнергии (поставка) 1919 года . Законопроект стал первым шагом на пути к интегрированной системе электроснабжения. В 1925 году Комитет Вейра рекомендовал создать «национальную электросеть», и поэтому Закон об электроэнергии (поставка) 1926 года создал Центральный совет по электроснабжению (СЕВ). <sup>[ 60 ]</sup> СЕВ стандартизировал электроснабжение страны и создал первую синхронизированную сеть переменного тока, работающую на 132 киловольтах и 50 герцах , но изначально функционировавшую как региональные сети. После кратковременного объединения в 1937 году они официально и на постоянной основе объединились в 1938 году, став Национальной энергосистемой Великобритании .

Во Франции электрификация началась в 1900-х годах, с 700 коммун в 1919 году и 36 528 в 1938 году. В то же время эти близкие сети начали соединяться: Париж в 1907 году на 12 кВ, Пиренеи в 1923 году на 150 кВ, и, наконец, почти вся страна была соединена к 1938 году на 220 кВ. В 1946 году сеть была самой плотной в мире. В том же году государство национализировало отрасль, объединив частные компании в Électricité de France . Частота была стандартизирована на уровне 50 Гц, и сеть 225 кВ заменила 110 кВ и 120 кВ. С 1956 года рабочее напряжение было стандартизировано на уровне 220/380 В, заменив предыдущие 127/220 В. В 1970-х годах была внедрена сеть 400 кВ, новый европейский стандарт. Начиная с 29 мая 1986 года рабочее напряжение конечного пользователя будет постепенно меняться до 230/400 В +/-10%. <sup>[ 61 ]</sup> <sup>[ 62 ]</sup>

В Соединенных Штатах в 1920-х годах коммунальные предприятия создавали совместные предприятия для совместного покрытия пиковой нагрузки и резервного питания. В 1934 году с принятием Закона о холдинговых компаниях коммунального обслуживания (США) электроэнергетические компании были признаны важными общественными благами и получили определенные ограничения и нормативный надзор за их деятельностью. Закон об энергетической политике 1992 года потребовал от владельцев линий электропередачи разрешить компаниям по производству электроэнергии открыть доступ к своей сети <sup>[ 56 ]</sup> <sup>[ 63 ]</sup> и привел к реструктуризации работы электроэнергетической отрасли в попытке создать конкуренцию в производстве электроэнергии. Электроэнергетические компании больше не строились как вертикальные монополии, где генерация, передача и распределение осуществлялись одной компанией. Теперь три этапа могли быть разделены между различными компаниями в попытке обеспечить справедливый доступ к передаче высокого напряжения. <sup>[ 20 ]</sup> <sup>[ 21 ]</sup> Закон об энергетической политике 2005 года разрешил стимулы и гарантии по кредитам для альтернативного производства энергии и продвижения инновационных технологий, которые избегали выбросов парниковых газов .

В Китае электрификация началась в 1950-х годах.<sup>[ 64 ]</sup> В августе 1961 года была завершена и сдана в эксплуатацию электрификация участка Баоцзи-Фэнчжоу железной дороги Баочэн , которая стала первой электрифицированной железной дорогой Китая .<sup>[ 65 ]</sup> С 1958 по 1998 год электрифицированная железная дорога Китая достигла 6200 миль (10 000 километров).<sup>[ 66 ]</sup> По состоянию на конец 2017 года это число достигло 54 000 миль (87 000 километров).<sup>[ 67 ]</sup> В нынешней системе электрификации железных дорог Китая Государственная сетевая корпорация Китая (<https://g.esgcc.com.cn/>) — Архивировано (<https://web.archive.org/web/20211221190902/https://g.esgcc.com.cn/>) 21 декабря 2021 г. на Wayback Machine — является важным поставщиком электроэнергии. В 2019 году компания завершила проект по электроснабжению важных электрифицированных железных дорог Китая в своих рабочих зонах, таких как железная дорога Цзинтун , железная дорога Хаоцзи , высокоскоростная железная дорога Чжэнчжоу-Ваньчжоу и т. д., обеспечив гарантию электроснабжения 110 тяговых станций, а общая протяженность строительства линий электропередачи достигла 6586 километров.<sup>[ 68 ]</sup>

## Смотрите также

---

- Управляемое поколение
- Сетевой кодекс : спецификация для оборудования, подключенного к сети
- Инерционный ответ
- Североамериканская сеть электропередачи
- Устойчивая энергетика

## Примечания

---

1. Обратите внимание, что сетевые аккумуляторы являются полезным источником питания для сетей, но не первичной энергии, поэтому перед использованием их необходимо зарядить от другого источника энергии.

## Ссылки

---

1. Overland, Indra (1 апреля 2016 г.). «Энергия: недостающее звено глобализации» (<https://www.researchgate.net/publication/296486356>) . *Energy Research & Social Science* . **14** : 122–130. Bibcode : 2016ERSS...14..122O (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ERSS...14..122O>) . doi : 10.1016/j.erss.2016.01.009 (<https://doi.org/10.1016%2Fj.erss.2016.01.009>) . hdl : 11250/2442076 (<https://hdl.handle.net/11250%2F2442076>) . Архивировано (<https://web.archive.org/web/20180205000937/https://www.researchgate.net/publication/296486356>) из оригинала 5 февраля 2018 г. "[...] если бы все страны мира обходились собственными ресурсами, в мире было бы еще больше энергетической бедности, чем сейчас. В настоящее время 1,4 миллиарда человек не подключены к электросети [...]"
2. Одарно, Лили (2019-08-14). «Устранение разрыва в доступе к электроэнергии в странах Африки к югу от Сахары: почему города должны быть частью решения» (<https://www.wri.org/insights/closing-sub-saharan-africas-electricity-access-gap-why-cities-must-be-part-solution>) . *Институт мировых ресурсов* . Получено 13 декабря 2023 г. (<https://www.wri.org/insights/closing-sub-saharan-africas-electricity-access-gap-why-cities-must-be-part-solution>)