

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE CAPACITY OF DISTRIBUTION NETWORKS

К.Д. Сырцов

Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
volkau@bntu.by

K. Sirtsov

Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной работе производится оценка значимости потерь напряжения и длительно допустимого тока в сети как факторов, влияющих на ее пропускную способность.*

***Abstract:** this article examines the significance of voltage losses and long-term permissible current in the network as factors affecting its throughput.*

***Ключевые слова:** пропускная способность, электрическая сеть, потери напряжения, допустимый ток, передача электроэнергии.*

***Key words:** capacity, electrical network, voltage losses, permissible current, power transmission.*

Введение.

Пропускная способность электропередачи – это наибольшая активная мощность, которую с учетом всех технических ограничений можно передать по линии. Технические ограничения определяются в основном следующими факторами: устойчивость параллельной работы генераторов системы, нагревом отдельных элементов передачи, значением уровня напряжения в узлах [1].

Для распределительных сетей номинальным напряжением 10 кВ определяющими техническими ограничениями являются ограничения по максимальному току нагрева и соблюдение допустимых диапазонов напряжения в узлах сети.

Произведем исследование зависимости пропускной способности сети 10 кВ от ее параметров (длины, марки провода) на конкретном примере. Задавшись пограничными параметрами режима, произведем расчет предельной мощности, которую может передать сеть. По результатам полученных значений сделаем вывод о том, какое из ограничений является наиболее существенным.

Основная часть.

Согласно ГОСТ 32144-2013, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю. Соответственно максимально и минимально допустимые напряжения в сети номинальным напряжением 10 кВ составляют 11 кВ и 9 кВ. Для сети 6 кВ получим аналогично напряжения 6,6 кВ и 5,4 кВ (рисунок 1).

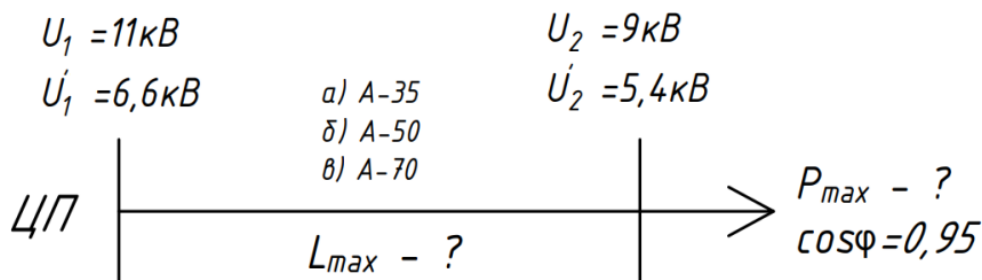


Рисунок 1 - Исходные данные для расчета зависимости L(P)

Сведем справочные данные рассматриваемых алюминиевых проводов в таблицу 1 [2, с. 156].

Таблица 1 - Справочные данные проводов линий электропередачи

Площадь сечения проводов, мм ²	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км при напряжении		Длительно допустимый ток, А
		6 кВ	10 кВ	
35	0,835	0,380	0,391	170
50	0,578	0,369	0,380	215
70	0,413	0,355	0,366	265

В сетях с напряжением до 110 кВ потери напряжения можно приближенно считать равными продольной составляющей падения напряжения ΔU₁₂ [1]. Тогда формула расчета потерь напряжения по данным конца линии имеет вид:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_H \cdot R + Q_H \cdot X}{U_2},$$

где P_H, Q_H - активная и реактивная мощности нагрузки;
 R, X - активное и реактивное сопротивления линий;
 U₂ - напряжение в конце линии (U₂ = 9 кВ, U₂' = 5,4 кВ).
 Выведем из формулы зависимость L(P):

$$\Delta U_{12} = \frac{P_H \cdot r_0 \cdot L + P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot x_0 \cdot L}{U_2};$$

$$L = \frac{(U_2 - U_1) \cdot U_2}{(r_0 + \operatorname{tg} \varphi \cdot x_0) \cdot P_H},$$

где U₁ - напряжение в начале линии (U₁ = 11 кВ, U₁' = 6,6 кВ);
 φ - угол сдвига по фазе между током и напряжением;

r_0, x_0 - активное и реактивное сопротивления 1 км провода.

Рассчитаем предельно передаваемую мощность по проводам по справочным значениям длительно допустимых токов. В качестве примера рассмотрим марку провода А-50 при $U_{ном} = 10$ кВ:

$$P_{доп(50)} = \sqrt{3} \cdot I_{доп(50)} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 215 \cdot 9 \cdot 0,95 = 3,184 \text{ кВт.}$$

Аналогично рассчитаем другие значения и занесем их в таблицу 2.

Таблица 2 - Допустимая мощность, передаваемая по линии электропередачи

Площадь сечения проводов, мм ²	P _{доп} , кВт	
	6 кВ	10 кВ
35	1,511	2,518
50	1,910	3,184
70	2,355	3,924

Построим графическую зависимость для номинального напряжения 10 кВ и 6 кВ (рисунки 2 и 3). Полученные кривые линии будут соответствовать крайним режимам по напряжению, а вертикальные прямые – ограничениям по току. Точки, находящиеся в области, ограниченной этими линиями, относятся к нормальному режиму. На графиках определим критическую точку, которая одновременно соответствует максимально допустимой потере напряжения в линии и предельно передаваемой мощности.

Для линии с маркой провода А – 50 при максимально загруженности наибольшее расстояние передачи энергии составляет 8,043 км и 4,852 км при 10 кВ и 6 кВ соответственно. Увеличение сечения позволяет увеличить пропускную способность линии, однако максимальное расстояние передачи при этом изменяется незначительно. При сечении 70 мм² критические точки - 8,601 км и 5,195 км. Следовательно, класс напряжения 10 кВ является оптимальным для передачи мощностей 1000-4000 кВт на небольшие расстояния (до 30 км). Аналогично, линии 6 кВ оптимальны при небольшой протяженности сети при мощностях 500-2500 кВт. Для значительного увеличения расстояния передачи электроэнергии необходимо увеличить класс напряжения.

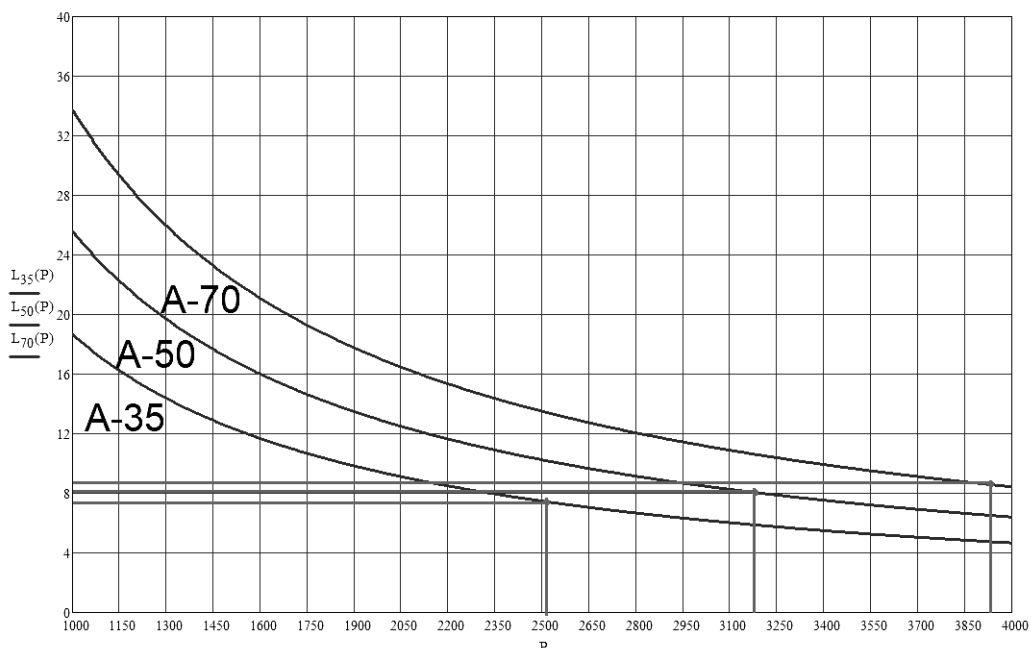


Рисунок 2 - Зависимость предельной длины линии от передаваемой мощности при $U_{ном} = 10$ кВ

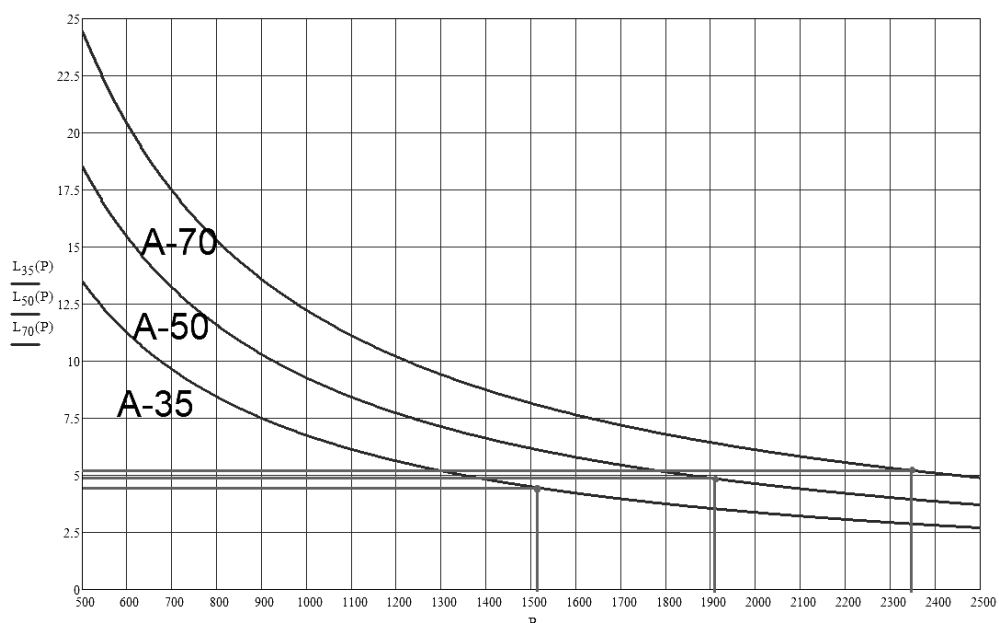


Рисунок 3 - Зависимость предельной длины линии от передаваемой мощности при $U_{ном} = 6$ кВ

Из зависимостей можно также наблюдать, что при небольшой длине линий определяющим критерием является предельная передаваемая мощность по проводу данной марки. При увеличении длины потери напряжения являются определяющим фактором.

Аналогичные выводы можно получить и с помощью исследования зависимости $P(S)$. Исходные данные представлены на рисунке 4.

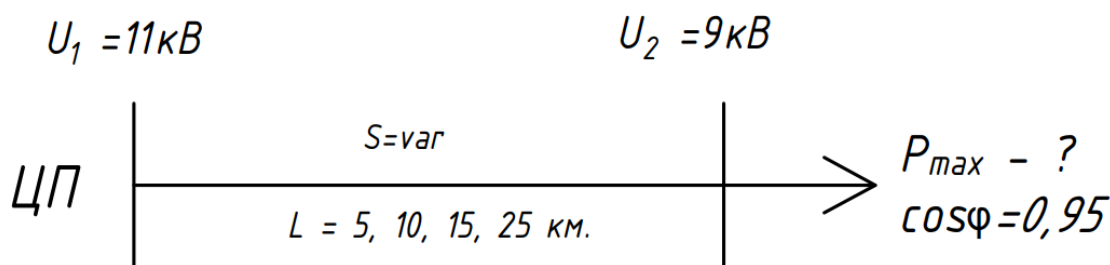


Рисунок 4 - Исходные данные для расчета зависимости P(S)

Выведем зависимость:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S};$$

$$X = (0,144 \cdot \log \frac{D_{cp}}{\sqrt{S}} + 0,0157) \cdot L;$$

$$\Delta U_{12} = \frac{P_H \cdot R + P_H \cdot \text{tg} \varphi \cdot X}{U_2};$$

$$P_H = \frac{(U_2 - U_1) \cdot U_2}{R + \text{tg} \varphi \cdot X};$$

$$P_H = \frac{(U_2 - U_1) \cdot U_2}{(\rho \cdot \frac{1}{S} + \text{tg} \varphi \cdot 0,144 \cdot \log \frac{D_{cp}}{\sqrt{S}} + 0,0157) \cdot L},$$

где D_{cp} - среднегеометрическое расстояние между проводами фаз (для линий 10 кВ принимаем D_{cp} = 1,5 м;

ρ - удельное сопротивление материала провода (для алюминия принимаем ρ = 0,028 $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$);

S – площадь сечения провода.

Построим графическую зависимость и дополним ее предельно допустимыми мощностями, рассчитанными ранее (рисунок 5).

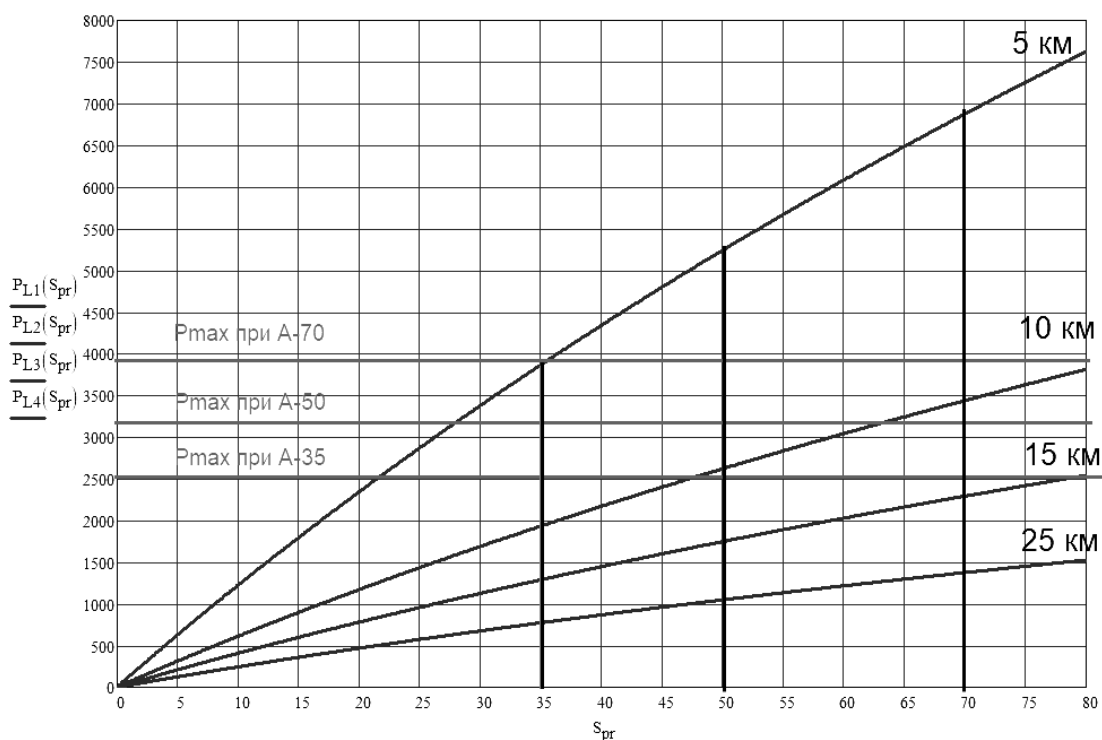


Рисунок 5 - Зависимость предельной передаваемой мощности от площади сечения алюминиевого провода

По графику видно, что при неизменном расстоянии сети ее пропускная способность увеличивается вместе с увеличением площади сечения проводов по зависимости, близкой к пропорциональной. При этом при большой протяженности наиболее существенный фактор – потеря напряжения, а при малой – ток, что было также определено из предыдущих зависимостей.

Важное влияние на пропускную способность оказывает также соотношение мощностей P_H и Q_H . Оценим его влияние с помощью графических построений. Исходные данные представлены на рисунке 6.

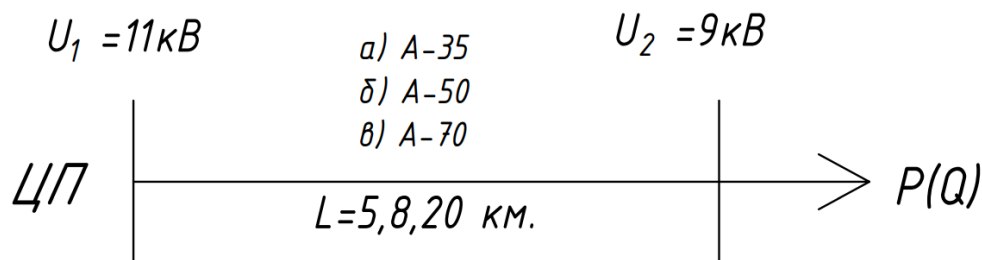


Рисунок 6 - Исходные данные для получения зависимости P(Q)

Получим зависимость P(Q) исходя из двух технических ограничений (по току и напряжению):

$$I_{доп} = \frac{\sqrt{P_H^2 + Q_H^2}}{\sqrt{3} \cdot U_2};$$

$$P_H = \sqrt{3 \cdot I_{\text{доп}}^2 \cdot U_2^2 - Q_H^2};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{P_H \cdot r_0 \cdot L + Q_H \cdot x_0 \cdot L}{U_2};$$

$$P_H = \frac{(U_2 - U_1) \cdot U_2 - Q_H \cdot x_0 \cdot L}{r_0 \cdot L}.$$

Произведем графическое построение: кривым линиям соответствуют ограничения по току при различных сечениях проводов, а прямым - критическим по напряжению режимы для сечения 50 мм² при разной длине.

При большой длине линии (на примере – 20 км) ограничение по напряжению снова оказалось существеннее при любом соотношении мощностей P_H и Q_H. При малой длине (5 км) существеннее ограничение по току. При определенной длине (8 км) графики пересекаются и фактор, ограничивающий пропускную способность определяется углом cosφ.

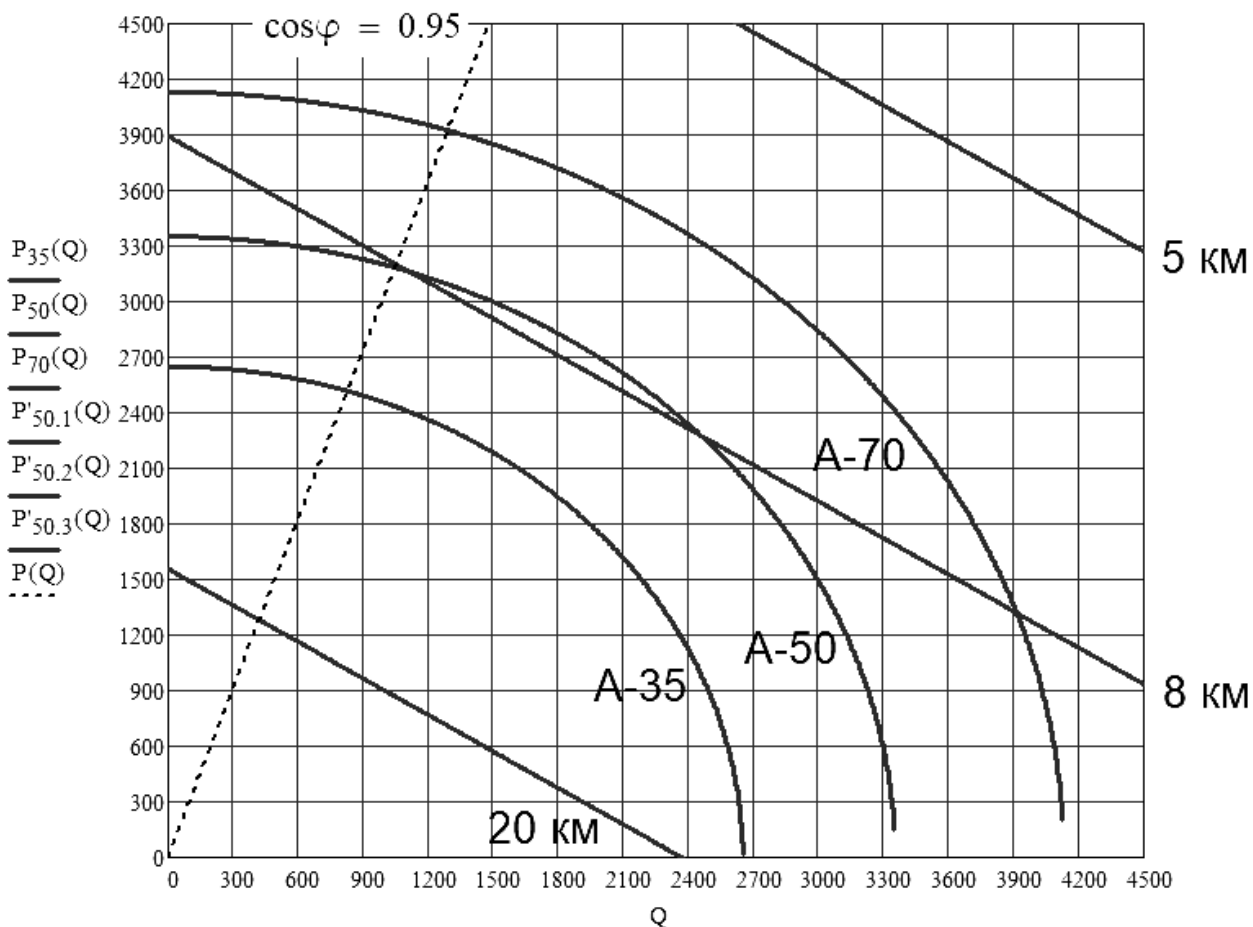


Рисунок 7 - Зависимость предельной мощности нагрузки P от реактивной мощности Q

Заключение

Таким образом, фактор, ограничивающий пропускную способность линии, в первую очередь определяется расстоянием передачи электроэнергии. При небольших протяженностях можно нагружать линию до тех мощностей, при которых ток в ней не превысит допустимый, при этом падения напряжения будут находиться в нормальных диапазонах. При больших расстояниях критический режим наступает из-за высоких потерь напряжения, при этом остается запас по допустимому току. При определенной длине линии наиболее существенное ограничение зависит от угла нагрузки – $\cos\varphi$.

Литература

1. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.

2. Электрические сети и электроэнергетические системы. Задачи для решения: учебно-методическое пособие для практических занятий / В.Т. Федин, Г.А. Фадеева, А.А. Волков; под ред. В.Т. Федина. – Минск: БНТУ, 2012. –168 с.