

*Линии передач постоянного тока* обеспечивают передачу лишь активной энергии, но на инверторных подстанциях необходима дополнительно реактивная мощность. Потребность в реактивной мощности покрывается компенсатора. [2]

*Линия передачи постоянного тока* может рассматриваться как каскад из двух управляемых выпрямителей с длинной линией между ними, которая имеет равномерно распределенные параметры: сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость утечки. Один выпрямитель работает в выпрямительном режиме, другой - в инверторном. На рис. 157 показана упрощенная принципиальная схема линии передачи постоянного тока. Распределенные постоянные линии обозначим: сопротивление -  $R$ , индуктивность -  $L$ , емкость -  $C$  и проводимость  $G$  соответственно на единицу длины. Переходные процессы могут быть обусловлены изменениями напряжений переменного тока на внешних зажимах трансформаторов и их параметров управления - углов открывания выпрямителя и инвертора. [3]

*Линии передачи постоянного тока* применяются в качестве магистральных линий энергосистем или для связи между энергосистемами. Выбор напряжения производится на основе детальных технико-экономических расчетов. [4]

Обычно *линии передач постоянного тока* отдают энергию в системы, которые содержат другие мощные источники переменного тока. Инвертор, работающий на сеть, в которой имеются мощные источники переменного тока, называется ведомым сетью (или зависимым) инвертором.

В *линиях передачи постоянного тока* униполярная корона имеет место при расположении на опоре проводов только одной полярности, а биполярная - при расположении на опоре проводов разных полярностей.

Однако увеличение длины *линии передачи постоянного тока* отнюдь не ухудшает условий ее устойчивости

При дальнейшем развитии *линии передачи постоянного тока* следует разработать новые формы подвесных и опорных изоляторов. По гирлянде изоляторов переменное напряжение распределяется в зависимости от емкостей изоляторов, постоянное напряжение - в зависимости от сопротивлений утечки. [8]

Для отбора мощности от *линии передачи постоянного тока* можно применять последовательное или параллельное включение инверторных подстанций. При параллельном включении нужны выключатели постоянного тока, при последовательном включении они не требуются. [9]

Наброс тока, получающийся в *линии передачи постоянного тока высокого напряжения* при аварийных переходных процессах из-за нарушения работы либо вентилей, либо приемной сети, невелик благодаря быстродействующему сеточному регулированию и ограничивается большими реакторами на стороне постоянного тока, установленными по концам линии. Благодаря этому удастся избежать перерывов в работе передачи при нарушении коммутаций в инверторе и с помощью специальной аварийной автоматики обеспечивается продолжение работы передачи сразу после случившегося аварийного переходного процесса. Реакторы на стороне постоянного тока сопряжены с демпфирующими устройствами, препятствующими развитию колебаний между индуктивностью реактора и емкостью линии, особенно когда она кабельная. [

## Условия передачи максимальной мощности от источника энергии к приемнику

Представим источник энергии с ЭДС  $\underline{E}$  и внутренним сопротивлением  $\underline{Z}_{вТ} = r_{вТ} + jx_{вТ}$  схемой замещения (рис. 3.22). Выясним, каково должно быть сопротивление  $\underline{Z} = r + jx$  приемника, чтобы передаваемая ему активная мощность была максимальной.

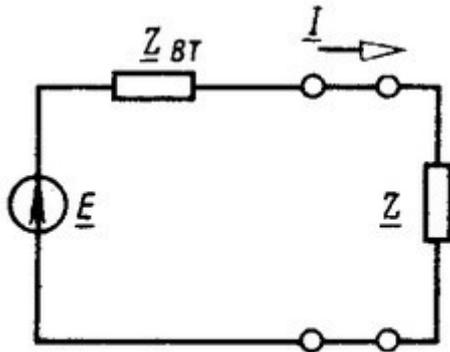


Рис. 3.22

Мощность приемника

$$P = rI^2 = \frac{rE^2}{(r + r_{вТ})^2 + (x + x_{вТ})^2}$$

Очевидно, что при любом  $r$  мощность достигает наибольшего значения при  $x = -x_{вТ}$ . В этом случае

$$P = rE^2 / (r + r_{вТ})^2$$

Взяв от полученного выражения производную по  $r$  и приравняв ее нулю, найдем, что  $P$  имеет наибольшее значение при  $r = r_{вТ}$ .

Таким образом, приемник получает от источника наибольшую активную мощность, если его комплексное сопротивление является сопряженным с комплексным внутренним сопротивлением источника:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{вТ}^* \quad (3.50)$$

При этом условии

$$P_{\max} = E^2 / 4r_{вТ} \quad (3.51)$$

и коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{rI^2}{(r + r_{эм})I^2} = 0,5 \quad (3.52)$$

В электроэнергетических установках режим передачи максимальной мощности невыгоден вследствие значительных потерь энергии. В различного рода устройствах автоматики, электроники и связи мощности сигналов весьма малы, поэтому часто приходится специально создавать условия передачи приемнику максимально возможной мощности. Снижение КПД часто никакого значения не имеет, так как передаваемая энергия мала.

Согласование сопротивлений приемника и источника питания в соответствии с (3.50) можно получить и добавлением в цепь элементов, обладающих реактивными сопротивлениями (см. [пример 4.6](#)).

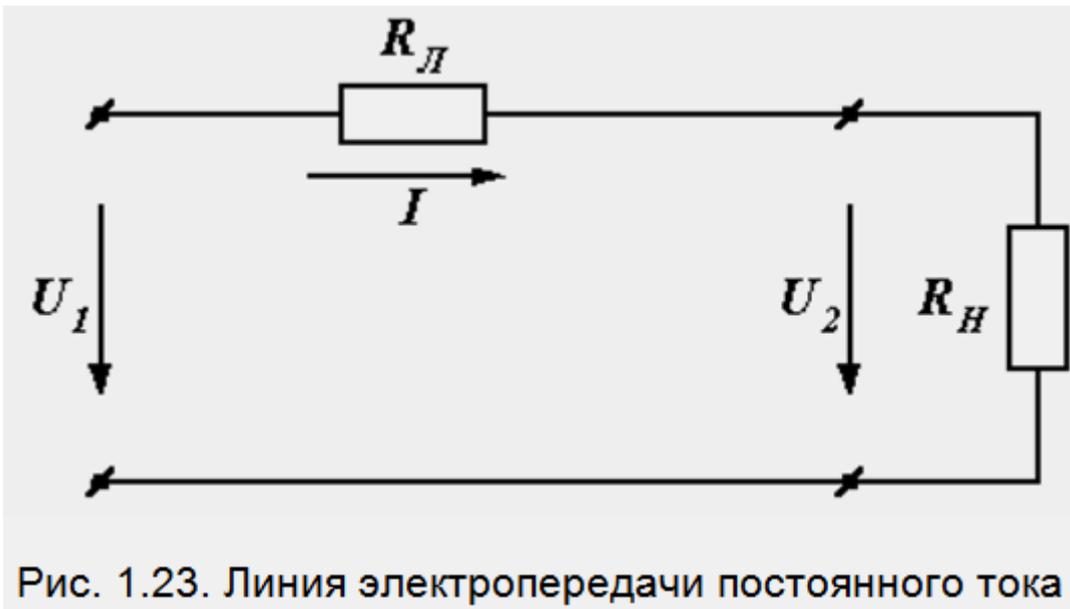
Иногда сопротивление приемника можно изменять не произвольно, а только с сохранением соотношения между активным и реактивным сопротивлениями, т. е. при  $\varphi = const$ . Анализ, который здесь не приводится, показывает, что в этом случае мощность  $P$  максимальна, если равны друг другу полные сопротивления приемника и источника ( $Z = Z_{эм}$ ), при этом

$$P'_{max} = \frac{E^2 \cos \varphi}{2z_{эм} [1 + \cos(\varphi_{эм} - \varphi)]} \quad (3.53)$$

Согласования полных сопротивлений приемника и источника питания можно добиться, включив приемник через трансформатор. В общем случае приемника - разветвленной пассивной цепи  $Z$  - это ее входное сопротивление.

## Линия электропередачи постоянного тока.

Если линия электропередачи имеет небольшую длину, при которой можно пренебречь утечкой тока через изоляцию, то ее электрическую схему можно представить в виде последовательного соединения сопротивления линии  $R_l$ , равного суммарному сопротивлению прямого и обратного проводов, и сопротивления нагрузки  $R_n$  (рис. 1.23).



При анализе работы линии нас интересуют, главным образом, три вопроса: напряжение на нагрузке, величина передаваемой мощности и коэффициент полезного действия передачи. Режимы работы линии удобно рассматривать в виде зависимостей различных величин от тока в линии, равного :

$$I = U_1 / (R_0 + R_H)$$

Падение напряжения в линии  $\Delta U$  и напряжение на нагрузке  $U_2$  определяются следующими выражениями:

$$\Delta U = IR_o; \quad U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - IR_o.$$

Если  $U_1$  и  $R_L$  постоянны, то оба выражения представляют собой линейные функции тока (рис. 1.24). В режиме холостого хода (при  $I = 0$ )  $\Delta U = 0$ , а  $U_2 = U_1$ . С ростом тока падение напряжения в линии возрастает, а напряжение на нагрузке уменьшается, и в режиме короткого замыкания (при  $R_H = 0$ )

$$I = I_K = \frac{U_1}{R_o}, \quad \Delta U = U_1, \quad U_2 = 0;$$

все входное напряжение гасится на сопротивлении линии.

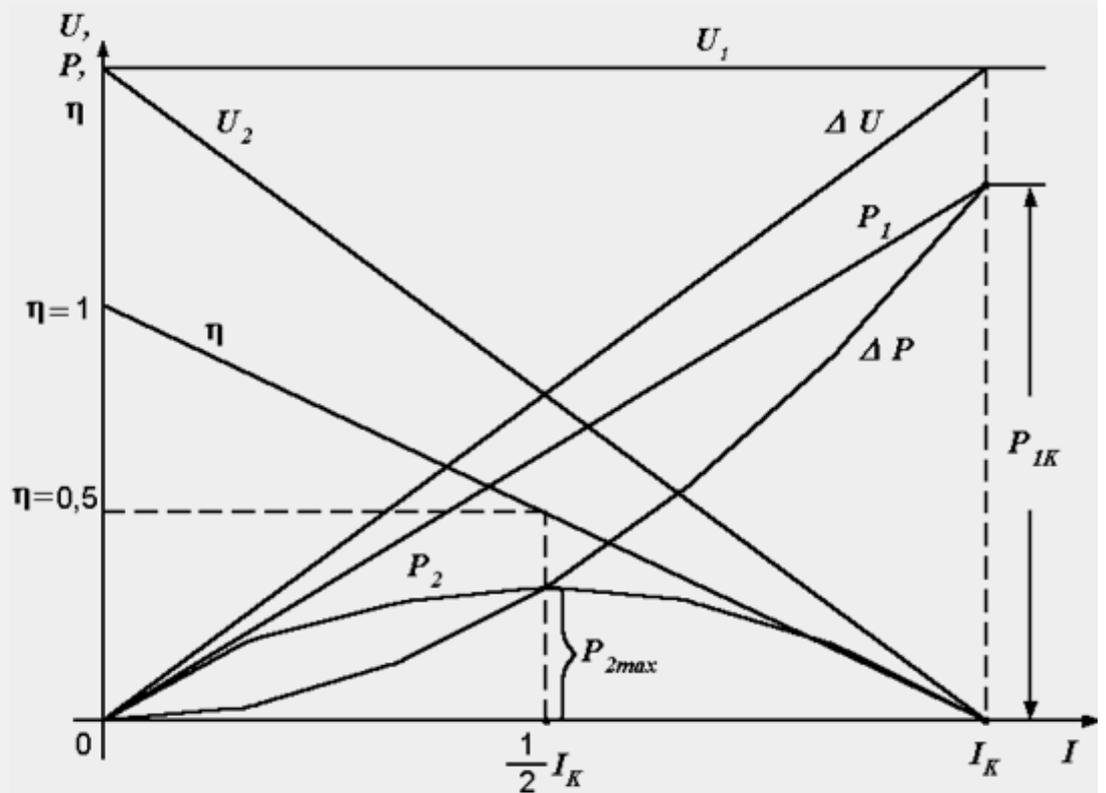


Рис. 1.24. Режимы работы линии

Мощность на входе линии линейно зависит от тока:  $P_1 = U_1 \cdot I$ . При холостом ходе она равна нулю, а при коротком замыкании вычисляется по формуле

$$P_{1K} = U_1 I_K = \frac{U_1^2}{R_L}$$

Потери мощности в линии  $\Delta P = I^2 R_L$  представляют собой квадратичную функцию тока. Ее график – парабола, проходящая через начало координат.

При  $I = 0$ :  $\Delta P = 0$ ; при  $I = I_K$ :  $\Delta P = I_K^2 R_L = \frac{U_1^2}{R_L} = P_{1K}$ , т.е. в режиме короткого замыкания мощность, поступающая в цепь, полностью теряет линии.

Мощность, поступающая в нагрузку, равна разности мощности в начале линии и мощности, теряемой в проводах:

$$P_2 = P_1 - \Delta P = U_1 I - I^2 R_{Л}.$$

Последнее выражение представляет собой уравнение параболы со смещенной вершиной и с обращенными вниз ветвями, проходящими через точки  $I = 0$  и  $I = I_K$ .

Мощность нагрузки представляет собой довольно сложную зависимость от сопротивления  $R_H$ :

$$P_2 = I^2 R_H = \frac{U_1^2 R_H}{(R_H + R_{Л})^2}$$

При  $R_H = 0$ :  $P_2 = 0$ ; при возрастании  $R_H$  мощность  $P_2$  сначала возрастает, достигает максимального значения и начинает убывать, стремясь к нулю при  $R_H \rightarrow \infty$  (рис. 1.25).

Выясним, при каком сопротивлении нагрузки передаваемая ей мощность максимальна. Для этого продифференцируем функцию (1.15) по  $R_H$  и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dP_2}{dR_H} = U_1^2 \frac{(R_H + R_{Л})^2 - 2(R_H + R_{Л})R_H}{(R_H + R_{Л})^4} = 0.$$

Приравняв к нулю числитель производной, получим:

$$R_H + R_{Л} - 2R_H = 0,$$

или  $R_H = R_{Л}$ .

То есть мощность, получаемая нагрузкой, максимальна, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению линии.

Ток, протекающий при этом по линии составляет половину тока короткого замыкания, а мощность в конце линии равна:

$$P_2 = P_{2max} = \left(\frac{1}{2} I_K\right)^2 R_{Л} = \frac{U_1^2}{4R_{Л}}.$$

Коэффициент полезного действия равен отношению мощностей в начале и конце линии:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{I^2 R_L}{U_1 I} = 1 - \frac{R_L}{U_1} I$$

Из данной формулы следует, что коэффициент полезного действия передачи определяется отношением сопротивлений линии и нагрузки.

При их равенстве, когда нагрузке передается максимальная мощность,  $\eta = 0,5 = 50\%$ . Этот режим, при котором теряется половина передаваемой энергии, на практике, естественно, не пригоден. В реальных линиях при передаче больших мощностей КПД составляет примерно 0,94–0,97. При этом сопротивление нагрузки значительно больше сопротивления линии.

Для анализа режимов электропередачи полезной оказывается еще одна формула. Так как

$$I = \frac{P_2}{U_2}, \quad \text{а} \quad \Delta P = I^2 R_L = \frac{P_2^2 R_L}{U_2^2}, \quad \text{то}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{R_L P_2}{U_2^2}}$$

То есть при одной и той же мощности нагрузки  $P_2$ , потери  $\Delta P$  пропорциональны сопротивлению линии и обратно пропорциональны квадрату напряжения. Для увеличения коэффициента полезного действия передачи необходимо повышение напряжения и снижение электрического сопротивления проводов линии путем увеличения их сечения и применения материалов с меньшим удельным сопротивлением.

**Пример 1.6.** Линия электропередачи с проводами марки А-120 длиной  $l = 1000$  км питает нагрузку мощностью  $P_2 = 50$  МВт. Каким должно быть напряжение в начале линии, чтобы КПД передачи был не ниже 90 %?

**Решение.** Сопротивление одного километра провода марки А-120  $R_0 = 0,27$  Ом/км. Суммарное сопротивление прямого и обратного проводов линии составляет  $R_L = 2lR_0 = 540$  Ом.

Принимая  $\eta = 0,9$ , из формулы (1.17) получаем:

$$U_2 = \sqrt{\frac{\eta R_{\text{Л}} P_2}{1-\eta}} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 540 \cdot 50 \cdot 10^6}{1-0,9}} = 4,93 \times 10^5 \text{ В} = 493 \text{ кВ.}$$

Так как  $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1}$ , то  $U_1 = \frac{U_2}{\eta} = \frac{493}{0,9} = 548$  кВ.

Для выполнения условий задачи напряжение в начале линии должно быть не ниже 548 кВ.