

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ЭЛТИ

  
А.П. Суржиков  
« 10 » декабря 2008 г.

**Г.З. Маркман**

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Энергосбережение и энергоэффективность»  
для магистрантов и дипломированных специалистов,  
обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 620.9:658.26(076.5)

ББК 31.19я73

М26

**Маркман Г.З.**

М26 Эффективность систем энергосбережения: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Энергосбережение и энергоэффективность» для магистрантов и дипломированных специалистов, обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика» / Г.З. Маркман. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 36 с.


ISBN 5-98298-344-6

УДК 620.9:658.26(076.5)

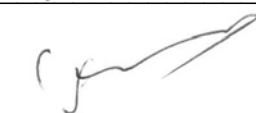
ББК 31.19я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электроэнергетических систем и высоковольтной техники ЭЛТИ  
« 03 » ноября 2007 г.

Зав. кафедрой ЭСВТ  
доктор технических наук

  
В.Я. Ушаков

Председатель учебно-методической  
комиссии

  
В.И. Готман

*Рецензент*

Доктор технических наук,  
заведующий кафедрой ЭСПП ТПУ

*Б.В. Лукутин*

ISBN 5-98298-344-6

© Маркман Г.З., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Экономия электрической энергии путем регулирования напряжения в центре питания разомкнутых сетей 35-220 кВ .....	4
1. Подготовка данных и порядок расчёта .....	4
2. Определение экономии электроэнергии при регулировании напряжения в центре питания.....	6
3. Задание к лабораторной работе № 1 .....	7
4. Содержание отчёта .....	7
5. Контрольные вопросы.....	7
Список литературы.....	8
Лабораторная работа № 2 Экономия электрической энергии путем компенсации реактивной мощности .....	8
1. Общие положения .....	8
2. Подготовка исходных данных.....	9
3. Порядок проведения лабораторной работы.....	11
4. Задание к лабораторной работе.....	11
5. Содержание отчёта .....	13
6. Контрольные вопросы.....	13
Лабораторная работа № 3 Экономия электрической энергии с помощью замены малозагруженных двигателей .....	14
1. Общие положения .....	14
2. Подготовка исходных данных.....	18
3. Порядок проведения лабораторной работы.....	19
4. Задание к лабораторной работе.....	20
5. Содержание отчета .....	20
6. Контрольные вопросы.....	21
Список литературы.....	21
Лабораторная работа № 4 Определение числовых характеристик показателя качества электроэнергии по отклонению напряжения с помощью гистограмм .....	22
1. Общие сведения.....	22
2. Подготовка исходных данных.....	24
3. Порядок выполнения работы .....	26
4. Содержание отчета .....	26
5. Контрольные вопросы.....	26
Литература .....	26
Лабораторная работа № 5. Определение показателей эффективности использования электрической энергии на промышленном предприятии .....	27
1. Общие положения .....	27
2. Исходные данные .....	27
3. Расчет показателей эффективности энергоиспользования на предприятии .....	30
3. Пример расчета.....	30
4. Порядок проведения работы .....	33
5. Содержание отчета .....	34
6. Контрольные вопросы.....	34
Список литературы.....	35

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕНТРЕ ПИТАНИЯ РАЗОМКНУТЫХ СЕТЕЙ 35-220 кВ

### Цель работы

Закрепление у учащихся теоретических знаний и выработка практических навыков использования мероприятий по экономии электрической энергии (ЭЭ) посредством регулирования напряжения в центрах питания (ЦП).

### Общие положения

В разомкнутом режиме эксплуатируется практически все сети 6–20 и 35 кВ и большая часть сетей 110 кВ. Центрами питания этих сетей является соответственно подстанции 500–35/6–20, 500-110/35 и 500-220/110 кВ. Одна из схем разомкнутой сети 220 кВ приведена на рис. 1. Массовость распределительных сетей приводит к тому, что в общих затратах на развитие и эксплуатацию электроэнергетических систем, затраты на сети 35 кВ составляют существенную долю. Требование снижения затрат является актуальной проблемой и находит отражение в постановке и решении проблемы регулирования напряжения.

При централизованном регулировании, т.е. когда оперативное управление режимом напряжения распределительной сети сосредотачивается в ЦП, такое регулирование влияет на режим напряжений всей присоединенной к ЦП сети.

### Схема исследования

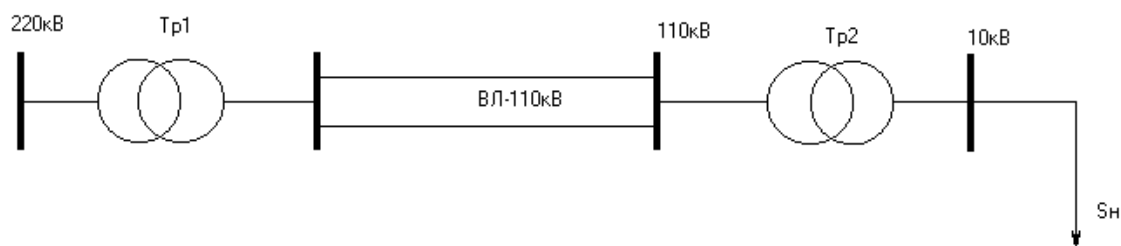


Рис. 1. Принципиальная схема электрической сети

## 1. Подготовка данных и порядок расчёта

1.1 На рис. 1 представлена схема электрической сети, состоящая из трансформатора Т-1 с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) в центре питания, двухцепной воздушной линии (ВЛ), двухтрансформаторной подстанции Т-2 и нагрузки  $S_H$ . Исходные данные для выполнения лабораторной работы помещены в табл. 1. Конкретный вариант выбирается по начальной букве фамилии.

В табл. 1 даны активные мощности нагрузки  $P_2$ , и напряжения ( $U_{ВН}, U_{НН}$ ) трансформаторов Т-2, значения длины линии  $L$ , коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi$ , время максимальных потерь  $\tau$  и число часов использования максимальной нагрузки.

Таблица 1

Исходные данные

№ п, п,	А, Б	В, Г, Д	Е, Ж, З	И, К	Л, М	Н, О, П	Р, С, Т	У, Ф, Х	Ц, Ч, Ш, Щ	Э, Ю, Я
$P_2$ , МВт	10	15	20	52	30	35	40	45	50	55
$U_{ВН}$	110	110	110	115	115	115	115	115	115	115
$U_{НН}$	6,6	6,6	10,5	10,5	6,3	6,3	10,5	10,5	10,5	6,3
$L$ , км	100	80	110	120	80	100	110	120	80	100
$\cos\varphi$	0,78	0,79	0,8	0,81	0,82	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
$\tau$ (час)	2405,3	3979,5	2886,2	3410,9	4591,8	2405,3	3195,8	4341,6	4591,8	2886,2
$T_{\max}$ (час)	4000	5500	4500	5000	6000	4000	4800	5800	6000	4500

1.2 По исходным данным выбирается марка провода, определяются расчётные данные  $X_0$ ;  $r_0$ ;  $b_0$  на один километр линии. По расчётным данным определяются параметры проводов:

$$\begin{aligned} R_L &= r_0 L / n, \\ X_L &= X_0 L / n, \\ B_L &= b_0 / 100, \\ \Delta Q_C &= (U_H)^2 b_0 L n, \end{aligned}$$

где  $n$ -количество цепей линий.

1.3 Определяем полную и реактивную мощность сети:

$$S_2 = P_2 + j(Q_2 - \Delta Q_C),$$

где  $Q_2 = P_2 \operatorname{tg} \varphi$ .

1.4. Потери активной мощности в линии:

$$\Delta P_{ВЛ} = \left( \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} \right) \cdot R_L.$$

1.5. По исходным данным выбираются количество трансформаторов.

1.6. Потери активной мощности в  $k$  параллельно работающих двухобмоточных трансформаторах ПС определяются следующим образом:

$$\Delta P_{TP} = \left( \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_H^2} \right) \cdot \frac{R_T}{K}$$

1.7. Суммарные потери энергии за год:

$$\Delta A_{\Sigma} = \left( \Delta P_{ВЛ} + \frac{\Delta P_{КЗ}}{K} \cdot \left( \frac{P_H^2 + Q_H^2}{S_H^2} \right) \right) \cdot \tau_M + \Delta P_{ХХ} \cdot K \cdot 8760$$

где  $\Delta P_{ХХ}$ ,  $\Delta P_{КЗ}$  – потери холостого хода и короткого замыкания;

1.8. Стоимость потерянной энергии за год:

$$C_{\Gamma} = \Delta A_{\Sigma} \cdot C,$$

где  $C$  – стоимость одного кВт·ч энергии.

По приведённой выше методике необходимо рассчитать потери мощности и энергии за год в системе, представленной на рис.1. Результаты расчёта показать преподавателю. На подготовку к лабораторной работе и на расчёт потерь мощности учащимися отводится 2 часа.

## 2. Определение экономии электроэнергии при регулировании напряжения в центре питания

На программном языке «Бейсик» описана методика определения потерь мощности и энергии за год. Следующие 2 часа лабораторной работы отводятся на проверку своих результатов по результатам расчёта на ЭВМ и выяснения степени изменения потерь мощности и ЭЭ от изменения напряжения в ЦП.

2.1. Исходные данные вводятся в оперативную память ПЭВМ в именованных единицах по списку:

1. Длина линии  $L$  (км).
2. Число цепей  $N_1$ .
3. Удельное активное сопротивление линии на 100 км  $R_1$  (Ом).
4. Удельное реактивное сопротивление линии на 100 км  $X_1$  (Ом).
5. Ёмкостная проводимость линии на 100 км  $B_0$  (См).
6. Мощность нагрузки  $P_2$  (МВт).
7. Коэффициент мощности  $\cos\varphi$ .
8. Мощность трансформаторов  $S_0$  (МВт).
9. Число трансформаторов  $N_0$ .
10. Потери х.х. трансформаторов  $\Delta P_{ХХ}$  (кВт).
11. Потери к.з. трансформаторов  $\Delta P_{КЗ}$  (кВт).
12. Активное сопротивление трансформаторов  $R_T$  (Ом).
13. Стоимость 1 кВт ч  $C$  (руб./кВт ч).
14. Напряжение сети  $U$  (кВ).
15. Напряжение нагрузки  $U_H$  (кВ).
16. Время максимальных потерь  $\tau$  (час).

2.2. Изменение напряжения в ЦП задаётся в пределах  $\pm 10\%$  от  $U_{ЦП}$  системы в количестве 4–5 шагов. Проводится ряд расчётов на ЭВМ и определяются потери мощности и ЭЭ системы. По результатам расчёта строится зависимость  $\Delta A_{\Sigma} = f(U_{ЦП})$ .

2.3. Построение зависимости коэффициента полезного действия электрической системы от изменения напряжения в ЦП.

Коэффициент полезного действия электрической системы рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\Sigma}} \cdot 100\%;$$

По результатам расчётов на ЭВМ для разных значений  $U_{ЦП}$  строится зависимость  $\eta = f(U_{ЦП})$ .

### 3. Задание к лабораторной работе № 1

3.1. По методике, представленной в разделе 2, рассчитать потери мощности и ЭЭ в электрической системе, рис. 1.

3.2. При изменении напряжения в ЦП рассчитать потери мощности и ЭЭ на ЭВМ, построить зависимость  $\Delta A_{\Sigma} = f(U_{ЦП})$ . Сравнить полученные результаты.

3.3. Построить зависимости коэффициента полезного действия электрической системы от изменения  $U_{ЦП}$ .

### 4. Содержание отчёта

4.1. Описать метод расчёта потерь ЭЭ и сетях.

4.2. Представить результаты расчёта потерь ЭЭ в системе при  $U_{ЦП} = U_n$ .

4.3. Построить зависимость  $\Delta A_{\Sigma} = f(U_{ЦП})$ .

4.4. Указать стоимость потерянной ЭЭ за год.

4.5. Построить зависимость  $\eta = f(U_{ЦП})$ .

### 5. Контрольные вопросы

1. Перечислите виды потерь в энергетических системах.
2. Перечислите виды мероприятий по снижению потерь ЭЭ.
3. Назовите критерий разделения мероприятий по снижению потерь электроэнергии.
4. Перечислить мероприятия по снижению потерь электроэнергии, которые относятся к организационным.
5. Перечислить мероприятия по снижению потерь электроэнергии, которые относятся к техническим.

6. Что понимается под коммерческими потерями?
7. Посредством каких устройств возможно регулирование напряжения в ЦП?

### **Список литературы**

1. Веников В.А., Глазунов А.А. и др. Электрические системы. Электрические сети: учеб. для электроэн. спец. вузов. – 2-е изд., переб. и доп. / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

#### **Цель работы**

Анализ размещения мощности компенсирующих устройств на снижение потерь электрической энергии в электрической сети.

#### **1. Общие положения**

Установка компенсирующих устройств (КУ) относится к техническим мероприятиям по экономии электроэнергии. Выбор оптимальной мощности и мест установки КУ в электрических сетях связан с нахождением такого решения, при котором достигается наибольший экономический эффект при соблюдении всех технических условий нормальной работы электрических сетей и электроприемников.

Для энергосистем, имеющих дефицит или избыток реактивной мощности, компенсирующие устройства рассматриваются как средства регулирования напряжения. Однако, даже при удовлетворительных уровнях напряжения, установка компенсирующих устройств может оказаться целесообразной, так как они снижают потери мощности в сети. При наличии дефицита реактивной мощности в электрической сети наиболее эффективной является установка батарей конденсаторов (БК), а не синхронных компенсаторов, поскольку потери мощности в синхронных компенсаторах (СК) составляют до 2 % номинальной и даже выше. Поэтому установка СК как средство снижения потерь менее эффективна.



## 2. Подготовка исходных данных

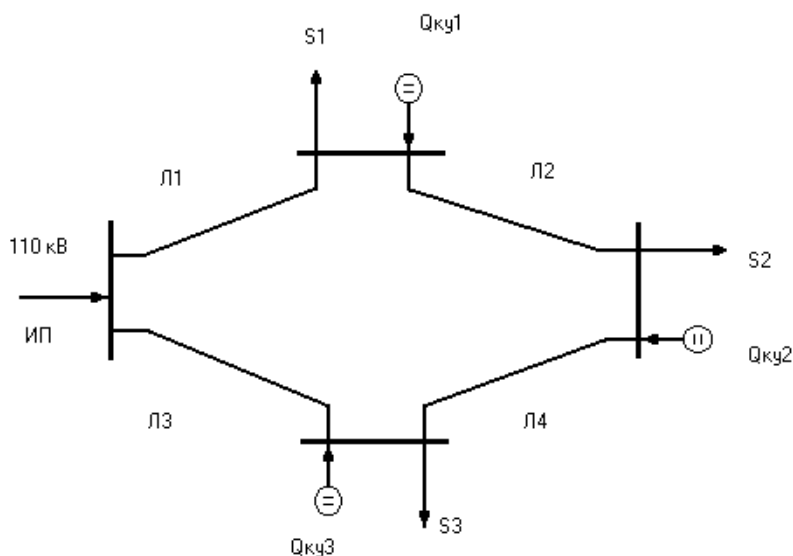


Рис. 1. Схема исследуемой замкнутой электрической сети

2.1. На рис. 1 представлена замкнутая электрическая система, состоящая из центра питания (ЦП), трех узлов нагрузки, обозначенных на схеме цифрами 1, 2, 3 с комплексными нагрузками  $S_1, S_2, S_3$ , и компенсирующими устройствами в виде (БК). Узлы нагрузки соединены четырьмя одноцепными ЛЭП.

Исходные данные для выполнения лабораторной работы помещены в трех таблицах – № 1, 2, 3. Конкретный вариант выбирается по трем первым буквам – фамилии, имени, отчества.

Таблица 1

### Исходные данные

№ п.п	А, Б	В, Г, Д	Е, Ж, З	И, К	Л, М	Н, О, П	Р, С, Т	У, Ф, Х	Ц, Ч, Ш, Щ	Э, Ю, Я
$P_1$ , МВт	20	22	24	26	28	20	22	23	20	21
$P_2$ , МВт	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_3$ , МВт	15	17	19	21	23	25	20	22	24	26
$T_{\max}$ , час	4500	5000	6000	5500	4000	4800	4500	5500	6000	5800

Таблица 2

### Исходные данные

№ п.п	А, Б	В, Г, Д	Е, Ж, З	И, К	Л, М	Н, О, П	Р, С, Т	У, Ф, Х	Ц, Ч, Ш, Щ	Э, Ю, Я
$\cos \varphi_1$	0,77	0,78	0,79	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,86	0,86
$\cos \varphi_2$	0,81	0,7	0,81	0,72	0,819	0,67	0,72	0,74	0,83	0,83
$\cos \varphi_3$	0,73	0,73	0,74	0,74	0,75	0,71	0,76	0,76	0,77	0,77

Таблица 3

## Исходные данные

№ п.п	А, Б	В, Г, Д	Е, Ж, З	И, К	Л, М	Н, О, П	Р, С, Т	У, Ф, Х	Ц, Ч, Ш, Щ	Э, Ю, Я
$L_1$	20	25	17	14	25	20	18	16	15	20
$L_2$	19	18	16	10	12	20	15	10	14	10
$L_3$	35	38	35	31	28	24	33	32	40	25
$L_4$	25	30	30	26	25	20	20	30	21	22

В первой таблице даны активные мощности узлов нагрузок ( $P_1, P_2, P_3$ ) и время часов использования максимальной нагрузки  $T_{MAX}$ . Во второй – коэффициенты мощности этих узлов ( $\cos \phi_1, \cos \phi_2, \cos \phi_3$ ) и коэффициент мощности в ЦП –  $\cos \phi_{ЦП}$ . В третьей – длины линий ЛЭП ( $L_1, L_2, L_3, L_4$ ).

Напряжение центра питания составляет  $U_{ЦП} - 110$  кВ.

2.2. По исходным данным рассчитывается реактивная мощность нагрузок ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ), рассчитываются перетоки мощности в линиях, выбираются сечения провода линий и проводятся все необходимые проверки выбранных сечений. По расчетным данным определяются значения параметров проводов  $R_l$  и  $X_l$ .

Для выбора сечений проводов в замкнутой электрической сети необходимо предварительно определить приближенное потокораспределение мощностей. Расчет потокораспределения проводится по правилу «моментов». Вместо сопротивлений участков сети в формуле «моментов» в данном случае допускается использовать длину участков линий электропередачи. Поэтому потокораспределение, найденное таким образом и без учета потерь мощности, является приближенным. В результате расчета определяются потоки мощности и токи на участках сети.

2.3. Выбор оптимальной мощности конденсаторной батареи проводится по критерию минимума активных потерь в системе. Для этого в каждом узле нагрузки установлены конденсаторные батареи. Для удобства расчета на ЭВМ факт включения БК в конкретном узле задается коэффициентом включения –  $kQ_n$ . Данный коэффициент в относительных единицах показывает долю от суммарной мощности КУ  $Q_{\Sigma KV}$ , установленной в каждом конкретном узле:

$$kQ_n = \frac{Q_{KVn}}{Q_{\Sigma KV}}, (kQ_1 + kQ_2 + kQ_3 = 1).$$

Изменяя величину мощности БК в каждом узле нагрузки можно по минимуму активных потерь, определить оптимальную мощность конденсаторной батареи.

2.4. При выборе мест размещения компенсирующих устройств следует иметь в виду, что приближение источника реактивной мощности к потребителям снижает перетоки мощности по сети и снижает потери активной мощности и электроэнергии, чем повышается экономичность решения.

2.5. Выбрать лучшее распределение и место расположения БК. Критерием определения оптимальной мощности и мест установки БК считать минимум активных потерь мощности в системе.

### 3. Порядок проведения лабораторной работы

3.1. Исходные данные вводятся в оперативную память в именованных единицах по списку:

1. Активная мощность нагрузок –  $P_1, P_2, P_3$  (МВт).
2. Реактивная мощность нагрузок –  $Q_1, Q_2, Q_3$  (МВар).
3. Активных сопротивлений линий –  $R_1, R_2, R_3, R_4$  (Ом).
4. Индуктивные сопротивления линий –  $X_1, X_2, X_3, X_4$  (Ом).
5. Коэффициент доли компенсирующей мощности, установленной в конкретном узле системы –  $kQ_1; kQ_2; kQ_3$ .
6. Напряжение системы –  $U$  (кВ).
7. Суммарная мощность компенсирующих устройств –  $Q_{\Sigma KV}$  (МВар).

3.2. Произвольно изменяя величины  $kQ_n$  строятся зависимости суммарных активных потерь, используя величину оптимальной мощности  $Q_{\Sigma KV}$ . Причем сумма коэффициентов равна единице  $kQ_1+kQ_2+kQ_3=1$ .

3.3. Выбирают оптимальную компенсирующую мощность  $Q_{ку}$  и лучшее размещение БК в узлах нагрузки.

### 4. Задание к лабораторной работе

4.1. По заданным значениям активной мощности и коэффициентам мощности определяют потребляемую реактивную мощность нагрузок.

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg}(\arccos \varphi_1);$$

$$Q_2 = P_2 \operatorname{tg}(\arccos \varphi_2);$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg}(\arccos \varphi_3).$$

4.2. Определяют перетоки мощности в линиях  $L_1, L_2, L_3, L_4$  по правилу «моментов»:

$$S_{L1} = \frac{S_1(L_2 + L_3 + L_4) + S_2(L_4 + L_3) + S_3 \cdot L_3}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4},$$

$$S_{L3} = \frac{S_3(L_2 + L_1 + L_4) + S_2(L_2 + L_1) + S_1 \cdot L_1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}.$$

Проверка:

$$\begin{aligned} S_{Л1} + S_{Л3} &= S_{Н1} + S_{Н2} + S_{Н3} \\ S_{Л2} &= S_{Л1} - S_{Н1}; \\ S_{Л4} &= S_{Л3} - S_{Н3}. \end{aligned}$$

4.3. Выбирают марку провода линий, определяют величины активных и реактивных сопротивлений линий,

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{S_{Л1}}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot n}; \quad I_2 = \frac{S_{Л2}}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot n}; \quad I_3 = \frac{S_{Л3}}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot n}; \quad I_4 = \frac{S_{Л4}}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot n}; \\ R_K &= \frac{R_0 \cdot L}{n}, \quad X_L = \frac{X_0 \cdot L}{n}, \quad Q_C = q_0 \cdot L \cdot U_{НОМ}^2 \cdot n, \end{aligned}$$

где  $n$  – число цепей линий электропередачи.

**Примечание:**  $\Sigma Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} + Q_{C4}$ .

4.4. Рассчитывают на ЭВМ зависимость суммарных потерь активной мощности в зависимости от изменения мощности БК. Определяют оптимальную величину мощности БК при  $kQ_2 = 1, kQ_1 = kQ_3 = 0$ . Сравнить эту зависимость с потерями при  $Q_{кв} = 0$ .

$$\begin{aligned} \Delta S_{Л} &= \left( \frac{|S_{Л}|}{U_{НОМ}} \right)^2 \cdot \left( \frac{R + jX}{n} \right) = \Delta P_n + jQ_n \\ \Sigma \Delta P &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4; \\ \Sigma P_{НОМ} &= P_1 + P_2 + P_3; \\ P_{ВЫР} &= \Sigma \Delta P + \Sigma P_{НОМ}; \\ Q_{ВЫР} &= P_{ВЫР} \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi); \\ Q_{кв} &= Q_{ВЫР} - \Sigma Q_H - \Sigma \Delta Q + \Sigma Q_C; \\ K_1 &= \frac{Q_{H1}}{\Sigma Q_H}; \quad K_2 = \frac{Q_{H2}}{\Sigma Q_H}; \quad K_3 = \frac{Q_{H3}}{\Sigma Q_H}; \end{aligned}$$

Проверка:

$$K_1 + K_2 + K_3 = 1.$$

4.5. Выбрать лучшее распределение и место расположения БК. Критерием определения оптимальной мощности и мест установки БК считать минимум активных потерь мощности в системе.

$$\begin{aligned} Q_{кв1} &= Q_{к\sigma} \cdot K_{Q1\min}; \\ Q_{кв2} &= Q_{к\sigma} \cdot K_{Q2\min}; \\ Q_{кв3} &= Q_{к\sigma} \cdot K_{Q3\min}. \end{aligned}$$

## 5. Содержание отчёта

- 5.1. Представить рисунок схемы сети.
- 5.2. Результаты расчетов перетоков мощностей, активных и реактивных сопротивлений линий разместить в таблице.
- 5.3. Результаты расчётов вычислений на ЭВМ представить в табл. 4.

Таблица 4

*Результаты расчета потерь мощности*

№ п.п	$\Delta P_{\Sigma}$	KQ <sub>1</sub>	KQ <sub>2</sub>	KQ <sub>3</sub>
1				
...				
10				

## 6. Контрольные вопросы

- 6.1. Перечислите компенсирующие устройства (КУ), применяемые в энергетике.
- 6.2. Поясните физический смысл экономии электроэнергии при компенсации реактивной мощности.
- 6.3. Поясните разницу между продольной компенсацией линий ЛЭП и поперечной компенсацией.
- 6.4. Перечислите цели, для которых применяется компенсация реактивной мощности.
- 6.5. Как составляется баланс реактивной мощности системы.

### Список литературы

1. Веников В.А., Глазунов А.А. и др. Электрические системы. Электрические сети: учеб. для электроэн. спец. вузов. – 2-е изд., переб. и доп. / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ЗАМЕНЫ МАЛОЗАГРУЖЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### Цель работы

Исследование условий замены малозагруженных двигателей на двигатели меньшей мощности, как мероприятия по экономии электроэнергии на промышленных предприятиях.

### 1. Общие положения

1.1. Для современных промышленных предприятий характерно широкое применение асинхронных двигателей. В основных цехах большинства производств удельный вес асинхронных двигателей достигает 80 %.

Асинхронные двигатели потребляют реактивный ток, составляющий около 20–40 % от номинального тока, поэтому, чем сильнее загружен двигатель и чем больше рабочий ток, потребляемый им, тем выше коэффициент мощности и КПД [1, 4]. Зависимость КПД ( $\eta$ ) асинхронного двигателя от фазового сдвига между током и напряжением и от нагрузки  $P_H$  представлена на рис. 1.

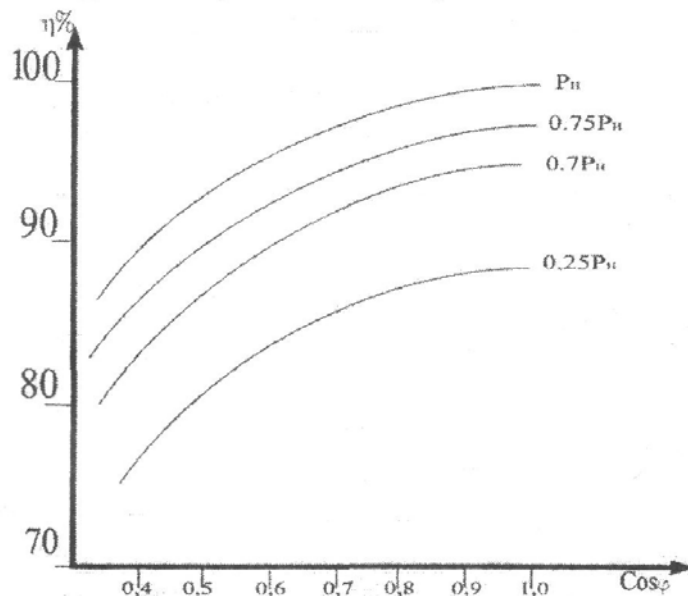


Рис. 1. Зависимость КПД асинхронного двигателя от фазового сдвига между током и напряжением и от нагрузки

Если средняя нагрузка двигателя составляет менее 45 % от его номинальной мощности, то замена этого двигателя менее мощным всегда

целесообразна. При загрузке двигателя более 70 % от его номинальной мощности замена, как правило, нецелесообразна. При нагрузке двигателя в пределах 45–70 % номинальной мощности, необходимость его замены двигателем меньшей мощности проверяют расчетом [2].

Замена целесообразна, если суммарные потери в двигателе, найденные по формуле (1) уменьшаются:

$$\Delta P_{ДВ} = \Delta P_X + K_H^2 \Delta P_{А,Н} + K_{И,П} \left[ Q_X (1 - K_H^2) + K_H^2 Q_{НОМ} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta P_X$  – потери активной мощности при холостом ходе двигателя;  $K_H^2 = P_H / P_{НОМ}$  – коэффициент нагрузки двигателя ( $P_H$  – средняя нагрузка двигателя,  $P_{НОМ}$  – номинальная мощность двигателя);  $\Delta P_{А,Н}$  – номинальные нагрузочные потери активной мощности в двигателе;  $K_{И,П} = 0,15$  кВт/квар – коэффициент изменения потерь (выбран для  $U_{НОМ} = 0,4$  кВ);  $Q_X$  – реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети при холостом ходе;  $Q_{НОМ} = (P_{НОМ} / \eta_{ДВ}) \operatorname{tg} \varphi_{НОМ}$  – реактивная мощность двигателя при номинальной нагрузке ( $\eta_{ДВ}$  – КПД двигателя при номинальной нагрузке,  $\operatorname{tg} \varphi_{НОМ}$  – коэффициент реактивной мощности двигателя).

Согласно формуле (1) для асинхронного двигателя характерны следующие виды потерь активной и реактивной мощности:

1) потери активной мощности холостого хода, определяемые по (2):

$$\Delta P_X = \frac{\Delta P - K_H^2 P_{НОМ}}{1 - K_H^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta P = \left[ \frac{K_H^2 P_{НОМ} / \eta_{ДВ} - K_H P_{НОМ}}{1 - K_H^2} \right]$  – потери активной мощности в

асинхронном двигателе при данном  $K_H$ ;  $\Delta P_{НОМ} = \left[ \frac{P_{НОМ}}{\eta_{ДВ}} - P_{НОМ} \right]$  – номинальные потери активной мощности в асинхронном двигателе.

2) потери реактивной мощности холостого хода, определяемые по (3):

$$\Delta Q_X = \frac{(Q - K_H^2 Q_{НОМ})}{1 - K_H^2}, \quad (3)$$

где  $Q = \frac{K_H P_{НОМ} \operatorname{tg} \varphi_{НОМ}}{\eta_{НОМ}}$  – реактивная мощность асинхронного двигателя при частичной нагрузке, при заданном коэффициенте нагрузки  $K_H$ ,

$\eta$  и  $\operatorname{tg}\varphi_{НОМ}$  – соответственно КПД и коэффициент реактивной мощности при данном  $K_H$ .

3) номинальные нагрузочные потери активной мощности, определяемые по (4):

$$\Delta P_{A,H} = \Delta P_{НОМ} - \Delta P_X. \quad (4)$$

Для реализации расчета необходимо иметь зависимости: КПД ( $\eta_{ДВ}$ ) и коэффициента мощности ( $\operatorname{Cos}\varphi_{ДВ}$ ) асинхронных двигателей от коэффициента нагрузки ( $K_H$ ). Требуемые зависимости представлены на рис. 2 и справедливы для номинальных мощностей асинхронных двигателей в диапазоне  $P_{НОМ} = 100\text{--}250$  кВт.

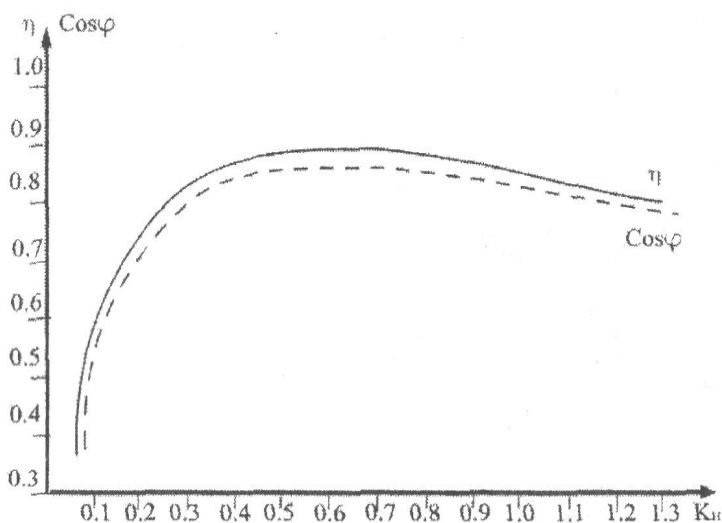


Рис. 2. Зависимости: КПД и коэффициента мощности асинхронных двигателей от коэффициента нагрузки

### 1.2. Оценка статической устойчивости нагрузки.

Для оценки статической устойчивости нагрузки необходимо иметь две механические характеристики: механическую характеристику асинхронного двигателя и механическую характеристику нагрузки. При этом анализ проводится на статическую устойчивость –  $M_{НАГР} < M_{МАКС}$  и на возможность пуска двигателя  $M_{НАГР} < M_{ПУСК}$  [1].

Механическую характеристику асинхронного двигателя рассчитывают по формуле Клосса (5):

$$\frac{M_{ЭМ}}{M_{МАКС}} \cong \frac{2}{\frac{S}{S_{КР}} + \frac{S_{КР}}{S}}, \quad (5)$$

где  $M_{ЭМ}$  – электромагнитный момент;  $M_{МАКС}$  – максимальный электромагнитный момент ( $M_{МАКС} = M_{ЭМ}$  при  $S = S_{КР}$ );  $S$  – скольжение;  $S_{КР}$  – критическое скольжение (скольжение, при котором  $M_{ЭМ}$  имеет максимальное значение).



Механическую характеристику асинхронного двигателя строят по трем характерным точкам:

1 точка – при  $S = 1$ ,  $M_{ЭМ} = M_{ПУСК}$  (пусковой момент);

2 точка – при  $S = S_{НОМ}$ ,  $M_{ЭМ} = M_{НАГР}$  (номинальный момент);

3 точка – при  $S = S_{КР}$ ,  $M_{ЭМ} = M_{МАКС}$  (критический момент). Моменты пусковой, номинальный и максимальный определяются по формулам (6–8) соответственно:

$$M_{ПУСК} = M_{ПУСК} \cdot (1 - S_{КР}) + \frac{2M_{МАКС}S_{КР}^2}{1 - S_{КР}^2}; \quad (6)$$

$$M_{НОМ} = \frac{2M_{МАКС} \cdot S_{НОМ} S_{КР}}{S_{НОМ}^2 + S_{КР}^2}; \quad (7)$$

$$M_{МАКС} = \frac{2M_{МАКС} \cdot S_{КР}}{\frac{S_{КР}}{S_{КР}} + \frac{S_{КР}}{S_{КР}}} = \frac{2M_{МАКС} \cdot S_{КР}}{2} = M_{МАКС}. \quad (8)$$

Значения  $M_{ПУСК}$  и  $M_{МАКС}$  в формулах (6-8) представляют собой кратность пускового и максимального момента к номинальному моменту ( $M_{НОМ}$ ) в относительных единицах, являются каталожными значениями и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры асинхронных двигателей

Марка двигателя	$\frac{M_{МАКС}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{ПУСК}}{M_{НОМ}}$	$P_{НОМ}$ , кВт	$S_{НОМ}$ , %	$S_{КР}$ , %	$U_n$ , В	$N$ , Об. в мин	$\eta_n$ , %	$\cos\phi_{НОМ}$
4А355 S2У3	1,9	1,0	250	1,9	7,0	380	2970	92,5	0,9
4А315 M2У3	1,9	1,2	200	1,9	9,0	380	2970	92,5	0,9
4А315 S2У3	1,9	1,2	160	1,9	8,5	380	2970	92	0,9
4А280 M2У3	2,2	1,2	132	2,0	8,5	380	2970	91,5	0,89
4А280 S2У3	2,2	1,2	ПО	2,0	8,5	380	2970	91	0,89

Механическая характеристика нагрузки для упрощения принимается постоянной  $M_{НАГР} = const$ .

Величина момента нагрузки равна номинальному моменту двигателя и находится по формуле (9):

$$M_{НАГР} = M_{НОМ} = P_{НОМ} / \omega = P_{НОМ} / 314, \quad (9)$$

где  $M_{НОМ}$  – номинальный момент асинхронного двигателя;  $P_{НОМ}$  – номинальная мощность двигателя;  $\omega$  – угловая частота вращения статора ( $\omega = 2\pi f = 314$  1/с для двухполюсных асинхронных двигателей).

Статическая устойчивость нагрузки оценивается коэффициентом запаса статической устойчивости (10):

$$K_3 = \frac{M_{МАКС} - M_{НАГР}}{M_{МАКС}} 100\% . \quad (10)$$

Не рекомендуется работа двигателей с  $K_3 < 30\%$ . Следовательно, замена малозагруженных двигателей целесообразна только при условии, что коэффициент запаса статической устойчивости у нового двигателя превышает 30%. Проверка возможности пуска асинхронного двигателя проводится по анализу механической характеристики асинхронного двигателя. Пусковой момент асинхронного двигателя должен превышать или быть равным моменту нагрузки  $M_{ПУСК} \geq M_{НАГР}$ . Если асинхронный двигатель имеет фазный ротор, то введением в роторную обмотку добавочных сопротивлений можно добиться увеличения пускового момента максимального  $M_{ПУСК} = M_{МАКС}$ . Это техническое решение широко применяется в практике во время процесса пуска асинхронных двигателей под нагрузкой. Следовательно, при наличии асинхронного двигателя с фазным ротором и соответствующей коммутирующей аппаратуры критерий  $M_{ПУСК} \geq M_{НАГР}$  меняется на  $M_{МАКС} > M_{НАГР}$ .

Анализируя суммарные потери асинхронного двигателя и его механические характеристики, при известном  $K_H$ , можно судить о целесообразности замены малозагруженного двигателя на двигатель меньшей мощности.

## 2. Подготовка исходных данных

2.1. Рассмотрите схему электрической сети (рис. 3). Схема состоит из двухцепной воздушной линии электропередач ЛЭ, трансформатора Т и асинхронного двигателя АД. Исходные данные для выполнения лабораторной работы представлены в табл. 1, 2.

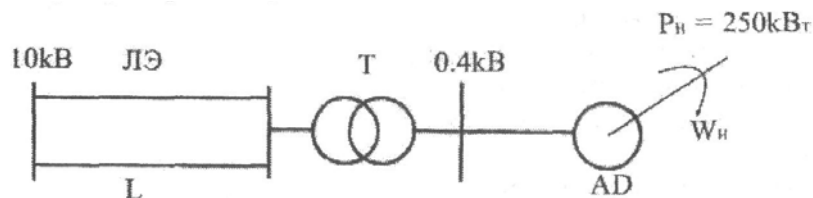


Рис. 3. Схема электрической сети

Мощность нагрузки составляет 250 кВт для коэффициента нагрузки  $K_H = 100\%$ .

В табл. 1 представлены параметры асинхронных двигателей (двигатели остаются одинаковыми для всех вариантов). В табл. 2 представлены параметры системы – длина линии  $L$ , коэффициент мощности  $\cos\phi$ , коэффициент нагрузки  $K_H$  для разных вариантов. Вариант выбирается по первой букве фамилии.

Таблица 2

*Исходные данные*

№ п/п	А, Б	В, Г, Д	Е, Ж, З	И, К	Л, М, Н	О, П	Р, С, Т	У, Ф, Х	Ц, Ч, Ш, Щ	Э, Ю, Я
$L, \text{км}$	30	25	20	18	15	12	10	8	6	2
$\cos\phi$	0,92	0,9	0,87	0,85	0,83	0,8	0,79	0,78	0,76	0,75
$K_H, \%$	40	45	60	70	65	60	55	50	50	50

По исходным данным проведут расчеты по выбору типа и параметров трансформатора и параметров воздушной линии электропередач [3]. Расчеты проводятся при  $K_H = 100 \%$ . Мощность нагрузки для выбранного варианта вычисляется в долях от базовой мощности с учетом коэффициента нагрузки, приведенного в табл. 2.

### 3. Порядок проведения лабораторной работы

3.1. Исходные данные вводятся в оперативную память ПЭВМ по списку:

1. Мощность нагрузки .....  $P_H$  (кВт)
2. Длина линии .....  $L$  (км)
3. Количество цепей линии .....  $N$
4. Номинальное напряжение линии .....  $U$
5. Номинальное напряжение двигателя .....  $U_D$
6. Номинальный коэффициент мощности .....  $C$
7. Удельное активное сопротивление линии .....  $R_0$
8. Количество трансформаторов .....  $N_2$
9. Номинальная мощность трансформаторов .....  $S_2$
10. Активное сопротивление трансформатора .....  $R_1$
11. Потери активной мощности на холостой ход трансформатора .....  $P_2$
12. Количество двигателей .....  $N_D$
13. Номинальная мощность двигателя .....  $P_D$
14. Номинальный КПД двигателя .....  $KN$
15. Номинальный коэффициент мощности двигателя .....  $EN$
16. К.п.д. двигателя для текущего коэффициента нагрузки .....  $KT$
17. Коэффициент мощности для текущего коэффициента нагрузки .....  $ET$

18. Кратность максимального момента двигателя .....	$M$
19. Кратность пускового момента двигателя .....	$M_4$
20. Номинальное скольжение двигателя .....	$SN_0$
21. Критическое скольжение двигателя .....	$SK$

**Примечание.** Для того, чтобы определить КПД для текущего коэффициента нагрузки двигателя и коэффициент мощности двигателя для текущего коэффициента нагрузки используйте рис. 2. По рис. 2 на оси абсцисс находят выданное ПЭВМ значение текущего коэффициента нагрузки, поднимаются вверх от этого значения до пересечения с кривыми КПД ( $\eta$ ) и коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ), затем на оси ординат фиксируют численные значения этих величин.

#### 4. Задание к лабораторной работе

4.1. Введите исходные данные п.п. 1–6 в память ЭВМ и выберите сечение и удельные параметры провода воздушной линии электропередач из стандартного ряда сечений [3]. Введите исходные данные п.п. 7 и 8.

4.2. Выберите тип и параметры трансформаторов по справочным данным [3] и введите исходные данные по запросу п.п. 9–15.

4.3. Спишите результаты расчета: потери активной мощности в воздушной линии электропередач ( $P_3$ ); потери активной мощности в трансформаторе ( $P_4$ ). Постройте зависимости потерь  $P_3$  и  $P_4$  от изменения мощности нагрузки:  $P_3 = f(Z)$  и  $P_4 = f(Z)$ .

4.4. Введите исходные данные п.п. 16, 17 в память ЭВМ (см. примечание к п. 3.1.).

4.5. Спишите результаты расчетов по потерям активной мощности в двигателе ( $P_5$ ) и постройте зависимость потерь мощности в двигателе от коэффициента нагрузки  $P_5 = f(K_H)$ .

4.6. Введите исходные данные п.п. 18–21 в память ЭВМ.

4.7. Спишите результаты расчетов моментов и постройте механические характеристики  $M = f(S)$ .

**Примечание.** Расчеты на ЭВМ для каждого типа двигателя производятся отдельно.

#### 5. Содержание отчета

5.1. Приведите схему электрической сети, исходные данные и промежуточные расчеты по выбору параметров воздушной линии электропередач и трансформаторов.

5.2. Приведите зависимости  $P_3 = f(Z)$ ,  $P_4 = f(Z)$ ,  $P_5 = f(K_H)$ .

5.3. Приведите механические характеристики исследуемых асинхронных двигателей.

5.4. В письменном виде приведите анализ зависимостей и обоснуйте целесообразность мероприятий по замене асинхронного двигателя на двигатель меньшей мощности с учетом статической устойчивости нагрузки и вопросов пуска двигателя.

## **6. Контрольные вопросы**

- 6.1. Что такое статическая устойчивость нагрузки?
- 6.2. Что такое момент пуска асинхронного двигателя?
- 6.3. Каким образом соотносится мощность асинхронного двигателя со статической устойчивостью и пуском? Поясните по механическим характеристикам двигателя.
- 6.4. На примере результатов лабораторной работы оцените потери мощности в линии, трансформаторе, асинхронном двигателе.

## **Список литературы**

1. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ОТКЛОНЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГИСТОГРАММ

### Цель работы

Изучить методику расчета числовых характеристик установившихся отклонений напряжения и производить оценку показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

### 1. Общие сведения

Установившееся отклонение напряжения является одним из важнейших показателей электрической энергии (ПКЭ), регламентируемых ГОСТ 13109-97 на качество электрической энергии и может быть определено по выражению:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $U_y$  – значение напряжения в момент наблюдения в вольтах, киловольтах;  $U_{НОМ}$  – номинальное значение напряжения в вольтах, киловольтах ГОСТ 13109-97 регламентирует для данного ПКЭ нормально допустимый диапазон равный  $\pm 5\%$  от номинального напряжения и предельно допустимый диапазон равный  $\pm 10\%$ .

Установившееся отклонение напряжения отвечает требованиям ГОСТ 13109-97 в том случае, если за весь период (не менее 24 часов) среднее значение данного ПКЭ не выходит за предельно допустимые пределы и 95 % времени ПКЭ не выходит за нормально допустимые пределы.

Величина  $\delta U_y$  зависит от большого количества случайных факторов, и поэтому является случайной величиной. Для анализа  $\delta U_y$  целесообразно применять вероятностно-статистические методы. Наиболее полной вероятностной характеристикой случайной величины является закон распределения вероятностей, по которому устанавливается связь между случайной величиной и вероятностью ее появления. Для непрерывных случайных величин в качестве закона распределения используется плотность распределения вероятностей, а для дискретных случайных величин – вариационный ряд распределения вероятностей или гистограмма. ГОСТ 13109-97 устанавливает для каждого измерения  $\delta U_y$

интервал усреднения равный 60 сек. Это позволяет рассчитывать вероятностные числовые характеристики установившегося отклонения напряжения с помощью гистограмм.

Для получения гистограммы  $\delta U_v$  необходимо весь возможный диапазон изменения данной случайной величины разбить на несколько интервалов или разрядов (обычно на 6–12 разрядов). В каждом разряде необходимо иметь регистратор случаев появления  $\delta U_v$  в пределах разряда. Тогда в результате цикла измерений в каждом регистре будет накоплена вероятность появления соответствующих отклонений напряжений и может быть построена гистограмма, графическое изображение которой приведено на рис. 1.

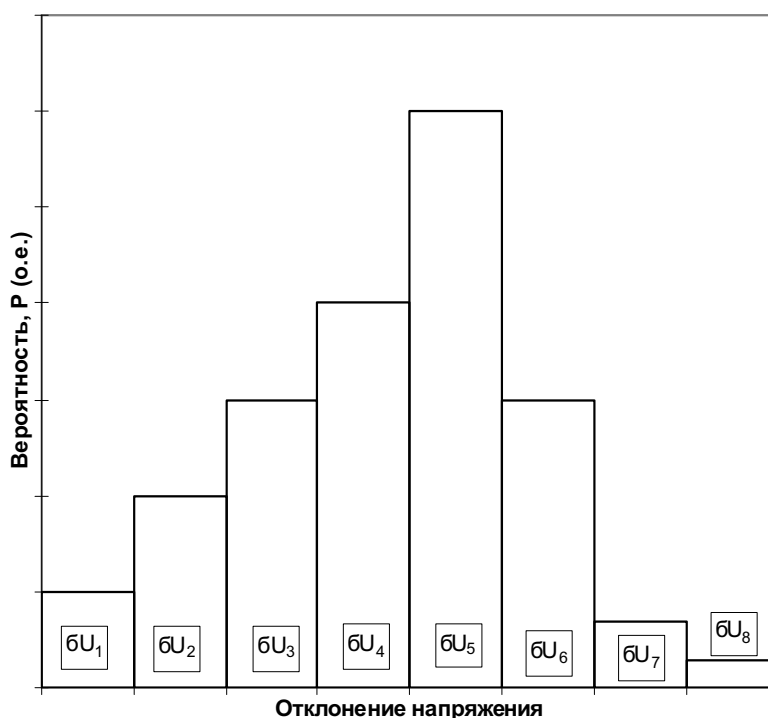


Рис. 1. Гистограмма отклонений напряжения

Обычно каждому разряду присваивают наименование по середине разряда  $\overline{\delta U_1}$ ,  $\overline{\delta U_2}$  .....  $\overline{\delta U_k}$ .

Зная гистограмму  $\delta U_v$ , можно определить и вероятностные числовые характеристики:

1. Вероятность появления  $\delta U_v$  в  $i$ -ом разряде

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (2)$$

где  $i$ ,  $m$  – номер и количество разрядов соответственно;  $n_i$  – количество отсчетов в  $i$ -м регистре.

2. Математическое ожидание  $\delta U_y$ :

$$M(\delta U_y) = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \overline{\delta U_i} (\%), \quad (3)$$

где  $\overline{\delta U_i}$  – среднее значение  $\delta U_y$  в  $i$ -ом разряде.

3. Неодинаковость напряжения:

$$N = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \overline{(\delta U_i)^2} (\%)^2. \quad (4)$$

4. Дисперсия  $\delta U_y$ :

$$D(\delta U_y) = N - [M(\delta U_y)]^2 (\%)^2. \quad (5)$$

5. Среднеквадратичное отклонение  $\delta U_y$ :

$$\sigma(\delta U_y) = \sqrt{D(\delta U_y)} (\%). \quad (6)$$

Для получения гистограмм  $\delta U_y$  могут быть использованы различные регистрирующие приборы, одним из которых является статический анализатор качества напряжения САКН-1. Данный прибор регистрирует в виде отсчетов электромеханических счетчиков числа случаев попадания отклонений напряжения в каждый из 8 разрядов при периодическом включении счетчиков, каждый из которых соответствует своему уровню измерения. Уровни измерения, представляющие собой границы разрядов гистограммы, устанавливаются с помощью калиброванной матрицы штекерных контактов. Прибор работает таким образом, что всегда срабатывает тот счетчик, который соответствует уровню отклонения напряжения в момент измерения. Калиброванная матрица штекерных контактов рассчитана на диапазон отклонений напряжения  $\pm 15\%$  от уровня напряжения, соответствующему времени начала измерений. Начальный уровень отклонений напряжения устанавливается перед началом измерений переключателем «сдвиг», имеющим диапазон регулирования от  $-10$  до  $+10$  процентов с интервалом переключения  $2,5\%$ . Данный переключатель сдвигает гистограмму  $\delta U_y$  в область положительных или отрицательных отклонений напряжения от нулевого значения.

## 2. Подготовка исходных данных

В табл. 1 и 2 представлены показания счетчиков при работе прибора САКН-1 для начала и окончания измерений соответственно, которые являются исходными данными для выполнения лабораторной работы. Вариант выбирается по первым буквам фамилии.



Таблица 1

*Показания прибора САКН-1 перед началом измерения*

Вариант	АБВ	ГДЕ	ЖЗИ	КЛМ	НОП	РСТ	УФХ	ЦЧ	ШЩ	ЭЮЯ	
Дата начала измерений	11.5.07	5.4.07	3.11.07	5.1.07	7.6.07	3.2.07	11.2.07	1.9.07	3.10.07	4.3.07	
Время начала измерений	15,00	13,00	9,00	11,00	14,00	7,00	10,00	18,00	20,00	17,00	
Показания счетчиков	1	2140	6349	3420	5810	4915	6115	5515	3157	9610	0724
	2	1380	7210	8156	3670	7615	7234	3483	2142	7314	1326
	3	0903	8315	7734	2548	6829	3985	5277	0675	7196	2130
	4	7280	9423	6215	4723	1234	4612	1531	9518	0426	3156
	5	1630	7126	3737	2761	3241	7111	5501	6185	5903	0015
	6	1510	1270	1868	3899	5126	3248	6737	3649	3344	7996
	7	8340	8964	7314	4423	2738	4318	0911	4193	4897	6267
	8	1493	7240	5728	3196	2915	6744	8656	0715	9325	4459
Диапазон измерений (%)	±5	±10	±5	±10	±5	±10	±5	±10	±5	±10	
«Сдвиг» (%)	0	2,5	5	10	7,5	-2,5	-7,5	-5	10	-10	

Таблица 2

*Показания прибора САКН-1 по окончании измерения*

Вариант	АБВ	ГДЕ	ЖЗИ	КЛМ	НОП	РСТ	УФХ	ЦЧ	ШЩ	ЭЮЯ	
Дата окончания измерений	12.5.07	6.4.07	4.11.07	6.1.07	8.6.07	4.2.07	12.2.07	2.9.07	4.10.07	5.3.07	
Время окончания измерений	15,00	13,00	9,00	11,00	14,00	7,00	10,00	8,00	2,00	7,00	
Показания счетчиков	1	2755	6349	3420	5903	4915	6256	5527	3216	9720	0724
	2	6740	7450	8775	3750	7615	7315	3615	2349	7456	1326
	3	8514	0115	1165	6312	7950	5312	8342	2753	8973	2615
	4	6655	6320	0760	9730	6220	6780	4386	1480	6372	5830
	5	7712	1250	5714	6514	5615	8755	5609	7320	7021	2180
	6	1720	1400	2617	4615	6118	3401	6815	3653	3518	8260
	7	8400	9600	8003	4510	2801	4510	0955	4281	4903	6345
	8	1493	7240	5780	3196	2915	6744	8656	0715	9325	4590

### 3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой и основными математическими соотношениями по определению вероятностных числовых характеристик установившихся отклонений напряжения.

2. Произвести ввод исходных данных в программу SAKN.BAS по данным табл. 1 и 2.

3. Произвести расчет и графическое построение гистограммы.

4. Произвести расчет вероятностных числовых характеристик  $\delta U_y$ .

5. Произвести оценку качества электроэнергии по установившемуся отклонению напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97.

6. Предложить мероприятия по улучшению ПКЭ.

7. Ответить на контрольные вопросы.

### 4. Содержание отчета

4.1. Привести исходные данные и результаты расчетов на ЭВМ.

4.2. Привести гистограмму и результаты расчета вероятностных числовых характеристик.

4.3. В письменном виде привести оценку качества электроэнергии по установившемуся отклонению напряжению и обосновать целесообразность мероприятий по улучшению ПКЭ.

### 5. Контрольные вопросы

1. Назовите нормы ГОСТ 13109-97 по установившемуся отклонению напряжения.
2. Назовите вероятностные числовые характеристики установившегося отклонения напряжения.
3. Как определить вероятность нахождения установившегося отклонения напряжения в нормально допустимом диапазоне по ГОСТ 13109-97 с помощью гистограммы?
4. Назовите технические средства по улучшению установившегося отклонения напряжения.

### Литература

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 60 с.
2. Б.М. Валов, В.В. Литвак, Г.З. Маркман, Н.Н. Харлов. Контроль качества электрической энергии. – Томск.: Изд. ТПИ, 1982. – 88 с.
3. Методика контроля и анализа качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Главное управление по государственному энергетическому надзору Российской Федерации, 1995. – 78 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Целью лабораторной работы является ознакомление с методами расчета показателей эффективности энергоиспользования потребителями электрической энергии. При этом ставится задача закрепления и углубления знаний, полученных магистрантами при изучении дисциплины, выработки навыков применения этих знаний для решения конкретных инженерных задач.

#### 1. Общие положения

Под эффективностью энергоиспользования понимается достижение технически возможной и экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и одновременном снижении техногенного воздействия на окружающую среду. Эффективность энергоиспользования может быть оценена по системе количественных характеристик – показателей эффективности. Подбор необходимого числа показателей эффективности зависит от вида деятельности организации, глубины проводимых энергетических обследований и их целей, временных и финансовых возможностей организации, проводящей энергетическое обследование. Показатели эффективности энергоиспользования могут также служить индикаторами эффективности при проведении энергосберегающих мероприятий. По их динамике можно судить о результативности энергосберегающей деятельности организации.

Список показателей эффективности использования электроэнергии на промышленном предприятии, схема электроснабжения которого приведена на рис. 1, состоит из следующих показателей:

1. Удельные расходы электроэнергии для каждого насосного агрегата (номера 1–4).
2. Коэффициенты реактивной мощности ( $\cos\varphi$  или  $\operatorname{tg}\varphi$ ).
3. Характеристики графики активной нагрузки ( $T_{max}$ ,  $K_3$ ,  $K_\Phi$ ).
4. Коэффициент использования оборудования ( $K_{И}$ ).
5. Величина потерь электрической энергии ( $\Delta W_T$ ).

#### 2. Исходные данные

Задание к контрольной работе унифицировано и индивидуально для каждого магистранта. Шифром для выполнения контрольного задания являются две начальные буквы его фамилии, которые соотносятся к исходным данным табл. 2 и 3.

Схема электроснабжения содержит: асинхронные двигатели  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , напряжением 0,4 кВ с насосами  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ; асинхронный двигатель  $D_4$  напряжением 10 кВ с насосом  $H_4$ ; трансформаторы  $T_1$  и  $T_2$ ; активно-индуктивные нагрузки  $S_{H1}$ ,  $S_{H1}$ ; компенсирующие устройства  $KУ_1$ ,  $KУ_2$ ; кабельную линию напряжением 10 кВ и протяженностью  $L_K$ .

Таблица 1

*Параметры двухобмоточных трансформаторов*

Тип	Номинальная мощность, кВА	Вторичное напряжение, кВ	$\Delta P_x$ , кВт	$\Delta P_{кз}$ , кВт	$U_k$ , %	$I_x$ , %
ТМ-630/10	630	0,4	1,31	8,5	5,5	2,0
ТМ-1000/10	1000	0,4	1,9	10,8	5,5	1,2
ТМ-1600/10	1600	0,4	2,65	16,5	6	1,0
ТМ-2500/10	2500	0,4	3,75	24	6	0,8

Таблица 2

*Исходные данные*

№ п.п	Параметры	АБ	ВГД	ЕЖЗ	ИК	ЛМН	ОПР	СТУ	ФХЦ	ЧШЩ	ЭЮЯ
1	$S_{HT1-2}$ (кВА)	1600	1000	1000	630	630	1600	2500	2500	630	630
2	$P_1$ (кВА)	450	350	400	150	200	390	750	800	100	200
3	$\cos \varphi_1$	0,76	0,78	0,77	0,81	0,86	0,78	0,78	0,76	0,76	0,78
4	$P_2$ (кВА)	500	480	420	100	100	550	550	600	150	50
5	$\cos \varphi_2$	0,81	0,8	0,76	0,8	0,81	0,79	0,79	0,8	0,78	0,71
6	$Q_{кУ1}$ (кВАР)	200	150	100	50	100	250	300	200	50	50
7	$Q_{кУ2}$ (кВАР)	140	170	120	100	80	130	100	250	80	120
8	$K_3$	0,67	0,56	0,8	0,72	0,63	0,79	0,75	0,59	0,76	0,61
9	$I_k$ (кА)	1	1,5	0,7	0,5	1	1,2	0,9	1,1	0,8	1,3
10	$F_k$ (мм <sup>2</sup> )	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120

Таблица 3

## Исходные данные

№	Варианты	Параметры насосных агрегатов															
		Агрегат № 1				Агрегат № 2				Агрегат № 3				Агрегат № 4			
		Р <sub>ном,</sub> кВт	Р <sub>фак,</sub> кВт	Тип насоса	Тип насоса	Р <sub>ном,</sub> кВт	Р <sub>фак,</sub> кВт	Тип насоса	Тип насоса	Р <sub>ном,</sub> кВт	Р <sub>фак,</sub> кВт	Тип насоса	Тип насоса	Р <sub>ном,</sub> кВт	Р <sub>фак,</sub> кВт	Тип насоса	Тип насоса
1	А, Б	100	50	Д2000-21	Д2000-21	100	60	Д2000-21	Д2000-21	100	70	Д2000-21	Д2000-21	800	600	Д1250-125	Д1250-125
2	В, Г, Д	100	60	Д2000-21	Д2000-21	100	75	Д2000-21	Д2000-21	100	55	Д2000-21	Д2000-21	800	750	Д1250-125	Д1250-125
3	Е, Ж, З	100	70	Д2000-21	Д2000-21	100	55	Д2000-21	Д2000-21	100	65	Д2000-21	Д2000-21	800	500	Д1250-125	Д1250-125
4	И, К	100	60	Д2000-21	Д2000-21	100	55	Д2000-21	Д2000-21	100	65	Д2000-21	Д2000-21	800	700	Д1250-125	Д1250-125
5	Л, М, Н	100	55	Д2000-21	Д2000-21	100	50	Д2000-21	Д2000-21	100	70	Д2000-21	Д2000-21	800	400	Д1250-125	Д1250-125
6	О, П, Р	100	75	Д2000-21	Д2000-21	100	55	Д2000-21	Д2000-21	100	60	Д2000-21	Д2000-21	800	550	Д1250-125	Д1250-125
7	С, Т, У	100	65	Д2000-21	Д2000-21	100	50	Д2000-21	Д2000-21	100	75	Д2000-21	Д2000-21	800	350	Д1250-125	Д1250-125
8	Ф, Х, Ц	100	70	Д2000-21	Д2000-21	100	75	Д2000-21	Д2000-21	100	50	Д2000-21	Д2000-21	800	800	Д1250-125	Д1250-125
9	Ч, Ш, Щ	100	75	Д2000-21	Д2000-21	100	50	Д2000-21	Д2000-21	100	55	Д2000-21	Д2000-21	800	650	Д1250-125	Д1250-125
10	Э, Ю, Я	100	65	Д2000-21	Д2000-21	100	70	Д2000-21	Д2000-21	100	75	Д2000-21	Д2000-21	800	450	Д1250-125	Д1250-125

Таблица 4

## Параметры электродвигателей

№ п.п.	Номинальная мощность (кВт)	Номинальное напряжение (кВ)	Число оборотов (об/мин)	cosφ	КПД
1	100	0,4	730	0,88	91
2	100	0,4	730	0,88	91
3	100	0,4	730	0,88	91
4	800	10	1450	0,87	88,5

### 3. Расчет показателей эффективности энергоиспользования на предприятии

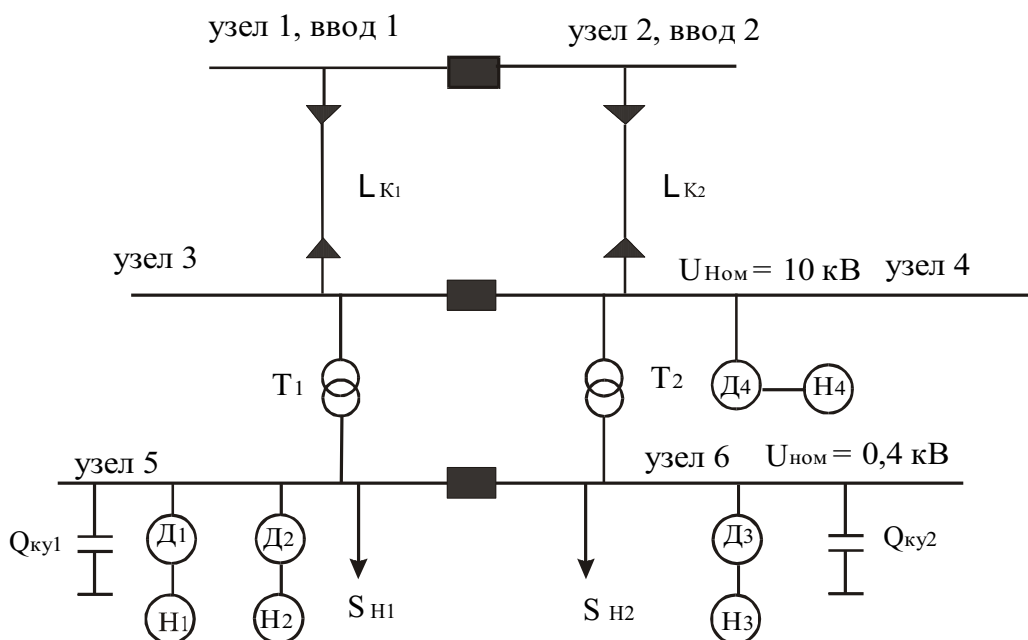


Рис. 1. Схема электроснабжения предприятия

### 3. Пример расчета

1. Определение удельных расходов электрической энергии для насосных агрегатов 1–4:

Удельные расходы электрической энергии для насосных агрегатов определяются по формуле:

$$Y_o(Q) = \frac{N(Q)}{Q} = \frac{H(Q) \cdot \gamma}{102 \cdot \eta_H(Q)}, \quad (1)$$

где  $N(Q)$  – зависимость мощности на валу насоса от величины подачи воды (кВт);  $Q$  – расход (подача) воды ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $H(Q)$  – зависимость напора, развиваемого насосом, от величины подачи воды (м);  $\eta_H(Q)$  – зависимость КПД насоса от величины подачи воды (кВт);  $\gamma$  – масса одного  $\text{м}^3$  жидкости.

Характеристики  $N=f(Q)$ ,  $H=f(Q)$ ,  $\eta_H(Q)$  для разных типов насосных агрегатов приведены на рис. 2 и 3.

По данным фактического электропотребления насосными агрегатами по характеристикам насосов изображенных на рисунках 2, 3 определяем их рабочие параметры (производительность –  $Q$ , напор –  $H$ , КПД  $\eta_H$ ).

Значения фактических удельных расходов агрегатов должны сравниваться с нормативными (или паспортными) значениями. На основа-

нии сравнения делают выводы о перерасходе или экономии электрической энергии за определенный период времени.

## 2. Определение коэффициентов реактивной мощности ( $\cos\varphi$ или $\operatorname{tg}\varphi$ ).

Экономия электрической энергии при повышении коэффициента реактивной мощности от значения  $\cos\varphi_1$  до  $\cos\varphi_2$  оценивается по выражению:

$$\Delta\mathcal{E} = K \cdot W_A (\operatorname{tg}\phi_1 - \operatorname{tg}\phi_2), \quad (2)$$

где  $W_A$  – потребление активной энергии за расчетный период, (кВт·ч);  $K$  – экономический эквивалент реактивной мощности, который ориентировочно может быть принят:

- при питании с шин генераторного напряжения – 0,02;
- при питании через одну ступень трансформации – 0,05;
- при питании через две ступени трансформации – 0,08;
- при питании через три ступени трансформации – 0,12.

Если известно количество реактивной энергии  $W_{Q1}$  и  $W_{Q2}$  (кВАр·ч) за расчетный период до повышения и после повышения  $\cos\varphi$ , то экономия электроэнергии определяется выражением

$$\Delta\mathcal{E} = K(W_{Q1} - W_{Q2}). \quad (3)$$

Помимо влияния значений коэффициентов реактивной энергии на величину потерь электроэнергии в сети,  $\cos\varphi$  характеризует загрузку электродвигателей и влияет на его КПД.

## 3. Определение характеристик графиков активной нагрузки ( $T_{max}$ , $K_3$ , $K_\phi$ ).

Наиболее важными показателями графиков активной нагрузки являются коэффициенты, характеризующие равномерность графиков. К данным коэффициентам относятся: коэффициент заполнения графика нагрузки  $K_{3П}$  и время использования максимальной нагрузки  $T_{MAX}$ :

$$K_{3П} = \frac{P_{CP}}{P_{MAX}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot t_i}{T \cdot P_{MAX}} \text{ o.e.}, \quad T_{MAX} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i t_i}{P_{MAX}} \text{ ч}, \quad K_{3П} = \frac{T_{MAX}}{T}, \quad (4)$$

где  $P_i$ ,  $t_i$  – мощность и продолжительность нагрузки в течение  $i$ -го отрезка времени на графике нагрузки;  $N$  – общее число отрезков времени на графике нагрузки;  $T$  – суммарная продолжительность нагрузки, час.

Выравнивание графиков нагрузки соответствует повышению значений  $K_{3П}$  и  $T_{MAX}$  и способствует снижению заявленного максимума активной мощности потребителя в часы максимальной нагрузки энергосистемы. Это снижает плату за электроэнергию, снижает потери электроэнергии, улучшает условия работы и ресурс электрооборудования.

Снижение потери электроэнергии в сети определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_H \left( 1 - \frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} \right), \quad (5)$$

где  $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}$  – коэффициенты формы графика активной нагрузки соответственно до его выравнивания и после;  $\Delta \mathcal{E}_H$  – нагрузочные потери в сети при коэффициенте формы  $K_{\phi 1}$ .

Коэффициент формы может быть определен по выражению

$$K_{\phi}^2 = \left( \frac{1090}{T_{max}} + 0,876 \right)^2 = \left( \frac{0,124}{K_3} + 0,876 \right)^2. \quad (6)$$

4. Определение коэффициентов использования оборудования ( $K_{И}$ ).

Загрузка электрооборудования характеризуется коэффициентом использования  $K_{И}$ , рассчитываемого по формуле

$$K_{И} = \frac{S_{НАГР}}{S_{НОМ}}. \quad (7)$$

Замена трансформаторов, загруженных менее 70 %, на меньшую мощность дает экономию

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P_{xx} \cdot t \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода трансформатора.

Отключение одного из  $n$  параллельно работающих трансформаторов целесообразно, когда происходящее при этом снижение потерь холостого хода оказывается большим, чем увеличение нагрузочных потерь из-за перераспределения суммарной нагрузки между оставшимися в работе трансформаторами. Целесообразность отключения одного из  $n$  однотипных трансформаторов определяется по условию

$$S_{НАГР} < S_{НОМ} \cdot \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}}, \quad (9)$$

где  $S_{НОМ}$  – номинальная мощность трансформатора;  $\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания трансформатора.

Замена незагруженных асинхронных двигателей на меньшую мощность дает экономию:

$$\Delta \mathcal{E} = 0,1 \cdot \Delta P \cdot t \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (10)$$

где  $\Delta P$  – изъятая мощность.

5. Определение потерь электроэнергии.

Структура потерь электрической энергии  $W_A$  для электрической сети, изображенной на рис.1 включает в себя потери холостого хода  $\Delta P_{xx}$  и короткого замыкания  $\Delta P_{кз}$  трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , а также нагрузочные потери в кабельной линии  $\Delta P_{КЛ}$ . Для этих элементов потери



электроэнергии вычисляют по формуле (10), при этом потери в двигателях и компенсирующих устройствах не учитываются.

$$\Delta W_{\Sigma} = 2 \cdot \Delta P_{XX} \cdot T + \left( \frac{\Delta P_{K3}}{2} \cdot K_{II}^2 \right) \cdot \tau_{MAX} + \Delta P_{KЛ} \cdot \tau_{MAX}, \quad (10)$$

где  $\tau_{MAX}$  – время максимальных потерь.

#### 4. Порядок проведения работы

4.1. По характеристикам насосов рис. 2–3 определяют величину подачи воды ( $Q$ ), напор ( $H$ ), КПД  $\eta$  в зависимости от мощности на валу насоса (мощность на валу насоса определяют как произведение фактической потребляемой мощности двигателем насоса из сети на КПД двигателя) для выбранного по варианту двигателя.

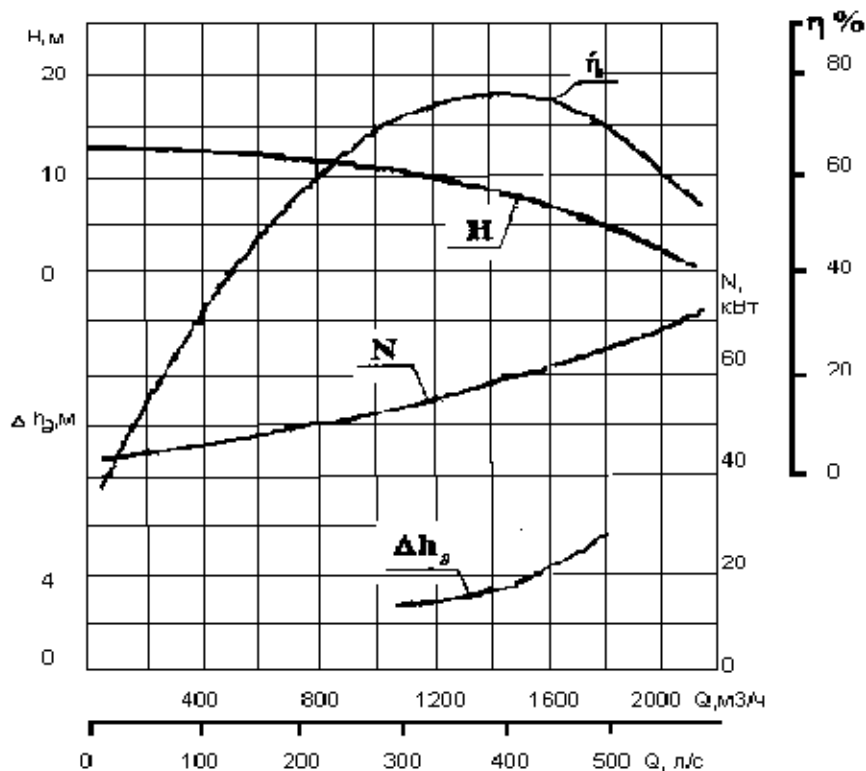


Рис. 2. Характеристика насоса Д2000-21

4.2. Исходные данные вводятся в ЭВМ по запрашиваемому списку.

4.3. С помощью ЭВМ проводят расчет показателей энергоэффективности.

4.4. Проводят анализ работы потребителя по каждому показателю энергоэффективности.

4.5. Производят оценку потенциала энергосбережения в натуральном (кВтч) и денежном (тыс. руб.) выражениях.

4.6. Выработывают план мероприятий по энергосбережению.

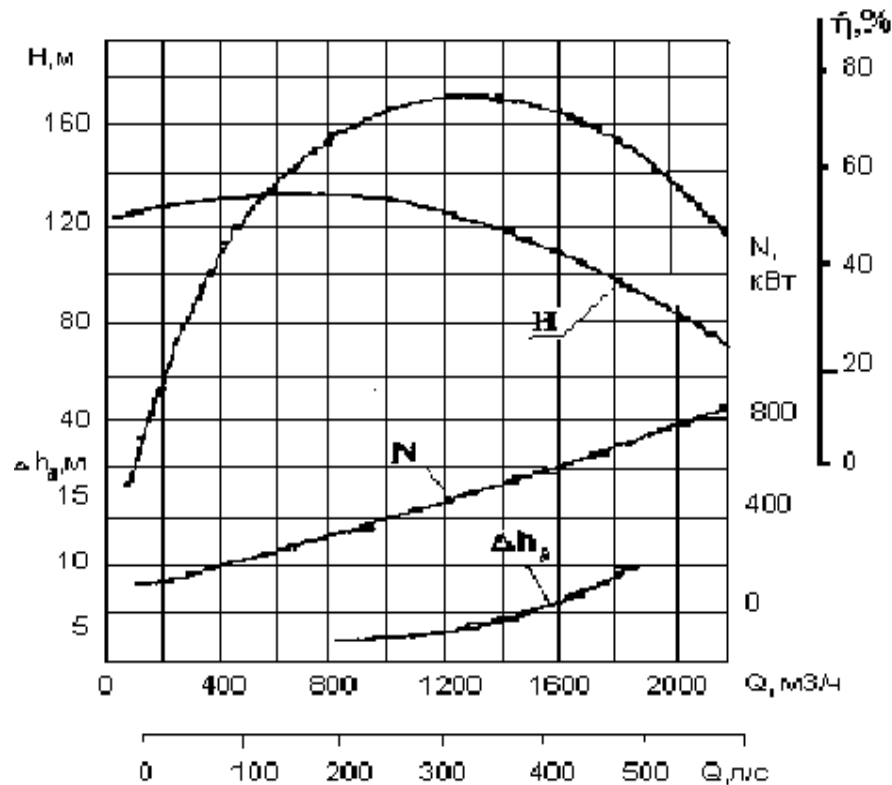


Рис. 3. Характеристика насоса Д1250-125  $n = 1450$  об/мин

## 5. Содержание отчета

- 5.1. Привести схему электроснабжения потребителей.
- 5.2. Приводят результаты расчета показателей энергоэффективности.
- 5.3. Приводят результаты анализа энергоэффективности использования электрической энергии.
- 5.4. Приводят план мероприятий по энергосбережению.

## 6. Контрольные вопросы

1. Что называется показателем эффективности энергоиспользования? Какие показатели энергоэффективности Вы знаете?
2. Назовите энергосберегающие мероприятия на промышленном предприятии.
3. По каким критериям может производиться оценка экономической эффективности мероприятий по энергосбережению?
4. Назовите основные этапы проведения энергетических обследований предприятий.

## Список литературы

1. Литвак В.В., Силич В.А., Яворский М.И. Региональный вектор энергосбережения. – Томск: СТТ, 1999. – 320 с.
2. Введение в энергосбережение: учебное пособие / под редакцией Яворского М.И. – Томск, «Курсив плюс», 2000. – 219 с.
3. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174 с.
4. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 333 с.
5. Арзамасцев Д.А., Липес А.В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях. – М.: Высшая школа, 1989. – 126 с.
6. Валов Б.М., Литвак В.В., Маркман Г.З., Харлов Н.Н. Контроль качества электрической энергии: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПИ, 1982.
7. Валов Б.М., Литвак В.В., Маркман Г.З., Харлов Н.Н. Качество энергии в электрических сетях: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПИ, 1983.

Учебное издание

МАРКМАН Григорий Зямович

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Энергосбережение и энергоэффективность»  
для магистрантов и дипломированных специалистов,  
обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика»

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

*Б.В. Лукутин*

Верстка  
Дизайн обложки


*В.П. Аршинова  
О.Ю. Аршинова  
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 15.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,89.  
Заказ 842. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.