

О ВЛИЯНИИ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПУНКТОВ НА ЭКОНОМИКУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Г. Х. ПОБУЛЬ,
кандидат технических наук

При электрификации сельского хозяйства основные затраты металла проводов падают на низковольтные сети. В связи с этим вопросу рационализации сельскохозяйственных низковольтных электрических сетей следует уделять особое внимание.

При выборе системы распределения электроэнергии, проектировании электрических сетей и решении вопросов, связанных с разработкой стандарта на электрооборудование, необходимо знать оптимальную мощность трансформаторных пунктов.

При проектировании низковольтной распределительной сети сельских объектов (колхозов, совхозов и др.) падение напряжения и само напряжение заданы. Единственной величиной, определяющей суммарные первоначальные затраты и годовые расходы, является число трансформаторных пунктов (в дальнейшем сокращенно ТП), зависящее, в свою очередь, от их единичной мощности.

Вопросу определения оптимальной мощности сельских ТП для условий электрификации сельского хозяйства уделено очень мало внимания. В то же время имеется ряд работ по определению числа ТП и наиболее выгодного расстояния между ними для городских электрических сетей.

Из имеющихся по вышеупомянутому вопросу работ наибольшее внимание заслуживают работы С. Н. Никогосова, М. Н. Карасика и Б. Л. Айзенберга [1, 2]. Поскольку приведенные в этих трудах формулы являются очень удобными для практического расчета городских электрических сетей, то в настоящей работе сделана попытка принять за основу ту же методику, которая использовалась названными авторами.

В отличие от работ по городским электрическим сетям, в данном случае для получения достаточной точности приходилось учитывать стоимость высоковольтных сетей и рассматривать применение однофазных трансформаторов и стальных проводов в низковольтных сетях.

Задача разрешена путем определения минимального значения капиталовложений. Это обычно совпадает с минимумом эксплуатационных расходов, так как зависимость последних от мощности ТП имеет из-за постоянства потерь энергии в сетях весьма пологий характер. Указанные потери зависят главным образом от расчетной величины потери напряжения.

Суммарные капиталовложения на один ТП складываются из:

- 1) удельной стоимости высоковольтной сети,
- 2) стоимости самого ТП,
- 3) стоимости низковольтной сети.

Согласно произведенному нами исследованию, увеличение удельной стоимости высоковольтной сети по сравнению со стоимостью сети при одном ТП в колхозном центре, относящейся к одному ТП и одному метру низковольтной сети, можно выразить приблизительно при помощи следующего выражения:

$$k_B = \alpha_B a_B \left(\frac{S}{S_T} - 1 \right) \left[\frac{\text{руб.}}{\text{м}} \right], \quad (1)$$

где α_B — коэффициент конфигурации сети высокого напряжения;
 a_B — стоимость линии высокого напряжения, руб./м;
 S — суммарная мощность колхозного центра, ква;
 S_T — мощность трансформаторного пункта, ква.

Согласно данным, полученным в результате исследования ряда проектов колхозных центров, коэффициент конфигурации сети α_B зависит от местных условий и изменяется от 0,05 до 0,2. При предварительных расчетах можно принимать в среднем $\alpha_B = 0,1$.

Стоимость ТП можно выразить в виде

$$K_T = b' + b'' S_T \quad [\text{руб.}], \quad (2)$$

где b' — часть стоимости ТП, не зависящая от ее мощности, руб.;
 b'' — коэффициент, учитывающий зависимость стоимости ТП от ее мощности, руб./кВА.

Длина распределительной сети низкого напряжения, питаемая от одного ТП, может быть выражена как

$$L = \frac{S_T}{D} \quad [\text{м}], \quad (3)$$

где D — погонная плотность нагрузки в момент ее максимума, кВА/м.

Тогда стоимость ТП, отнесенная к 1 м сети низкого напряжения

$$k_T = \frac{b' D}{S_T} + b'' D \quad \left[\frac{\text{руб.}}{\text{м}} \right]. \quad (4)$$

Стоимость 1 м низковольтной распределительной сети можно выразить формулой

$$k_H = a'_H + a''_H s \left[\frac{\text{руб.}}{\text{м}} \right], \quad (5)$$

где a'_H — расходы, не зависящие от сечения проводов, руб./м;
 a''_H — коэффициент, учитывающий зависимость расходов от сечения проводов, руб./мм²м;
 s — сечение одного провода, мм².

Сечение провода трехфазной линии, определенное по падению напряжения

$$s = \frac{\rho \Sigma S l \cdot 10^5}{\varepsilon U_\lambda^2} \quad [\text{мм}^2], \quad (6)$$

где S — нагрузка участка, кВА;
 l — протяженность участка, м;
 ρ — удельное сопротивление, ом мм²/м;
 ε — потеря напряжения, %;
 U_λ — линейное напряжение, в.

При однофазных трансформаторах с системой напряжения 2×220 в

$$s = \frac{\rho \Sigma S l \cdot 10^5}{2 \varepsilon U_\Phi^2} \quad [\text{мм}^2]. \quad (7)$$

Таким образом, общее выражение капиталовложений, отнесенное к 1 м длины сети низкого напряжения

$$k = k_b + k_r + k_H = a_b a_B \left(\frac{S}{S_T} - 1 \right) + \frac{b'D}{S_T} + b''D + a'_H + a''_H s \quad \left[\frac{\text{руб.}}{\text{м}} \right]. \quad (8)$$

Для решения полученного уравнения необходимо сечение проводов выразить через мощность ТП (S_T). На эту зависимость будет влиять конфигурация сети низкого напряжения.

Наибольшее сечение проводов получается при двухлучевом питании (рис. 1), при более разветвленных конфигурациях сети сечение проводов будет меньше.

При двухлучевом питании с равномерно распределенной нагрузкой для трехфазной системы

$$s = \frac{\rho S_T L}{8\epsilon U_\lambda^2} 10^5 \quad [\text{мм}^2], \quad (9)$$

для однофазной —

$$s = \frac{\rho S_T L}{16\epsilon U_\Phi^2} 10^5 \quad [\text{мм}^2]. \quad (10)$$

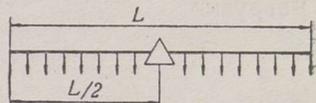


Рис. 1. Схема сети при двухлучевом питании.

При других конфигурациях низковольтных сетей получаем соответственно

$$s = \frac{\rho S_T^2}{8a_H^3 \epsilon U_\lambda^2 D} 10^5 \quad [\text{мм}^2], \quad (11)$$

$$s = \frac{\rho S_T^2}{16a_H^3 \epsilon U_\Phi^2 D} 10^5 \quad [\text{мм}^2], \quad (12)$$

где a_H — коэффициент конфигурации низковольтной сети.

Подставляя сечение по формуле (11) в выражение (8), получаем

$$k = a_b a_B \left(\frac{S}{S_T} - 1 \right) + \frac{b'D}{S_T} + b''D + a'_H + a''_H \frac{\rho S_T^2 10^5}{8a_H^3 \epsilon U_\lambda^2 D}. \quad (13)$$

Отсюда можно легко, путем дифференцирования по S_T и приравнивания производной нулю, определить наивыгоднейшую мощность ТП, при которой будут иметь место наименьшие капиталовложения

$$S_T = a_H \sqrt[3]{\frac{4\epsilon U_\lambda^2 D (a_b a_B S + b'D)}{\rho a_H'' 10^5}}. \quad (14)$$

Аналогично при однофазной системе

$$S_T = a_H \sqrt[3]{\frac{8\epsilon U_\Phi^2 D (a_b a_B S + b'D)}{\rho a_H'' 10^5}}. \quad (15)$$

При использовании однофазных трансформаторов для электрификации жилой зоны колхозов часто удается совместная подвеска проводов высокого и низкого напряжения. В случае применения совместной подвески проводов различных напряжений за стоимость высоковольтной линии следует принимать разницу между стоимостью линии с проводами двух напряжений и стоимостью обычной низковольтной линии. При этом нетрудно заметить, что сокращение стоимости высоковольтной линии позволяет осуществить дальнейшее разукрупнение подстанций.

Полученные по формулам оптимальные мощности подстанций, а также получаемое отсюда количество ТП следует рассматривать как ориентировочные, часто, правда, дающие достаточно точные результаты. При проектировании всегда возможна некоторая перестановка трансформаторных пунктов и некоторое изменение их числа в зависимости от местных условий.

Вышеприведенные формулы могут дать наиболее точные результаты в условиях жилого сектора колхоза, где нагрузка распределена равномерно. В производственной зоне, с сосредоточенными и неравномерно распределенными нагрузками, также можно использовать приведенные формулы с введением коэффициента неравномерности распределения нагрузки

$$\xi_{\alpha} = \sqrt[3]{\frac{1}{\xi}}, \quad (16)$$

на который необходимо умножить полученную по формулам (14) и (15) оптимальную мощность подстанции. Коэффициент ξ учитывает отличие характера распределения нагрузки от равномерного распределения.

При равномерно распределенной нагрузке $\xi = 1,0$ ($\xi_{\alpha} = 1,0$); при сосредоточенной нагрузке в конце магистрали $\xi = 2,0$ ($\xi_{\alpha} = 0,794$); для случая расположения главной нагрузки вблизи питающей ТП $\xi < 1$ и ξ_{α} будет больше единицы.

Формулы (14) и (15) примут тогда окончательный вид

$$S_T = \alpha_H \xi_{\alpha} \sqrt[3]{\frac{4\epsilon U_{\pi}^2 D (\alpha_B a_B S + b' D)}{\rho a_H'' 10^5}}, \quad (17)$$

$$S_T = \alpha_H \xi_{\alpha} \sqrt[3]{\frac{8\epsilon U_{\Phi}^2 D (\alpha_B a_B S + b' D)}{\rho a_H'' 10^5}}. \quad (18)$$

Согласно проведенному исследованию, в ряде проектов электрификации производственной зоны колхозов значение произведения $\alpha_H \xi_{\alpha}$ находится в пределах 1,2...1,6 (в среднем 1,4). В жилом секторе колхозов, при применении однофазных трансформаторов, $\alpha_H \xi_{\alpha} = 1,0...1,3$ (в среднем 1,1).

Имея в виду, что получаемое значение S_T придется в дальнейшем округлить до ближайшего стандартного значения, то, следовательно, нет особой надобности в очень точном определении вышеупомянутых коэффициентов.

Для облегчения определения наивыгоднейшей мощности трансформаторной подстанции на базе формул (17) и (18) построена номограмма (рис. 2), позволяющая быстро определить мощность подстанции.

В качестве примера пользования номограммой на ней определена мощность подстанции при следующих показателях: $S = 100$ ква; $D = 0,03$ ква/м; $\alpha_B = 0,1$; $a_B = 10$ тыс. руб./км; $b' = 10$ тыс. руб.; $\rho = 0,145$ ом мм²/м (сталь); $a_H'' = 0,07$ руб./мм²м; $\alpha_H \xi_{\alpha} = 1,2$ и система напряжения 380/220 в.

Получена оптимальная мощность подстанции $S_T = 50$ ква.

Из вышеприведенных формул видно, что на величину оптимальной мощности подстанции влияет ряд факторов: погонная плотность нагрузки, система распределения электроэнергии, конфигурация сети, технические и экономические показатели сетей и подстанций.

При трехфазной системе:

$$S_T = \alpha_n \epsilon_\alpha \sqrt[3]{\frac{4 \epsilon U_n^2 D (\alpha_\theta \alpha_\theta S + b'D)}{\rho \alpha_n'' \cdot 10^5}}$$

При однофазной системе:

$$S_T = \alpha_n \epsilon_\alpha \sqrt[3]{\frac{8 \epsilon U_\phi^2 D (\alpha_\theta \alpha_\theta S + b'D)}{\rho \alpha_n'' \cdot 10^5}}$$

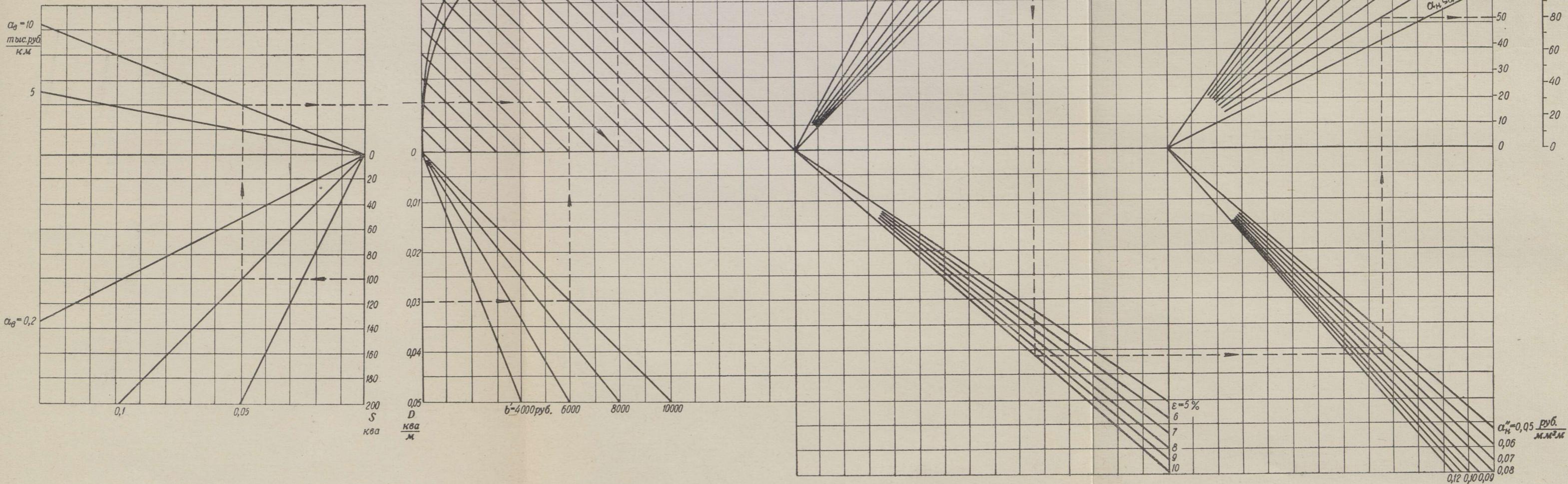


Рис. 2. Номограмма для определения оптимальной мощности трансформаторного пункта.

Наибольшее влияние оказывает погонная плотность нагрузки. На рис. 3 приведены кривые изменения мощности трехфазной подстанции для стальных и алюминиевых проводов с учетом ($\alpha_B = 0,2$) и без учета влияния высоковольтной сети ($\alpha_B = 0$). При построении кривых были приняты следующие параметры:

$$b' = 10000 \text{ руб.}; U_{л} = 380 \text{ в}; \varepsilon = 10\%;$$

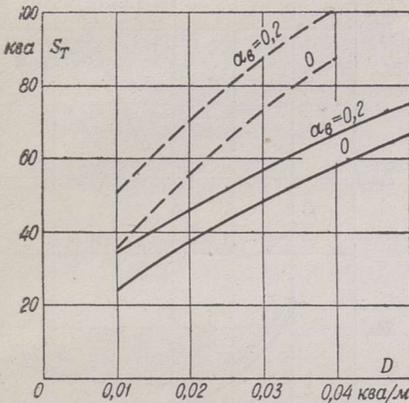
$$\alpha_{H\xi_{\alpha}} = 1,4; S = 100 \text{ ква}; a_B = 10 \text{ тыс. руб./км.}$$

Из рассмотрения кривых видно, что применение алюминиевых проводов увеличивает мощность трансформаторного пункта приблизительно на 50%.

При однофазной системе 2×220 в аналогичные кривые представлены на рис. 4. При расчете принималось:

$$b' = 4000 \text{ руб.}; U_{\Phi} = 220 \text{ в}; \varepsilon = 10\%; \alpha_{H\xi_{\alpha}} = 1,1;$$

$$S = 100 \text{ ква}; a_B = 5 \text{ тыс. руб./км.}$$



— $\rho = 0,145 \text{ ам.мм}^2/\text{м}; \alpha_{H'} = 0,09 \text{ руб./мм}^2/\text{м};$ стальные провода
 --- $\rho = 0,0315$ — " — $\alpha_{H'} = 0,12$ — " — алюминиевые провода

Рис. 3. Оптимальная мощность трехфазной подстанции при $\varepsilon = 10\%; b' = 10 \text{ тыс. руб.}; U_{л} = 380 \text{ в}; \alpha_{H\xi_{\alpha}} = 1,4; S = 100 \text{ ква}; a_B = 10 \text{ тыс. руб./км.}$

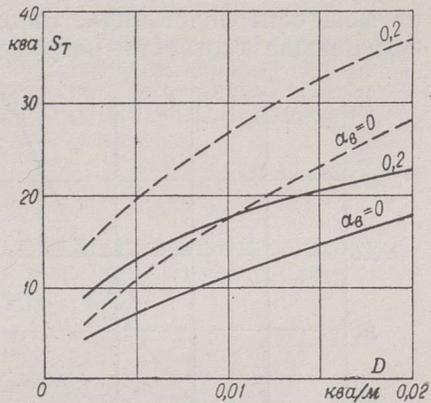


Рис. 4. Оптимальная мощность однофазной подстанции для системы 2×220 в при $b' = 4000 \text{ руб.}; U_{\Phi} = 220 \text{ в}; \varepsilon = 10\%; S = 100 \text{ ква}; a_B = 5 \text{ тыс. руб./км}; \alpha_{H\xi_{\alpha}} = 1,1.$

Если учесть, что в низковольтных сетях жилого сектора колхозов Эстонской ССР средняя погонная плотность нагрузки составляет примерно 8... 9 ва/м, то этой плотности соответствует оптимальная мощность однофазного трансформатора 10 кВА (рис. 4).

Если ориентироваться в низковольтной сети на применение алюминиевых проводов, что весьма желательно с точки зрения сокращения потерь энергии в сети, то следовало бы иметь в стандарте однофазные трансформаторы с мощностью выше 10 кВА.

В настоящее время проектируется питание жилого и административного сектора либо от отдельного трехфазного трансформатора мощностью до 50 кВА, или же от трехфазной подстанции производственной зоны [3]. При дроблении трансформаторной мощности, т. е. при осуществлении питания жилой и административной зоны от однофазных мало-

мощных трансформаторов, расход металла в низковольтной сети значительно сокращается. Это видно и на рис. 5, где приведен удельный расход металла в сети на основе формул для трехфазной и однофазной сети

$$g = 43,7 \frac{\rho \beta'}{(\alpha_H \xi_a)^3 \epsilon U_{\text{л}}^2} \left(\frac{S_{\text{T}}}{D} \right)^2 \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВа}} \right] \quad (19)$$

и

$$g = 18,8 \frac{\rho \beta'}{(\alpha_H \xi_a)^3 \epsilon U_{\text{Ф}}^2} \left(\frac{S_{\text{T}}}{D} \right)^2 \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВа}} \right], \quad (20)$$

где β' — удельный вес материала проводов.

Для практического проектирования очень важно не только найти решение, дающее минимум расходов, но и знать, к чему приводит отступление от этого минимума. На рис. 6 представлены кривые удельных расходов в зависимости от мощности подстанции. Видно, что чем меньше плотность нагрузки, тем

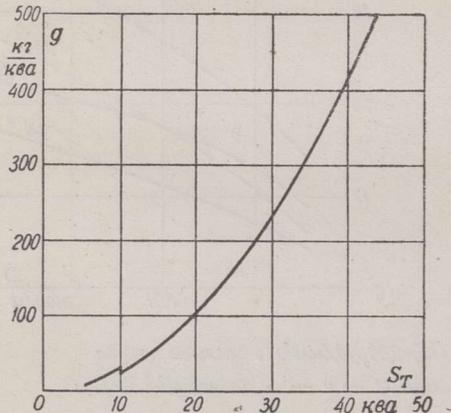


Рис. 5. Удельный расход металла в стальном эквиваленте в низковольтной сети в зависимости от мощности трансформаторного пункта.

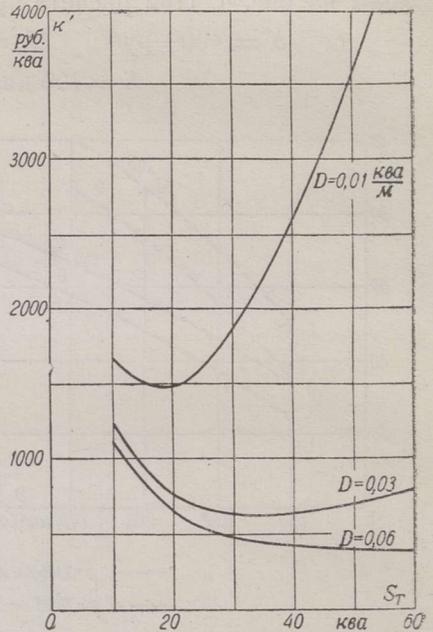


Рис. 6. Удельные капиталовложения для разных плотностей нагрузки при трехфазной системе со стальными проводами в низковольтной сети.

более явно выражен минимум расходов и тем больше удельные капиталовложения. Это показывает, что при незначительных плотностях нагрузки (это относится особенно к жилой зоне колхозов) необходимо внимательно относиться к выбору мощности подстанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Никогосов, Б. Л. Айзенберг, М. Н. Карасик, Выбор числа и мощности сетевых трансформаторов, Энергетический сборник, Вып. I, Изд. Облбюро ИТС ВСРЭ и ЭИЛОЭК-РНИТО, Л., 1934.
2. Б. Л. Айзенберг, М. Н. Карасик, К вопросу определения оптимальной мощности сетевых трансформаторов городской электрической сети, Энергетич. сб., НКЭ ЛРУГЦЭ Ленэнерго, Л., 1940.
3. F. Novod, G. Pobul, Elektrienergia jaotamise segasüsteemi rakendamise võimalustest Eesti NSV-s, «Sotsialistlik Põllumajandus», nr. 8, 1956.

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
13 XI 1957

TRAFOPUNKTIDE VÕIMSUSE MÕJUST PÕLLUMAJANDUSE ELEKTRIENERGIAGA VARUSTAMISE ÕKONOOMIKALE

G. Pobul,
tehniliste teaduste kandidaat

Resümee

Põllumajanduse elektrifitseerimisel kulub eriti palju metalli madalpingevõrkude ehitamiseks. Seepärast tuleb pöörata erilist tähelepanu nende võrkude ratsionaalsele projekteerimisele. Madalpingevõrkude projekteerimisel on juba ette kindlaks määratud võrgupinge ja pingelang; ainsaks metallikulu ja kapitaal mahutusi määravaks teguriks on trafopunktide arv ning võimsus. Sõltuvalt trafopunktide arvust muutub madal- ja kõrgepingevõrgu ning trafopunktide maksumus. Trafopunktide ökonoomse võimsuse puhul on kapitaal mahutused elektrivõrgu ja trafopunktide ehitamiseks kõige väiksemad. Artiklis esitatud valemid (17) ja (18) on nii kolme- kui ka ühefaasilise alajaama ökonoomse võimsuse määramiseks, kusjuures võetakse arvesse ka kõrgepingevõrgu maksumus. Joonisel 2 toodud nomogramm võimaldab kiiresti leida trafopunkti ökonoomse võimsuse nii 380/220 V kui ka 2×220 V jaotussüsteemide puhul.

Töös analüüsitakse tegureid, mis määravad trafopunkti ökonoomse võimsuse. Üheks olulisemaks teguriks on võrgu erikoormus jooksva meetri kohta. Eesti NSV tingimustes on kolhooside kommunaaltsoonides projekteeritavad erikoormused umbes $8-9 \frac{\text{VA}}{\text{m}}$. Kõige ökonoomsem on sel puhul kasutada ühefaasilist trafot võimsusega 10 kVA. Alajaamade võimsuse vähenemisel väheneb järsult metallikulu madalpingevõrkudele ning on võimalik kasutada alumiiniumjuhtmete asemel terasjuhtmeid. Töös näidatakse, et madalate erikoormuste puhul, nagu need esinevad põllumajanduses, on alajaamade võimsuste majanduslikult põhjendatud valik eriti oluline.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
13. XI 1957

EINWIRKUNG DER LEISTUNG DER ORTSNETZUMSPANNSTATIONEN AUF DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT DER STROMVERSORGUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT

G. Pobul

Zusammenfassung

Bei der Elektrifizierung der Landwirtschaft ist der Metallbedarf in den Niederspannungsnetzen besonders gross; deshalb ist dem rationellen Projektieren dieser Netze besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Beim Projektieren der Niederspannungsnetze sind Netzspannung und zulässiger Spannungsabfall im voraus gegeben, und als einziger den Metallbedarf und die Grösse der Investierung bestimmender Faktor bleibt die Leistung bzw. die Zahl der Ortsnetzspannstationen. Bei Veränderung der Zahl der Ortsnetzstationen verändern sich auch die Anteilkosten des Nieder- und Hochspannungsnetzes, sowie der Ortsnetzstationen selbst. Bei einer bestimmten Leistung der Ortsnetzstationen erreichen die Gesamtkosten den Mindestwert.

Der vorliegende Artikel enthält mathematische Gleichungen (17 und 18) zur Ermittlung wirtschaftlicher Leistung sowohl für Dreiphasen- als auch für Einphasen-Ortsnetzstationen. Dabei sind auch die Kosten des Hochspannungsnetzes in Betracht gezogen. Der leichteren Handhabung dient ein Nomogramm (Fig. 2), dass die rasche Ermittlung der wirtschaftlichen Leistung der Ortsnetzstationen sowohl beim 380/220 V als auch beim 2×220 V Energieverteilungssystem ermöglicht.

Im vorliegenden Artikel werden bestimmende Faktoren für den wirtschaftlichsten Wert der Leistung der Ortsnetzstationen analysiert. Einer der wichtigsten dieser Faktoren ist die Leistungsabnahme (pro m Länge) des Netzes. In den Verhältnissen der Estnischen SSR beträgt die Leistungsabnahme beim Entwurf der Netze in den Siedlungszonen

der Kolchosen etwa $8 \dots 9 \frac{\text{VA}}{\text{m}}$; es entspricht dieser Leistungsabnahme die wirtschaftliche

Leistung von 10 kVA für einphasige Ortsnetzstationen. Mit der Herabminderung der bisher gebräuchlichen zu hohen Leistungen der Ortsnetzstationen fällt der Metallbedarf in den Niederspannungsnetzen beträchtlich, und auch Stahlleitungen können nunmehr oft statt Aluminiumleitungen verwendet werden. Es zeigt sich, dass bei verhältnismässig geringen Belastungen, wie sie in der Landwirtschaft Regel sind, die wirtschaftliche Anpassung der Umspannerleistungen besonders wichtig ist.

Institut für Energetik
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR

Eingegangen
am 13 Nov. 1957