



Негосударственное частное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технический университет УГМК»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ  
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Профиль подготовки Электрооборудование и энергохозяйство горных и  
промышленных предприятий  
Уровень высшего образования бакалавриат  
*(бакалавриат, специалитет, магистратура)*

Автор - разработчик: Гусакин А. А., ст. преподаватель  
Рассмотрено на заседании кафедры энергетики  
Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма  
2021

Домашняя контрольная работа по дисциплине Электроснабжение предприятий предусмотрена для обучающихся заочной формы обучения на 3 курсе в 6 семестре в объеме 72 часа.

Задание выполняется в виде комплексной расчетно-графической работы (кейса), состоящей из пяти взаимосвязанных заданий и охватывающей все разделы изучаемой дисциплины: от расчета электрических нагрузок до обоснования мероприятий по энергосбережению. Исходные данные для расчетов выдаются каждому студенту индивидуально в соответствии с вариантом задания (табл. 1-2).

Началом выполнения каждого из заданий являются практические занятия по дисциплине Электроснабжение предприятий. Дальнейшие расчеты и оформление работы обучающиеся выполняют самостоятельно во внеаудиторном режиме.

Основные разделы работы соответствуют тематике практических занятий:

1. Определение расчетных электрических нагрузок на основании ведомости электроприемников производственного объекта (*по вариантам – см. «Фонд оценочных средств»*).
2. Выбор числа и мощности силовых трансформаторов. Разработка принципиальной однолинейной схемы электроснабжения.
3. Выбор марки и сечения токоведущих частей на напряжении до и выше 1000 В.
4. Выбор и проверка коммутационных и защитных аппаратов до и выше 1000 В.
5. Разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности и качества электроэнергии в системе электроснабжения.

Описание технологического процесса и особенности режима электропотребления обучающийся выясняет самостоятельно с использованием литературных источников и открытых интернет-ресурсов по согласованию с преподавателем. Параметры электрооборудования рекомендуется принимать по актуальным справочным данным и каталогам производителей.

**Раздел 1. Расчет электрических нагрузок** производится для каждого узла питания (распределительного пункта, шкафа, сборки, трансформаторной подстанции), а также по цеху в целом с заполнением расчетной ведомости электрических нагрузок по форме 202-90 (табл. 1). При этом все электроприемники группируются по характерным категориям с одинаковыми  $k_u$  и  $tg\varphi$ .

Значения  $k_u$  принимаются по справочным данным из условия, что вероятность превышения фактической средней мощности над расчетной для характерной категории ЭП должна быть не более 0,05. При наличии в справочных материалах интервальных значений  $k_u$  следует для расчета принимать наибольшее значение.

В графах 7 и 8 соответственно записываются построчно величины  $k_u \cdot P_n$  и  $k_u \cdot P_n \cdot tg\varphi$ . В итоговой строке определяются суммы этих величин.

Групповой коэффициент использования определяется по формуле:

$$K_u = \frac{\sum K_u \cdot P_n}{\sum P_n},$$

и заносится в графу 5 итоговой строки.

Для последующего определения  $n_3$  в графе 9 построчно определяются для каждой характерной группы ЭП одинаковой мощности величины  $n \cdot p_n^2$  и в итоговой строке – их суммарное значение  $\sum n \cdot p_n^2$ . При определении  $n_3$  по упрощенной формуле графа 9 не заполняется.

Эффективное число электроприемников  $n_3$  определяется по выражению:

$$n_3 = \frac{(\sum P_n)^2}{\sum n \cdot p_n^2}$$

Найденное значение округляется до ближайшего меньшего целого числа.

Таблица 1

Расчетная ведомость электрических нагрузок (форма Ф636-92)

Исходные данные				Расчетные величины			Эффективное число ЭП** $n_{\text{Э}} = (S P_{\text{H}})^2 / S n p_{\text{H}}^2$	Коэффициент расчетной нагрузки $K_{\text{P}}$	Расчетная мощность			Расчетный ток, А $I_{\text{P}} = S_{\text{P}} / (\sqrt{3} U_{\text{H}})$		
по заданию технологов		по справочным данным		$K_{\text{И}} P_{\text{H}}$	$K_{\text{И}} P_{\text{H}} \text{tgj}$	$n p_{\text{H}}^2$			активная*, кВт $P_{\text{P}} = K_{\text{P}} K_{\text{И}} P_{\text{H}}$	реактивная, квар** $Q_{\text{P}} = 1,1 K_{\text{И}} P_{\text{H}} \text{tgj}$ при $n_{\text{Э}} \leq 10$ ; $Q_{\text{P}} = K_{\text{И}} P_{\text{H}} \text{tgj}$ при $n_{\text{Э}} > 10$	полная, кВА $S_{\text{P}} = \sqrt{P_{\text{P}}^2 + Q_{\text{P}}^2}$			
Наименование ЭП	Количество ЭП, шт.* $n$	Номинальная (установленная) мощность, кВт* одного ЭП $p_{\text{H}}$ общая $P_{\text{H}} = n p_{\text{H}}$					Коэффициент использования $K_{\text{И}}$	Коэффициент реактивной мощности $\text{Cosj/tgj}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Таблица 2

Кабельный журнал

Направление прокладки кабеля	$U_{\text{H}}$ , кВ	$I_{\text{P}}$ , А	Марка кабеля	Сечение, мм <sup>2</sup>	$I_{\text{доп}}$ , А	Длина линии, м	$r_0$ , Ом/м	$x_0$ , Ом/м	$\Delta U$ , %	Способ прокладки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Коэффициент расчетной нагрузки  $K_p$  определяется в зависимости от средневзвешенного коэффициента использования и эффективного числа электроприемников определяется согласно п. 2.11 «Указаний по расчету электрических нагрузок» [РТМ 36.18.32.4-92] и заносится в графу 11.

Расчетная мощность электроприемников (графа 12-13) определяется по выражениям:

$$P_p = K_p \cdot \sum K_u \cdot p_n$$

$$Q_p = \sum K_u \cdot p_n \cdot \operatorname{tg} \phi$$

Значение расчетная токовая нагрузка (графа 15) определяется по выражению:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

где  $S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$  – полная расчетная мощность, кВ·А, (графа 14).

**Раздел 2. Выбор числа и мощности силовых трансформаторов** производится по следующим критериям:

- надежность электроснабжения – для электроприемников I категории требуется установка не менее, чем двух трансформаторов.

- снижение расхода цветного металла в активной части трансформаторов и кабельных сетях – размещение в цехе нескольких подстанций с трансформаторами небольшой мощности, приближенных к потребителям.

- нормативный коэффициент загрузки в нормальном режиме:  $k_3 = 0,65 \dots 0,7$ .

- соответствие системы охлаждения трансформатора условиям его установки.

Оптимальный вариант выбирается путем технико-экономического сравнения с учетом компенсации реактивной мощности в сети напряжением 0,4 кВ. Приведенные экономические затраты определяются для каждого из вариантов по формуле:

$$Z_{np} = p_n \cdot K + I_c$$

где  $p_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат (для энергетического оборудования  $p_n = 0,12$  1/год);

$K$  – капитальные затраты на осуществление данного варианта, руб.;

$I_c$  – годовые эксплуатационные издержки на амортизацию, обслуживание и ремонт оборудования, с учетом стоимости потерь электроэнергии, руб.;

Потери мощности в трансформаторах определяются по формуле:

$$\Delta P_T = \Delta P'_{XX} + k_3^2 \cdot \Delta P'_{K3}$$

где  $\Delta P'_{XX} = \Delta P_{XX} + k_{III} \cdot \Delta Q_{XX}$  – приведенные потери холостого хода, кВт;

$\Delta P'_{K3} = \Delta P_{K3} + k_{III} \cdot \Delta Q_{K3}$  – приведенные потери короткого замыкания, кВт;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора, отн. ед.

$k_{III}$  – коэффициент изменения потерь активной мощности на передачу (трансформацию) реактивной мощности, кВт/квар;

**Раздел 3. Выбор марки и сечения токоведущих частей** производится по предельно допустимому току на основании справочных данных Правил устройства электроустановок:

$$I_{\text{доп}} \geq k \cdot I_p;$$

где  $I_{\text{доп}}$  – допустимый ток для данного сечения проводника, А;

$k$  – поправочный коэффициент, учитывающий число параллельно проложенных кабелей и условия охлаждения изоляции;

$I_p$  – расчетный нагрузочный ток, А;

Выбранное сечение проверяется по потере напряжения в линии:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I_p (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi) L}{U_{\text{ном}}};$$

где  $r_0$  и  $x_0$  – активное и индуктивное погонное сопротивления линии, Ом/м;

$L$  – длина линии, м;

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети, В;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности потребителя электроэнергии, отн. ед.

Результаты расчетов сводятся в кабельный журнал (табл. 2).

Выбор схемы электроснабжения цеха определяется категорией надежности питания потребителей, их размещением в цехе и особенностями режима работы. При этом схема распределения электроэнергии должна быть связана с технологической схемой объекта (питание разных технологических потоков от разных источников).

На больших и средних по мощности предприятиях, где электроприемники расположены в различных направлениях от центра питания, как правило, рекомендуется применять радиальные схемы электроснабжения. Для взаимного резервирования используется секционирование и устройства АВР.

Окончательное решение о принятии варианта схемы электроснабжения на основании технико-экономических расчетов. При этом учитываются такие факторы, как расход проводникового материала и трудоемкость прокладки питающих линий, стоимость коммутационной аппаратуры, годовые потери электроэнергии и т.п.

При сопоставлении вариантов схемы выполняются расчеты сравнительной эффективности капитальных вложений. Экономическим критерием выбора служит минимум приведенных затрат. Для схем, равноценных по надежности электроснабжения потребителей, приведенные затраты определяются по формуле:

$$Z = p_n \cdot K + C_{\text{п}} + A$$

где  $p_n = 0,12$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K$  – капитальные вложения в электрическую сеть, тыс.руб.;

$C_{\text{п}}$  – стоимость потерь электроэнергии в сети, тыс.руб.;

$A$  – ежегодные амортизационные отчисления на электрооборудование, тыс.руб.;

Капитальные затраты каждого варианта включают в себя стоимость ячеек с выключателями и кабельных линий с учетом их монтажа по укрупненным показателям стоимости:

$$K = \sum (n \cdot K_B) + \sum (K_{\text{каб. уд.}} \cdot L_{\text{каб}})$$

где  $n$  – число ячеек КРУ с выключателями (стоимостью  $K_B$ );

$K_{каб. уд.}$  – стоимость 1 км кабельной линии, тыс.руб./км;

$L_{каб}$  – длина кабельной линии, км.

**Раздел 4. Выбор и проверка коммутационных и защитных аппаратов** электрической сети. производится по совокупности типовых условий:

$U_{ном} \geq U_{сети}$  — номинальное напряжение, В;

$I_{ном} \geq I_{тах длит}$  — номинальный ток нагрузочного режима, А;

$I_{вкл ном} \geq I_{ПО}$  — номинальный ток аварийного режима (КЗ), кА;

$I_{дин ном} \geq i_{уд}$  — ток электродинамической стойкости (ударный ток), кА;

$I_T^2 * t_T \geq B$  — ток и время термической стойкости, кА·с.

Для этого необходимо рассчитать токи короткого замыкания, предварительно проанализировав схему электрической сети и определив наиболее тяжелые, но достаточно вероятные режимы КЗ. Они отражаются на расчетной однолинейной схеме (рис. 1.) и схеме замещения (рис. 2).

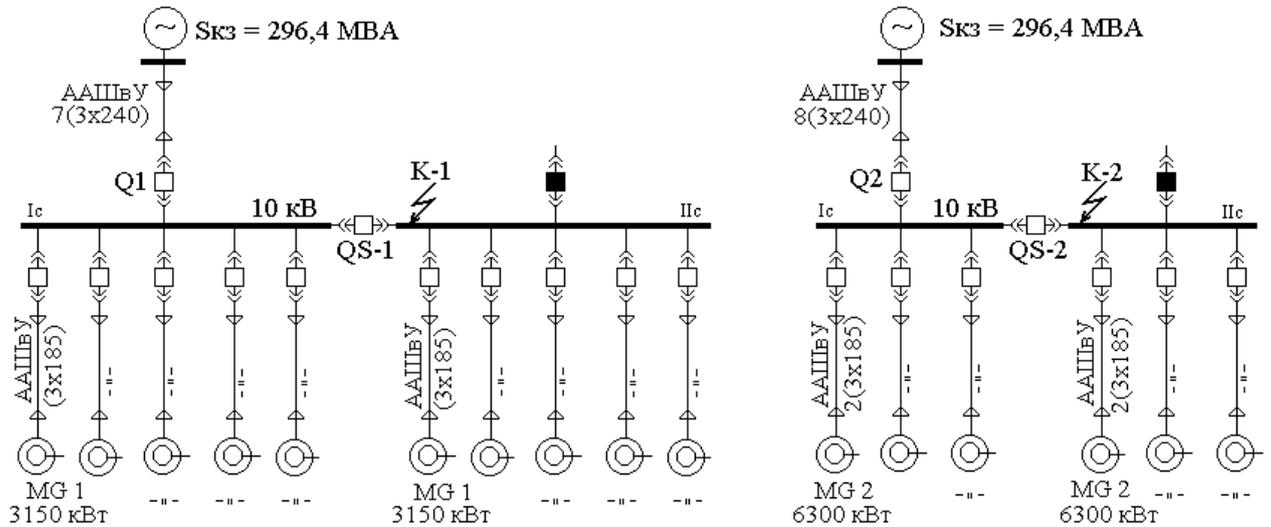


Рис. 1. Пример расчетной схемы распределительной сети

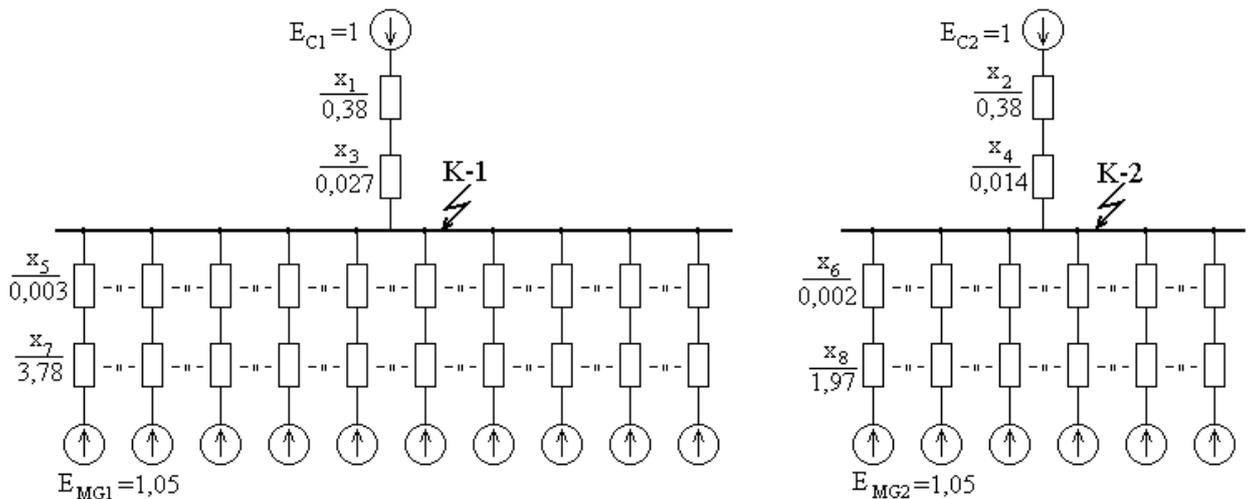


Рис. 2. Пример схемы замещения электрической сети

Параметры схемы замещения определяются в относительных единицах, для чего задаемся базисными величинами:

$$S_{\bar{o}} = 100 \text{ МВА}; \quad U_{\bar{o}} = 1,05 U_{\text{НОМ}}; \quad I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}}.$$

Сопротивления схемы замещения:

$$\text{– для питающей энергосистемы:} \quad x_1 = x_2 = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\text{кз}}},$$

где  $S_{\text{кз}}$  — мощность короткого замыкания питающей сети, кВА;

$$\text{– для кабельных и воздушных линий:} \quad x_3 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2},$$

где  $x_0$  и  $l$  — соответственно, погонное сопротивление (Ом/м) и длина линии (м);

$$\text{– для синхронных двигателей:} \quad x_7 = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\text{НОМ}}}.$$

где  $S_{\text{НОМ}}$  — номинальная мощность электрической машины, кВА;

$$\text{– для силовых трансформаторов:} \quad x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}},$$

где  $u_{\text{к}}$  — напряжение короткого замыкания (по паспорту трансформатора), %.

Расчетные токи короткого замыкания определяются по формулам:

$$I_{\text{ПО}} = \frac{E_C''}{x_1 + x_3} \cdot I_{\bar{o}} \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{пт}} = I_{\text{ПО}} \cdot \gamma(t_p),$$

где  $\gamma(t_p)$  — коэффициент затухания периодической составляющей тока КЗ;

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot e^{-t_h/T_a} \text{ (кА)};$$

где  $T_a$  — постоянная времени затухания апериодического тока КЗ, с;  
(для питающей системы —  $T_a = 0,1$  с; для синхронных двигателей —  $T_a = 0,07$  с);

Ударный ток в месте короткого замыкания:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ПО}} \cdot k_{\text{уд}},$$

где  $k_{\text{уд}}$  — ударный коэффициент (для питающей системы:  $k_{\text{уд}} = 1,9$ ; для двигателей:  $k_{\text{уд}} = 1,92$ ).

Результаты расчета для всех необходимых точек КЗ сводятся в табл. 3.

Таблица 3

## Расчетные токи короткого замыкания (пример)

Источник подпитки КЗ		$I_{по}$ кА	$I_{п т}$ кА	$i_{ат}$ кА	$i_{кт}$ кА	$i_{уд}$ кА	$t_p$ с	$T_a$ с	$k_{уд}$
точка К-1	Система	13,51	13,51	4,26	23,37	36,68	0,15	0,10	1,92
	Двиг.МГ1	15,24	9,30	2,53	15,68	40,95	0,15	0,07	1,90
	ИТОГО	28,75	22,81	6,79	39,04	77,63	0,15	-	-
точка К-2	Система	13,65	13,65	4,31	23,61	37,06	0,15	0,10	1,92
	Двиг.МГ2	17,54	10,70	2,91	18,04	47,13	0,15	0,07	1,90
	ИТОГО	31,19	24,35	7,22	41,65	84,19	0,15	-	-

Выбранное по приведенным выше условиям электрооборудование обозначается на однолинейной схеме электроснабжения предприятия в соответствии с требованиями ГОСТ — на поле чертежа или в виде спецификации.

Основным мероприятием по обеспечению электробезопасности схемы является защитное заземление. Расчет защитного заземления производится методом коэффициента использования. При этом грунт принимается однородным по глубине, а заземляющее устройство состоит из вертикальных и горизонтальных электродов. Допустимое сопротивление заземляющего устройства принимается согласно Правилам устройства электроустановок в зависимости от номинального напряжения и режима нейтрали:

Сопротивление одного вертикального электрода:

$$r_{\epsilon} = \frac{0,366 \cdot \rho_{расч}}{l_{\epsilon}} \cdot \left( \lg \frac{2 \cdot l_{\epsilon}}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4t_{\epsilon} + l_{\epsilon}}{4t_{\epsilon} - l_{\epsilon}} \right),$$

где  $\rho_{расч} = k_c \cdot \rho$  – расчетное сопротивление грунта;

Сопротивление всех вертикальных заземлителей с учетом коэффициента использования:

$$R_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon}}{n_{\epsilon} \cdot \eta_{\epsilon}},$$

где  $\eta_{\epsilon}$  — коэффициент использования по справочнику;

$n_{\epsilon} = 108$  — число вертикальных заземлителей.

Сопротивление горизонтального заземлителя (с учетом его длины  $l_2$ ):

$$r_2 = \frac{0,366 \cdot \rho_{расч}}{l_2 \cdot \eta_2} \cdot \lg \frac{l_2^2}{d \cdot t_2}$$

Результирующее сопротивление заземляющего устройства:

$$R_3 = \frac{R_{\epsilon} \cdot R_u}{R_{\epsilon} + R_u}.$$

Значение сопротивления сравнивается с допустимым Правилами устройства электроустановок для данного номинального напряжения электрической сети и режима нейтрали.

**Раздел 5. Разработка рекомендаций по повышению энергетической эффективности** включает в себя обоснование системы учета электроэнергии и оценку энергетического баланса. Расчет баланса, в свою очередь, включает в себя четыре этапа:

- 1) составление схемы энергопотоков на предприятии;
- 2) определение прямых затрат энергии по всем видам продукции;
- 3) расчет косвенных энергозатрат, в т.ч. на вспомогательные цеха и собственные нужды.
- 4) расчет полных (суммарных) энергозатрат.

Схема энергетических потоков представляет собой графическое изображение связей между всеми видами энергоресурсов предприятия и продукцией, при изготовлении которой эти энергоресурсы расходуются (рис. 3). При этом элементы структурной схемы (виды энергоресурсов и виды продукции) необходимо разбить на три группы:

- покупные энергоресурсы, поступающие на предприятие со стороны;
- энергоресурсы собственного производства (энергетическая продукция предприятия);
- неэнергетическая продукция собственного производства.

На основании схемы рассчитываются коэффициенты прямых затрат энергии — норма расхода на производство единицы конечного продукта:

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j}, \quad b_{kj} = \frac{X_{kj}}{X_j},$$

где  $a_{ij}$  — коэффициент прямых затрат покупной энергии  $i$ -го вида при производстве единицы  $j$ -го продукта;

$b_{kj}$  — коэффициент прямых затрат собственных энергоресурсов  $k$ -го вида при производстве единицы  $j$ -го продукта;

$X_{ij}$  — количество энергии  $i$ -го вида, израсходованное за отчетный период (например, за год) при производстве продукта  $j$ -го вида;

$X_j$  — количество  $j$ -го продукта, произведенного за этот же период.

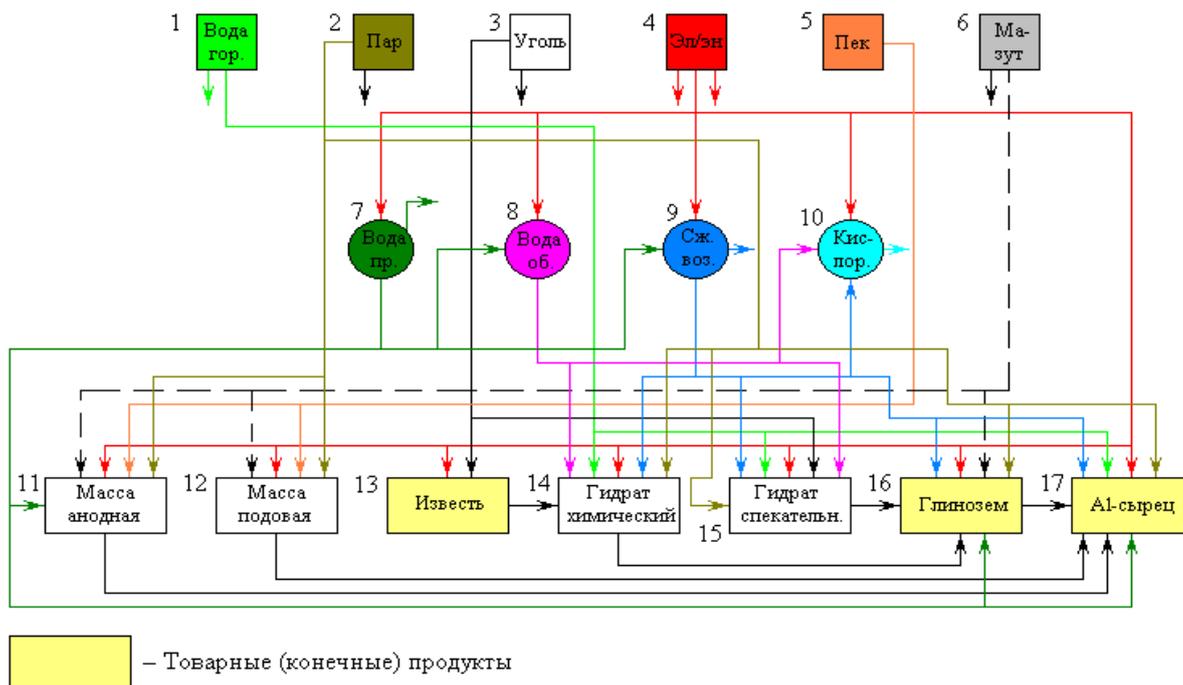


Рис. 3. Схема энергетических потоков

Полученные коэффициенты  $a_{ij}$  в дальнейшем формируют матрицу прямых энергозатрат, которая характеризует внутрипроизводственный баланс каждого вида энергии:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1.1} & a_{1.2} & a_{1.3} & \dots & a_{1.n} \\ a_{2.1} & a_{2.2} & a_{2.3} & \dots & a_{2.m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m.1} & a_{m.2} & a_{m.3} & \dots & a_{m.n} \end{pmatrix},$$

Если какой-либо элемент этой матрицы  $a_{ij}$  умножить на годовой выпуск продукции  $j$ -го вида, получим годовой расход  $i$ -го вида энергии на производство этой продукции. Сумма всех значений  $a_{ij}$  по каждой строке матрицы будет характеризовать внутрипроизводственный баланс по данному виду энергии.

Полный баланс получается путем суммирования всех прямых и косвенных затрат по данному виду энергии с учетом доли ее потребления на собственные нужды предприятия, отпуска на сторону и потерь:

$$w_{j/i}^{\Sigma} = w_{j/i} + w'_{22/i} + w''_{22/i} + w'''_{22/i} + \dots + w_i^{c.n.} + w_i^{вспом.} + w_i^{потери}.$$

При этом последние три составляющие распределяются между всеми конечными продуктами и полуфабрикатами пропорционально объемам их выпуска:

$$w_i^{c.n.} = a_i^{c.n.} \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \text{ МВт} \cdot \text{ч/т.}$$

где  $X_j$  — объем производства  $j$ -го конечного продукта, т;

$\sum_{j=1}^n X_j$  — суммарная производительность по всем видам готовой продукции, т.

Полученные таким образом данные, позволяют решать целый комплекс задач:

- совершенствование системы учета и контроля расхода энергоносителей;
- оценка фактического энергоиспользования на предприятии, выявление причин возникновения и величины потерь топливно-энергетических ресурсов;
- разработка плана мероприятий, направленных на снижение потерь топливно-энергетических ресурсов;
- выявление и оценка резервов экономии топлива и энергии;
- совершенствование системы нормирования и разработка научно обоснованных норм расхода топлива и энергии на производство продукции;
- определение рациональных размеров энергопотребления в производственных процессах и установках.

*Результатом успешного выполнения комплексного практического задания* считается умение обучающихся самостоятельно и осознанно:

- производить расчеты электрических нагрузок для различных уровней и структур систем электроснабжения различных предприятий и производственных объектов;
- выбирать конфигурацию схемы электроснабжения и ее элементы с учетом надежности электроснабжения, электромагнитной совместимости и технико-экономических показателей;

- выполнять расчеты нагрузочной способности, электродинамической и термической стойкости основного электрооборудование систем электроснабжения.

При выполнении и защите работы обучающийся должен обосновывать все принятые решения и анализировать полученные результаты с точки зрения технической и экономической целесообразности, используя только актуальные нормативные документы и справочные данные.

Выполненная работа сдается на предварительную проверку, а затем защищается в ходе очного собеседования с преподавателем. Рекомендуется проводить коллективные обсуждения завершенных работ в группах с целью обмена мнениями и более глубокого освоения изучаемого материала.

В ходе выполнения работы в дополнение к конспекту лекций необходимо использовать основную и дополнительную литературу, наглядные пособия, видеоматериалы. Рекомендуется производить подготовку систематически, используя все время, отведенное по плану-графиком самостоятельной работы.

Удовлетворительным результатом выполнения задания считается полнота и обоснованность выполненных расчетов, соответствие содержания и оформления нормативно-технической документации и глубина теоретических знаний, продемонстрированных обучающимся в ходе выполнения работы.