Редакция 2025-01-29
Автор: Евдасёв И.С.
Замечания и предложения: eis06@mail.ru

9 Определение установленной и расчетной мощности осветительной установки

9.1 Установленная мощность осветительной установки

Пояснение к термину "установленная мощность"

Под установленной мощностью электроприемника в составе электроустановки принято понимать наибольшую активную электрическую мощность, с которой электроустановка может длительно работать без перегрузки в соответствии с техническими условиями на присоединение или параметрами заводского паспорта. Термин установлен СТБ 2574 [9.1] и обозначает несколько отличное понятие от раннее применяемого по ГОСТ 19431 (термин исключен в новой редакции ГОСТ 19431-2023 [9.2]). В сложившейся практике проектирования при определении установленной мощности в соответствии с понятием по ГОСТ 19431 традиционно рассматриваются только параметры заводского паспорта оборудования. В этом случае имеется совпадение понятий установленной и номинальной активной мощности электроприемников, за исключением электродвигателей, электродвигателей-генераторов и преобразователей. Такой подход справедлив при условии равенства номинальных напряжений электросети и электроприемника.

С 1992 года в Республике Беларусь планировался перевод электросетей с номинального напряжения 220/380 В на напряжение 230/400 В, которое регламентировалось ГОСТ 29322-92, в настоящее время ГОСТ 29322-2014 [9.3]. Однако до настоящего времени значительная часть электросетей эксплуатируется с номинальным напряжением 220/380 В. В Правилах технической эксплуатации Белорусской железной дороги – "номинальное напряжение на устройствах СЦБ и связи" 220/380 В [9.4]. 230В приказ 15 Н

При производстве осветительных приборов в странах ЕАЭС также нет единого подхода. Осветительные приборы выпускаются на номинальные напряжения 230 и 220 В.

Термин "установленная мощность" относится к работе электроприемника в составе электроустановки и значение этой мощности может отличаться от номинальной мощности из-за различия в номинальных напряжениях. Поэтому в общем случае целесообразно под термином "установленная мощность" определить номинальную мощность электроприемника, которая приведена к номинальным характеристикам (напряжение, частота/род тока) электросети, определёнными в соответствии с техническими условиями на присоединение.

Приведенная к номинальному напряжению сети питания установленная мощность осветительного прибора $P_{\text{у}}$, кВт

$$P_{\text{у}} = P_{\text{н}} K_{\text{ПРА}} (U_{\text{нС}}/U_{\text{н}})^{k_{\text{ри}}} + P_{\text{З}}, \qquad (9.1)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность источника света (лампы), кВт;

$K_{\text{ПРА}}$ – коэффициент потерь в ПРА; для осветительных приборов с металлогалогенными лампами – 1,1, со светодиодным модулем и ЭПРА – от 1,05 до 1,1 (меньшие значения соответствуют аппаратам с IP20, большие с IP67), со светодиодным модулем и ЭмПРА – 1,25, со светодиодной лампой – 1;

$U_{нС}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ; принимается по заданию;

$U_{н}$ – номинальное напряжение осветительного прибора, кВ; определяется по технической документации;

$k_{ри}$ – регулирующий эффект активной мощности по напряжению; для осветительных приборов с металлогалогенными лампами – 2,2, со светодиодами – 0;

$P_{З}$ – потребляемая (рассеиваемая) мощность встроенного в осветительный прибор независимого модуля защит; определяется по технической документации, при отсутствии данных принимается от $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ до $0{,}6 \cdot 10^{-3}$ кВт.

При лабораторных измерениях характеристик светодиодных осветительных приборов, как правило, измеряется номинальная мощность прибора $P_{нОП}$, а не светодиодного модуля, исключение составляют осветительные приборы со светодиодными лампами. Это связано с трудновыполнимым процессом воссоздания для модуля вне осветительного прибора тепловых режимов, идентичных его работе внутри корпуса прибора. Поэтому для осветительных приборов со светодиодными модулями формулу (9.1) можно записать в виде

$$P_{у} = P_{нОП}, \tag{9.2}$$

где $P_{нОП}$ – номинальная мощность осветительного прибора со светодиодными модулями, кВт.

Для дальнейших расчетов необходимо определиться с порядком подключения осветительных приборов и их групп к фазам трехфазной линии электропередачи. Под группой принимается количество осветительных приборов, которые подключены к одному ЩО, т.е. установлены на одной жесткой поперечине.

Критерии выбора порядка подключения однофазных нагрузок

Для равномерно распределенной по длине однофазной нагрузки осветительных приборов, как правило, рассматриваются несколько порядков чередования фаз [9.5, стр. 237]:

а) L1-L2-L3-L1-L2-L3;

б) L1-L2-L3-L3-L2-L1;

в) L1-L1-L2-L2-L3-L3.

При выборе порядка чередования фаз учитывают результирующий наибольший коэффициент пульсации освещенности на рабочей поверхности, потерь напряжения и мощности в линии электропередачи.

Вариант подключения осветительных приборов в порядке L1-L1-L2-L2-L3-L3 применяется крайне редко: в основном для возможности включения освещения отдельных рабочих зон.

Наиболее часто для освещения помещений, а также дорог и улиц применяется порядок подключения осветительных приборов по фазам L1-L2-L3-L1-L2-L3. Такое подключение обеспечивает в максимальной степени снижение пульсаций освещенности и относительную её равномерность при отключении одной или двух фаз линии.

Учет коэффициента пульсации при выборе порядка чередования фаз в осветительной установке железнодорожного парка не актуален из-за отсутствия зон в междупутьях, где освещенность обусловлена суммой световых потоков трех и более осветительных приборов. Также актуальность пульсации освещенности значительно снизилась с применением осветительных приборов, которые оснащены ЭПРА и имеют коэффициент пульсации светового потока менее 10 %.

По критериям наименьших потери напряжения и мощности в однородной (с одинаковым сечением и материалом жил по всей длине) трехфазной линии с равномерно распределенными по длине однофазными одинаковыми нагрузками наиболее рациональным будет порядок подключения L1-L2-L3-L3-L2-L1. При этом порядке обеспечивается наилучшее равенство моментов нагрузки в фазах. Потери напряжения пропорциональны моменту нагрузки (подробнее рассмотрено далее), следовательно, разность между потерями напряжения в фазах будет минимальна. В таком варианте максимальное значение потери в отдельной фазе наиболее близко к среднему в трех фазах, т.е. является наименьшим из возможных значений.

По критериям наименьших потерь напряжения и мощности в однородной трехфазной линии с равномерно распределенными по длине однофазными нагрузками выбор рационального порядка чередования фаз в практических задачах можно провести по условию

$$\begin{cases} M_{\text{yLmax}} = \max\{M_{\text{yL1}}, M_{\text{yL2}}, M_{\text{yL3}}\} \rightarrow \min, \\ \text{H} = (P_{\text{yLmax}} - P_{\text{yLmin}}) / P_{\text{yLmin}} \cdot 100\% \rightarrow \min, \end{cases} \quad (9.3)$$

где M_{yLmax} – наибольшее значение момента установленной нагрузки фазы, кВт·м;

H – неравномерность нагрузки фаз [9.6, ф.1.28];

P_{yLmax} – установленная мощность осветительных приборов в наиболее нагруженной фазе, кВт;

P_{yLmin} – установленная мощность осветительных приборов в наименее нагруженной фазе, кВт;

$$P_{\text{yLmax}} = \max\{P_{\text{yL1}}, P_{\text{yL2}}, P_{\text{yL3}}\}, \quad (9.4)$$

$$P_{\text{yLmin}} = \min\{P_{\text{yL1}}, P_{\text{yL2}}, P_{\text{yL3}}\}, \quad (9.5)$$

Момент установленной нагрузки фаз M_{yLX} (M_{yL1}, M_{yL2}, M_{yL3}), кВт·м

$$M_{\text{yLX}} = \sum_{i=1}^{G_{\text{LX}}} (P_{\text{yLX}i}\, L_{\text{LX}i}), \tag{9.6}$$

где $P_{\text{yLX}i}$ – установленная мощность i-го осветительного прибора или i-той группы осветительных приборов, подключенных к фазе LX (L1, L2, L3), кВт;

$L_{\text{LX}i}$ – расстояние от i-го осветительного прибора или i-той группы осветительных приборов до точки подключения групповой или распределительной линии.

Пояснение к условию (9.3)

Условие (9.3) является необходимым для выбора рациональной схемы по критерию наименьших потери напряжения и мощности, но не достаточным для выбора оптимальной схемы. При одинаковых моментах однофазных нагрузок равномерно распределенных по длине, потерь напряжения и мощности в фазах для различных схем могут различаться. Этот тезис более подробно изложен в [9.7, стр 209] и будет рассмотрен далее.

Установленная мощность осветительных приборов в фазе P_{yLX} (P_{yL1}, P_{yL2}, P_{yL3}), кВт·м

$$P_{\text{yLX}} = \sum_{i=1}^{G_{\text{LX}}} P_{\text{yLX}i}. \tag{9.7}$$

В частном случае, когда мощности всех групп осветительных приборов одинаковы и равны P_{yP}, а также одинаковы расстояния между всеми смежными жесткими поперечинами L формулы (9.3), (9.6), (9.7) могут быть представлены в упрощенном виде:

$$P_{\text{yLX}} = P_{\text{yP}}\, G_{\text{LX}} \propto G_{\text{LX}}, \tag{9.8}$$

$$M_{\text{yLX}} = A_{\text{LX}} P_{\text{yP}} L = P_{\text{yP}} L \sum_{i=1}^{G_{\text{LX}}} A_{\text{LX}i}\,, \tag{9.9}$$

$$A_{\text{LX}} = \sum_{i=1}^{G_{\text{LX}}} A_{\text{LX}i}\,, \tag{9.10}$$

$$\begin{cases} A_{\text{Lmax}} = \max\{A_{\text{L1}}, A_{\text{L2}}, A_{\text{L3}}\} \to \min, \\ \text{H} = (G_{\text{Lmax}} - G_{\text{Lmin}}) \,/\, G_{\text{Lmin}} \cdot 100\% \to \min, \end{cases} \tag{9.11}$$

где G_{LX} – количество жестких поперечин, осветительные приборы которых подключены к фазе LX, шт.;

G_{Lmax} – максимальное количество жестких поперечин, осветительные приборы которых подключены к одной фазе, шт.;

G_{Lmax} – минимальное количество жестких поперечин, осветительные приборы которых подключены к одной фазе, шт.;

A_{LXi} – коэффициент кратности расстояния от i-той группы осветительных приборов до точки подключения распределительной линии к расстоянию L;

A_{LX} – коэффициент кратности момента нагрузки подключенной в фазе LX;

A_{Lmax} – наибольший коэффициент кратности момента нагрузки фаз L1, L2, L3.

В случае, когда мощности всех осветительных приборов одинаковы и равны $P_у$, а также одинаковы расстояния m между всеми смежными точками подключения осветительных приборов формулы (9.3), (9.6), (9.7) могут быть представлены в упрощенном виде с коэффициентами кратности аналогично формулам (9.8) – (9.11). Показатель G_{LX} в этом случае заменяется на количество осветительных приборов.

Первое выражение в условиях (9.3) или (9.11) проверяется отдельно для левого и правого плеча парка, и выбирается максимальное значение из двух выборок для плеч, а второе – для всего парка. Левое плечо парка – от первого ригеля до ответвления кабеля к ШНО, правое – от ответвления кабеля к ШНО до последнего ригеля. Для снижения потерь напряжения и мощности в распределительной электросети необходимо стремиться при подключении ответвления к ШНО к равенству в двух плечах наибольших значений моментов нагрузки фаз.

После выбора порядка подключения осветительных приборов и их групп к фазам групповой и распределительной электросети проводится расчет установленных мощностей осветительной установки железнодорожного парка по формулам, приведённым в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Формулы для расчета установленных мощностей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Формула[1) 2)]	Номер формулы
Одна жесткая поперечина	$P_{уР} = 2P_у (N + 1)$	9.12
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	$P_{уЛL1} = P_{уР}\ G_{ЛL1}$	9.13
подключенные к фазе L2	$P_{уЛL2} = P_{уР}\ G_{ЛL2}$	9.14
подключенные к фазе L3	$P_{уЛL3} = P_{уР}\ G_{ЛL3}$	9.15
Жесткие поперечины в правом плече парка:		
подключенные к фазе L1	$P_{уПL1} = P_{уР}\ G_{ПL1}$	9.16
подключенные к фазе L2	$P_{уПL2} = P_{уР}\ G_{ПL2}$	9.17

Продолжение таблицы 6.1

Осветительная установка, часть	Формула[1) 2)]	Номер формулы
подключенные к фазе L3	$P_{уПL3} = P_{уР}\ G_{ПL3}$	9.18
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	$P_{уL1} = P_{уР}\ G_{L1}$	9.19
подключенные к фазе L2	$P_{уL2} = P_{уР}\ G_{L2}$	9.20
подключенные к фазе L3	$P_{уL3} = P_{уР}\ G_{L3}$	9.21
подключенные к фазам L1, L2, L3	$P_{уΣ} = P_{уL1} + P_{уL2} + P_{уL3}$	9.22

Примечания.
[1)] В формулах переменная G_{XXX} – количество ригелей для соответствующего условия по первому столбцу.
[2)] Результат расчета установленной мощности по всем формулам в киловаттах.

Пример 9.1А

Исходные данные по заданию А.

Номинальная мощность прожектора $P_{нОП}$ принимается равной 0,046 кВт по данным файла фотометрических измерений, отраженным в отчете по светотехническому расчету (приложение Б).

Приведенная к номинальному напряжению сети питания установленная мощность осветительного прибора со светодиодным модулем $P_у$ определяется по формуле (9.2):

$$P_у = 0{,}046 \text{ кВт}.$$

В виду отсутствия ограничений на размещение трансформаторной подстанции в курсовом проекте с целью снижения потерь напряжения и мощности в распределительной электросети подключение ответвления к ШНО осуществлено по центру парка.

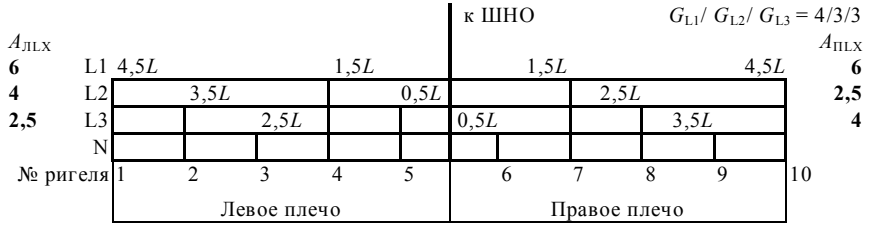
Группа осветительных приборов, которые установлены на одной жесткой поперечине, подключается к одной фазе трехфазной магистральной линии распределительной сети.

Рассмотрены три порядка подключения групп по длине магистральной линии. Схемы представлены на рисунках 9.1Пр-9.4Пр.

Порядок подключения в правых плечах на рисунках 9.1Пр-9.2Пр *не оптимизировался с целью представления варианта не идеального распределения по фазам нагрузки.*

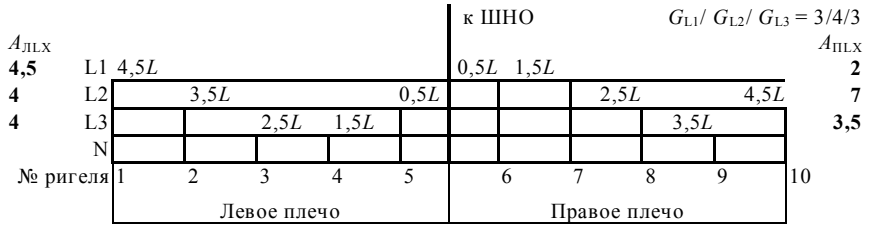
На рисунке 9.3Пр *представлен вариант подключения при симметричном относительно точки питания порядке чередования фаз* L1-L2-L3-L3-L2-L1... *в левом и правом плече. Этот вариант более рационален с точки зрения снижения потерь напряжения и мощности в трехфазных линиях отдельных плеч, но имеет достаточно высокую вероятность повышенной неравномерности нагрузки фаз в линии от ШНО. Для снижения этой вероятности необходимо в плече соблюдать порядок подключения фаз в направлении от последней группы электроприемников к точке питания (симметричный относительно точки питания) и подключать последние группы электроприемников в каждом плече к разным фазам (порядок симметричный относительно фазы* L2*). Пример такого подключения показан на рисунке* 9.4Пр.

В курсовом проекте необходимо рассмотреть только вариант с порядком чередования фаз (L1-L2-L3-L3-L2-L1...)-(...L3-L2-L1-L1-L2-L3), т.е. *симметричный относительно точки подключения и фазы* L2*, так как при принятом условии подключения линии от ШНО по центу парка этот вариант наиболее рационален.*



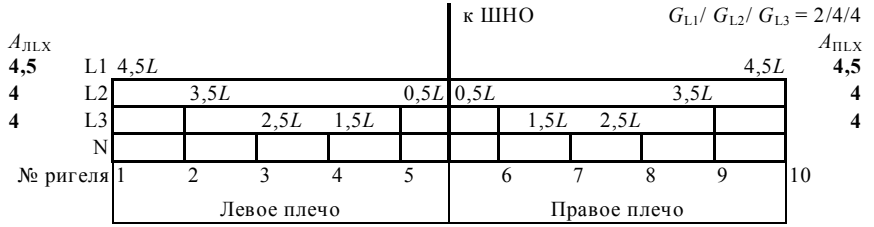
$A_{ЛLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX левого плеча ($A_{ЛL1}$ = 6; $A_{ЛL2}$ = 4; $A_{ЛL3}$ = 2,5),
$A_{ПLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX правого плеча ($A_{ПL1}$ = 6; $A_{ПL2}$ = 2,5; $A_{ПL3}$ = 4).

Рисунок 9.1Пр – Схема порядка L1-L2-L3-L1-L2-L3-L1-L2-L3-L1 подключения групп осветительных приборов к трехфазной магистральной линии



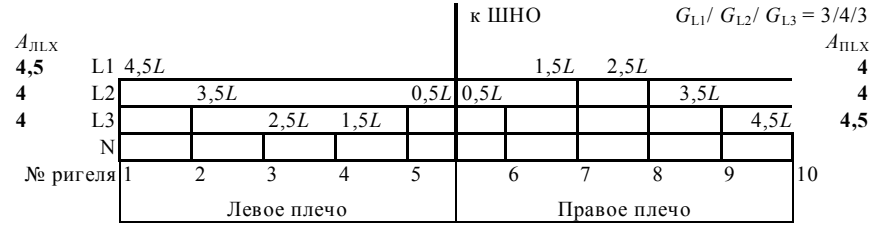
$A_{ЛLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX левого плеча ($A_{ЛL1}$ = 4,5; $A_{ЛL2}$ = 4; $A_{ЛL3}$ = 4),
$A_{ПLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX правого плеча ($A_{ПL1}$ = 2; $A_{ПL2}$ = 7; $A_{ПL3}$ = 3,5).

Рисунок 9.2Пр – Схема порядка L1-L2-L3-L3-L2-L1-L1-L2-L3-L2 подключения групп осветительных приборов к трехфазной магистральной линии



$A_{ЛLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX левого плеча ($A_{ЛL1}$ = 4,5; $A_{ЛL2}$ = 4; $A_{ЛL3}$ = 4),
$A_{ПLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX правого плеча ($A_{ПL1}$ = 4,5; $A_{ПL2}$ = 4; $A_{ПL3}$ = 4).

Рисунок 9.3Пр – Схема порядка (L1-L2-L3-L3-L2)-(L2-L3-L3-L2-L1) подключения групп осветительных приборов к трехфазной магистральной линии



$A_{ЛLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX левого плеча ($A_{ЛL1}$ = 4,5; $A_{ЛL2}$ = 4; $A_{ЛL3}$ = 4),
$A_{ПLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX правого плеча ($A_{ПL1}$ = 4; $A_{ПL2}$ = 4; $A_{ПL3}$ = 4,5).

Рисунок 9.4Пр – Схема порядка (L1-L2-L3-L3-L2)-(L2-L1-L1-L2-L3) подключения групп осветительных приборов к трехфазной магистральной линии

Результаты проверки в соответствии с условием (9.11) рассмотренных порядков подключения групп однофазных нагрузок в магистральной линии приведены в таблице 9.1Пр.

Таблица 9.1Пр – Результаты расчета условий наименьших потерь напряжения и мощности в трехфазной распределительной сети при подключении однофазных нагрузок

Порядок подключения однофазных нагрузок	Плечо парка	Коэффициент кратности момента нагрузки					Количество жестких поперечин		Неравномерность Н, %
		A_{L1}	A_{L2}	A_{L3}	A_{Lmax} плеча	A_{Lmax} парка*	G_{Lmax}	G_{Lmin}	
L1-L2-L3-L1-L2-L3-L1-L2-L3-L1	Левое	6	4	2,5	6	6	4	3	33
	Правое	6	2,5	4	6				
L1-L2-L3-L3-L2-L1-L1-L2-L3-L2	Левое	4,5	4	4	4,5	7	4	3	33
	Правое	2	7	3,5	7				
(L1-L2-L3-L3-L2)-(L2-L3-L3-L2-L1)	Левое	4,5	4	4	4,5	4,5	4	2	100
	Правое	4,5	4	4	4,5				
(L1-L2-L3-L3-L2)-(L2-L1-L1-L2-L3)	Левое	4,5	4	4	4,5	4,5	4	3	33
	Правое	4	4	4,5	4,5				
Минимальное значение						4,5			33
* Принимается наибольшее из значений плеч.									

По результатам расчетов (см. таблицу 9.1Пр) для рассматриваемой осветительной установки парка наиболее рациональной является схема распределительной сети с порядком подключения групп осветительных приборов (L1-L2-L3-L3-L2)-(L2-L1-L1-L2-L3) с симметрией в плечах относительно точки подключения и фазы L2 (см. рисунок 9.4Пр).

Для схемы на рисунке 9.4Пр рассчитываются установленные мощности по формулам (9.12) – (9.22). Результаты представлены в таблице 9.2Пр.

Таблица 9.2Пр – Результаты расчета установленных мощностей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
Одна жесткая поперечина	9.12	$P_{уР} = 2 \cdot 0{,}046 \cdot (5 + 1) = 0{,}55$ кВт
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.13	$P_{уЛL1} = 0{,}55 \cdot 1 = 0{,}55$ кВт
подключенные к фазе L2	9.14	$P_{уЛL2} = 0{,}55 \cdot 2 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазе L3	9.15	$P_{уЛL3} = 0{,}55 \cdot 2 = 1{,}10$ кВт
Жесткие поперечины в правом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.16	$P_{уПL1} = 0{,}55 \cdot 2 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазе L2	9.17	$P_{уПL2} = 0{,}55 \cdot 2 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазе L3	9.18	$P_{уПL3} = 0{,}55 \cdot 1 = 0{,}55$ кВт
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	9.19	$P_{уL1} = 0{,}55 \cdot 3 = 1{,}65$ кВт
подключенные к фазе L2	9.20	$P_{уL2} = 0{,}55 \cdot 4 = 2{,}20$ кВт
подключенные к фазе L3	9.21	$P_{уL3} = 0{,}55 \cdot 3 = 1{,}65$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3	9.22	$P_{у\Sigma} = 1{,}65 + 2{,}20 + 1{,}65 = 5{,}5$ кВт

Пример 9.1В

Исходные данные по заданию В.

Номинальная мощность прожектора $P_{нОП}$ принимается равной 0,046 кВт по данным файла фотометрических измерений, отраженным в отчете по светотехническому расчету (приложение Б).

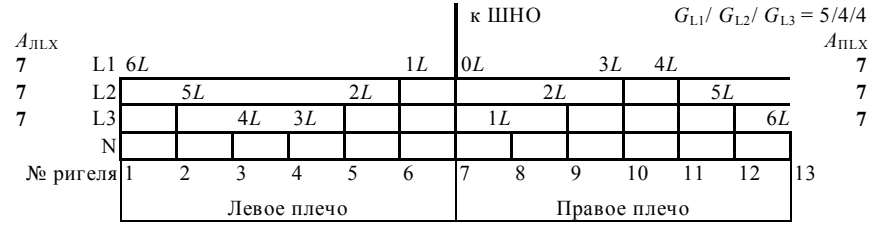
Приведенная к номинальному напряжению сети питания установленная мощность осветительного прибора со светодиодным модулем $P_у$ определяется по формуле (9.2):

$$P_у = 0{,}046 \text{ кВт}.$$

В виду отсутствия ограничений на размещение трансформаторной подстанции в курсовом проекте с целью снижения потерь напряжения и мощности в распределительной электросети подключение ответвления к ШНО осуществлено по центру парка.

Группа осветительных приборов, которые установлены на одной жесткой поперечине, подключается к одной фазе трехфазной магистральной линии распределительной сети.

Порядок подключения групп по длине магистральной линии по варианту L1-L2-L3-L3-L2-L1… с симметрией в плечах относительно точки подключения и фазы L2 представлен на рисунке 9.5Пр.



$A_{ЛLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX левого плеча ($A_{ЛL1}$ = 7; $A_{ЛL2}$ = 7; $A_{ЛL3}$ = 7),
$A_{ПLX}$ – коэффициент кратности момента нагрузки фазы LX правого плеча ($A_{ПL1}$ = 7; $A_{ПL2}$ = 7; $A_{ПL3}$ = 7).

Рисунок 9.5Пр – Схема порядка (L1-L2-L3-L3-L2-L1-L1)-(L3-L2-L1-L1-L2-L3) подключения групп осветительных приборов к трехфазной магистральной линии

Результаты расчета показателей для условий (9.11) приведены в таблице 9.3Пр.

Таблица 9.3Пр – Результаты расчета показателей для проверки условий наименьших потерь напряжения и мощности в трехфазной распределительной сети при подключении однофазных нагрузок

Порядок подключения однофазных нагрузок	Плечо парка	Коэффициент кратности момента нагрузки					Количество жестких поперечин		Неравномерность Н, %
		A_{L1}	A_{L2}	A_{L3}	A_{Lmax}		G_{Lmax}	G_{Lmin}	
					плеча	парка*			
(L1-L2-L3-L3-L2-L1)-L1-(L3-L2-L1-L1-L2-L3)	Левое	7	7	7	7	7	5	4	25
	Правое	7	7	7	7				
* Принимается наибольшее из значений плеч.									

Для схемы на рисунке 9.5Пр рассчитываются установленные мощности по формулам (9.12) – (9.22) с учетом отнесения жесткой поперечины №7 к левому плечу парка. Результаты представлены в таблице 9.4Пр.

Таблица 9.4Пр – Результаты расчета установленных мощностей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
Одна жесткая поперечина	9.12	$P_{уР}$ = 2 · 0,046 · (5 + 1) = 0,55 кВт
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.13	$P_{уЛL1}$ = 0,55 · 3 = 1,65 кВт
подключенные к фазе L2	9.14	$P_{уЛL2}$ = 0,55 · 2 = 1,10 кВт
подключенные к фазе L3	9.15	$P_{уЛL3}$ = 0,55 · 2 = 1,10 кВт

Продолжение таблицы 9.4Пр

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
Жесткие поперечины в правом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.16	$P_{уПL1} = 0,55 \cdot 2 = 1,10$ кВт
подключенные к фазе L2	9.17	$P_{уПL2} = 0,55 \cdot 2 = 1,10$ кВт
подключенные к фазе L3	9.18	$P_{уПL3} = 0,55 \cdot 2 = 1,10$ кВт
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	9.19	$P_{уL1} = 0,55 \cdot 5 = 2,75$ кВт
подключенные к фазе L2	9.20	$P_{уL2} = 0,55 \cdot 4 = 2,20$ кВт
подключенные к фазе L3	9.21	$P_{уL3} = 0,55 \cdot 4 = 2,20$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3	9.22	$P_{у\Sigma} = 2,75 + 2,20 + 2,20 = 7,15$ кВт

9.2 Расчетная нагрузка осветительной установки

9.2.1 Расчетная мощность

Пояснение к понятию "расчетная мощность"

Термин "расчетная мощность" в нормативных правовых актах по энергетике и электрификации однозначно не определен. Поэтому под этим понятием в литературе и нормативных источниках могут быть определены несколько различных величин по целевому назначению:

1) мощность, соответствующая такой неизменной токовой нагрузке, которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по наибольшему возможному тепловому воздействию (температуре нагрева или тепловому износу изоляции) на элементы системы электроснабжения [9.8, 9.9, 9.10];

2) мощность, соответствующая наибольшим возможным потерям напряжения в системе электроснабжения [9.8, 9.10];

3) мощность, соответствующая такой неизменной токовой нагрузке, которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по потерям электроэнергии [9.8, 9.10];

4) мощность, которая определяет потребление электроэнергии за фактический временной интервал.

Четвертая величина, как правило, представляет собой среднее значение нагрузки $P_{ср}$ на достаточно длительном интервале времени (сутки, месяц, год). Такая нагрузка не может определять случайные события наибольшего возможного нагрева проводов, кабелей, трансформаторов или наибольших возможных потерь напряжения в них.

Словосочетание "наибольшего возможного" в данном контексте необходимо отличать от воздействия максимальной (пиковой) мощности $P_{max\text{-}0}$ на очень коротком отрезке времени от секунд до нескольких минут и понимать как максимальное из средних значений P_{3To} на интервале усреднения, равном трем постоянным времени нагрева проводника T_0, т.е. для электросетей до 1кВ условно равном 30 минут [9.8, 9.9, 9.11, 9.14 п.1.3.2] (отдельно выделяют трансформаторы, для которых интервал усреднения составляет от 4,5 до 9 ч и рекомендуется принимать равным рабочей смене [9.11, п. 4.2]). При этом должно соблюдаться условие, что фактическая максимальная мощность $P_{max\text{-}0}$ может превышать P_{3To} (наибольшую возможную по целевому назначению 1 и 2) с вероятностью не более 0,05 [9.9].

Третья по целевому назначению мощность наиболее часто определяется как среднеквадратичное значение мощности $P_{ск}$ за интервал от часа до года. Этой величиной можно более точно по сравнению со средней мощностью на одинаковых интервалах времени характеризовать средний перегрев проводников, но не наибольший возможный.

Вышеизложенный материал позволяет составить неравенство

$$P_{max} \geq P_{3To}{}^{(1,2)} \geq P_{ск}{}^{(3)} \geq P_{ср}{}^{(4)},$$

где в скобках указаны пункты из первого абзаца пояснения.

Все элементы этого неравенства будут равны между собой только в одном случае, когда нагрузка не изменяется во времени. Поэтому для правильной идентификации величин в неравенстве необходимо вводить для них различные названия и обозначения.

Отметим, что мощности для определения потерь и потребления электроэнергии не всегда представляют собой среднеквадратичные и средние значения за достаточно большой интервал времени. В методах расчета потребления электроэнергии по годовому числу часов использования максимума нагрузки [9.12, рис. 3.4] и времени потерь (времени максимальных потерь) [9.11, п. 8.6] используется максимальное из средних значений мощности P_{30} на интервале усреднения 30 минут (принятая дискретность графика нагрузки предприятия [9.8]). Для расчетов стационарных процессов в энергетических системах применяется аналогичный минимальный период усреднения мощности, который, как правило, равен дискретности учета электроэнергии 30 минут [9.13]. Тогда $P_{max\text{-}30}$ будет равна максимальному из средних на указанном интервале усреднения и с некоторыми допущениями можно принять

$$P_{max\text{-}30} = P_{3To}{}^{(1,2)} = P_{30}{}^{(3,4)} = P_{р}.$$

Для указанных условий различные мощности по целевому назначению из первого абзаца пояснения равны между собой и равны значению расчетной мощности $P_{р}$, которое определяется в соответствии с [9.9, п. 2.10 и п. 3.2.1.7].

Исключение в равенстве указанных мощностей – это неравномерное распределение нагрузки по фазам (далее по тексту *неравномерная нагрузка фаз*) трехфазной системы электроснабжения однофазными электроприемниками, при котором

$$P_{max\text{-}30} = P_{30}{}^{(3,4)} \leq P_{р}.$$

Более подробное описание при неравномерной нагрузке фаз приведено далее.

В курсовом проекте под понятием расчетной мощности $P_{р}$ определим мощность, соответствующую наибольшим возможным температурам нагрева и потерям напряжения в проводах, кабелях, контактах и других токопроводящих элементах.

В общем случае расчетная мощность $P_р$ определяется по формуле

$$P_р = P_у K_с ,$$

где $K_с$ – коэффициент спроса группы электроприемников.

Коэффициент спроса – это отношение максимальной потребляемой активной мощности (в условиях эксплуатации электрооборудования) или расчетной нагрузки (при проектировании электроустановок) к установленной мощности [9.10, стр. 23 и стр. 50]. Значения коэффициентов спроса приводятся в справочниках.

Формула расчетной мощности имеет одинаковый вид для расчета однофазных и трехфазных нагрузок. Однако, при включении однофазных нагрузок в трехфазную сеть очень часто не получается сделать равномерное распределение нагрузки по фазам из-за разной мощности электроприемников, их количества, не кратного трем при одинаковой мощности, или разного расстояния от точки питания до точек подключения.

При наличии неравномерной нагрузки фаз использование средней расчетной мощности фазы P_{pLcp} нарушает физический смысл расчетной мощности, так как снижается наибольшее возможное воздействие на элемент системы энергоснабжения. Этот тезис можно представить неравенством

$$P_{pLcp} < P_{pLmax},$$

$$P_{pLcp} = P_{pL1} = P_{pL2} = P_{pL3} = P_р / 3,$$

где P_{pLmax} – мощность наиболее нагруженной фазы;
P_{pL1} – расчетная мощность фаз L1;
P_{pL2} – расчетная мощность фаз L2;
P_{pL3} – расчетная мощность фаз L3.

В зависимости от значения неравномерности нагрузки по фазам, результаты расчетов и выбора сечения проводов и кабелей, трансформаторов и других токопроводящих элементов могут быть удовлетворительными (с допустимой погрешностью расчета) или неудовлетворительными. В последнем случае будет иметь место преждевременный износ, а также возможно аварийный отказ из-за перегрева токоведущих элементов и их изоляции или недопустимого напряжения на зажимах электроприемников. Чтобы избежать неудовлетворительного результата, используют рекомендации в соответствии с [9.9].

Выписка из РТМ 36.18.32.4-92, подпункт 3.2.1.7.

При наличии группы однофазных электроприемников, которые распределены по фазам с неравномерностью не выше 15% по отношению к общей мощности трехфазных и однофазных электроприемников в группе, они могут быть представлены в расчете как эквивалентная группа трехфазных электроприемников с той же суммарной номинальной (установленной) мощностью. В случае превышения указанной неравномерности, номинальная (установленная) мощность эквивалентной группы трехфазных электроприемников принимается равной тройному значению мощности наиболее загруженной фазы.

Стоит обратить внимание, что мощность эквивалентной группы трехфазных электроприемников – это расчетная мощность по воздействию от конкретных критериев. В данном рассмотрении – по наибольшему возможному тепловому воздействию (температуре нагрева или тепловому износу изоляции) на элементы системы электроснабжения. Например, если в наружной осветительной установке неравномерность нагрузки фаз выше 15 % и применяется условие тройного значения мощности наиболее нагруженной фазы для определения эквивалентной мощности группы трехфазных электроприемников, то значение этой мощности превышает фактическую установленную мощность всех осветительных приборов. Использование в данном случае эквивалентной мощности для расчета потребления или потерь электроэнергии приведет к завышению результатов.

Замена однофазных электроприемников с неравномерным распределением по фазам на эквивалентную группу трехфазных в соответствии с [9.9] приведет к занижению потерь напряжения в сети, так как при такой замене ток и, следовательно, потери напряжения в нулевом проводе будут равны нулю.

Необходимо отметить, что по критерию потерь напряжения в сети неравномерность нагрузок фаз определяется не только неравенством значений нагрузок (суммарных мощностей однофазных электроприемников для каждой фазы), но и неравенством их моментов. Этот тезис более подробно будет пояснен далее.

Значения P_{yLmax} и P_{yLmin} определяются по результатам расчета формул (9.13) – (9.21) отдельно для каждого плеча и всего парка (таблица 9.2).

Таблица 9.2 – Формулы для расчета неравномерности распределения нагрузки осветительных приборов по фазам трехфазной сети

Показатель	Формула	Номер формулы
Установленная мощность в наиболее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	$P_{yЛLmax} = \max\{P_{yЛL1}, P_{yЛL2}, P_{yЛL3}\}$	9.23
- правого плеча парка	$P_{yПLmax} = \max\{P_{yПL1}, P_{yПL2}, P_{yПL3}\}$	9.24
- всего парка	$P_{yLmax} = \max\{P_{yL1}, P_{yL2}, P_{yL3}\}$	9.25
Установленная мощность в наименее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	$P_{yЛLmin} = \min\{P_{yЛL1}, P_{yЛL2}, P_{yЛL3}\}$	9.26
- правого плеча парка	$P_{yПLmin} = \min\{P_{yПL1}, P_{yПL2}, P_{yПL3}\}$	9.27
- всего парка	$P_{yLmin} = \min\{P_{yL1}, P_{yL2}, P_{yL3}\}$	9.28

Продолжение таблицы 6.2

Показатель	Формула	Номер формулы
Неравномерность[1]:		
- левого, правого плеча парка	$Н_Л = Н_П = (P_{уЛLmax} - P_{уЛLmin})/P_{уЛLmin} \cdot 100\%$[2]	9.29
- всего парка	$Н_\Sigma = (P_{уLmax} - P_{уLmin})/P_{уLmin} \cdot 100\%$	9.30

Примечания.
1) При включении всех осветительных приборов на жесткой поперечине в одну фазу и чередовании подключения фаз L1-L2-L3-L3-L2-L1 (L3-L2-L1-L1-L2-L3) или L1-L2-L3-L1-L2-L3 нагрузки жестких поперечин к трехфазной системе распределительной сети (магистральному кабелю) неравномерности $Н_Л$, $Н_П$ или $Н_\Sigma$ превышают 15 % при количестве жестких поперечин до 20 включительно и не кратном 3.
2) Неравномерности нагрузки фаз левого и правого плеча равны при одинаковой установленной мощности на жестких поперечинах, их количестве и чередовании фаз подключения в плечах L1-L2-L3-L3-L2-L1 (L3-L2-L1-L1-L2-L3). Такую схему подключения рекомендуется принять в курсовом проекте в виду отсутствия ограничений на размещение трансформаторной подстанции и с целью снижения потерь напряжения и мощности в электросети.

Расчетная мощность при включении однофазных электроприемников (осветительных приборов):

а) в однофазную сеть или в фазу LX многофазной сети P_{pLX}, кВт

$$P_{pLX} = P_{уLX} K_с, \quad (9.31)$$

б) в трехфазную сеть с равномерной нагрузкой фаз $P_{p\Sigma}$, кВт

$$P_{p\Sigma} = P_{у\Sigma} K_с, \quad (9.32)$$

в) в трехфазную сеть с неравномерной нагрузкой фаз и заменой на эквивалентную трехфазную нагрузку по критерию теплового воздействия на токопроводящие элементы [9.9, п. 3.2.1.7] $P_{p\Sigma}$, кВт:

- для неравномерности не выше 15 %

$$P_{p\Sigma} = P_{у\Sigma} K_с, \quad (9.33)$$

- для неравномерности выше 15 %

$$P_{p\Sigma} = 3P_{уLmax} K_с, \quad (9.34)$$

где $P_{уLX}$ – установленная мощность приборов в фазе LX, кВт;
$K_с$ – коэффициент спроса.

Коэффициент спроса для осветительной установки наружной территории (железнодорожного парка) принимается равным 1 [9.14, п. 6.3.39]. На основе общих формул (9.31) – (9-34) разработаны

формулы для частного случая осветительной установки железнодорожного парка (таблица 9.3).

Пояснение к расчету K_c

Максимальная потребляемая активная мощность $P_{max\text{-}30}$ для рассматриваемой осветительной установки железнодорожного парка будет в режиме включения рабочего освещения во всех междупутьях и проходах с полевой стороны, т.е. включении всех осветительных приборов на 100 % светового потока и установленной мощности. Тогда коэффициент спроса

$$K_c = P_{max\text{-}30} / P_y = 1.$$

Использование в формуле расчетной мощности $P_р$ взамен $P_{max\text{-}30}$ может давать некорректный результат для коэффициента спроса в случае приведения однофазных нагрузок при неравномерности выше 15 % к эквивалентным трехфазным нагрузкам:

$$K_c = P_р / P_y = 3P_{yLmax} / P_y > 1.$$

Таблица 9.3 – Формулы расчетных мощностей осветительной установки и ее частей

Осветительная установка, часть	Формула	Номер формулы
Одна жесткая поперечина	$P_{рР} = P_{уР} K_c$	9.35
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	$P_{рЛL1} = P_{уЛL1} K_c$	9.36
подключенные к фазе L2	$P_{рЛL2} = P_{уЛL2} K_c$	9.37
подключенные к фазе L3	$P_{рЛL3} = P_{уЛL3} K_c$	9.38
подключенные к фазам L1, L2, L3 (эквивалентная трехфазная нагрузка)	если $Н_Л \le 15$ % $P_{рЛ} = P_{рЛL1} + P_{рЛL2} + P_{рЛL3}$, если $Н_Л > 15$ % $P_{рЛ} = 3P_{уЛLmax} K_c$,	9.39
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	$P_{рL1} = P_{уL1} K_c$	9.40
подключенные к фазе L2	$P_{рL2} = P_{уL2} K_c$	9.41
подключенные к фазе L3	$P_{рL3} = P_{уL3} K_c$	9.42
подключенные к фазам L1, L2, L3 (эквивалентная трехфазная нагрузка)	если $Н_Σ \le 15$ % $P_{рΣ} = P_{рL1} + P_{рL2} + P_{рL3}$, если $Н_Σ > 15$ % $P_{рΣ} = 3P_{уLmax} K_c$,	9.43

Примечание.
1. Формула (9.35) справедлива для включения всех осветительных приборов на жесткой поперечине в одну фазу (рекомендуется в курсовом проекте). В случае подключения осветительных приборов на жесткой поперечине к трем фазам необходимо использовать формулы аналогичные (9.39) для определения эквивалентной трехфазной нагрузки.

Пример 9.2.1А

Исходные данные по заданию А.

Расчетные значения установленной мощности осветительной установки – по таблице 9.2Пр.

Схема порядка подключения групп осветительных приборов к трехфазной распределительной линии согласно рисунку 9.4Пр. При такой схеме неравномерности нагрузки Н представлены в таблице 9.5Пр.

Таблица 9.5Пр – Неравномерности распределения нагрузки осветительных приборов по фазам трехфазной сети

Показатель	Номер формулы	Формула
Установленная мощность в наиболее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	9.23	$P_{уЛLmax} = \max\{0,55; 1,10; 1,10\} = 1,10$
- правого плеча парка	9.24	$P_{уПLmax} = \max\{1,10, 1,10, 0,55\} = 1,10$
- всего парка	9.25	$P_{уLmax} = \max\{1,65; 2,20; 1,65\} = 2,20$
Установленная мощность в наименее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	9.26	$P_{уЛLmin} = \min\{0,55; 1,10; 1,10\} = 0,55$
- правого плеча парка	9.27	$P_{уПLmin} = \min\{1,10, 1,10, 0,55\} = 0,55$
- всего парка	9.28	$P_{уLmin} = \min\{1,65; 2,20; 1,65\} = 1,65$
Неравномерность:		
- левого, правого плеча парка	9.29	$Н_Л = Н_П = (1,10 – 0,55)/0,55 \cdot 100\% = 100\ \%$
- всего парка	9.30	$Н_Σ = (2,20 – 1,65)/1,65 \cdot 100\% = 33\ \%$

При определении расчетных мощностей осветительной установки территории железнодорожного парка принимаем коэффициент спроса $K_с$, равным единице. Результаты расчета приведены в таблице 9.6Пр.

Таблица 9.6Пр – Результаты расчета расчетных мощностей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
Одна жесткая поперечина	9.35	$P_{рР} = 0,55 \cdot 1 = 0,55$ кВт
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.36	$P_{рЛL1} = 0,55 \cdot 1 = 0,55$ кВт
подключенные к фазе L2	9.37	$P_{рЛL2} = 1,10 \cdot 1 = 1,10$ кВт
подключенные к фазе L3	9.38	$P_{рЛL3} = 1,10 \cdot 1 = 1,10$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3 (эквивалентная трехфазная нагрузка)	9.39	при $Н_Л > 15$ %, $P_{рЛ} = 3 \cdot 1,10 \cdot 1 = 3,30$ кВт
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	9.40	$P_{рL1} = 1,65 \cdot 1 = 1,65$ кВт
подключенные к фазе L2	6.41	$P_{рL2} = 2,20 \cdot 1 = 2,20$ кВт
подключенные к фазе L3	6.42	$P_{рL3} = 1,65 \cdot 1 = 1,65$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3	6.43	при $Н_Σ > 15$ %, $P_{рΣ} = 3 \cdot 2,20 \cdot 1 = 6,60$ кВт

Пример 9.2.1В

Исходные данные по заданию В.

Расчетные значения установленной мощности осветительной установки – по таблице 9.4Пр.

Схема порядка подключения групп осветительных приборов к трехфазной распределительной линии согласно рисунку 9.5Пр. При такой схеме неравномерности нагрузки Н представлены в таблице 9.7Пр.

Таблица 9.7Пр – Неравномерности распределения нагрузки осветительных приборов по фазам трехфазной сети

Показатель	Номер формулы	Формула
Установленная мощность в наиболее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	9.23	$P_{\text{уЛLmax}} = \max\{1{,}65;\ 1{,}10;\ 1{,}10\} = 1{,}65$
- правого плеча парка	9.24	$P_{\text{уПLmax}} = \max\{1{,}10,\ 1{,}10,\ 1{,}10\} = 1{,}10$
- всего парка	9.25	$P_{\text{yLmax}} = \max\{2{,}75;\ 2{,}20;\ 2{,}20\} = 2{,}75$
Установленная мощность в наименее нагруженной фазе:		
- левого плеча парка	9.26	$P_{\text{уЛLmin}} = \min\{1{,}65;\ 1{,}10;\ 1{,}10\} = 1{,}10$
- правого плеча парка	9.27	$P_{\text{уПLmin}} = \min\{1{,}10,\ 1{,}10,\ 1{,}10\} = 1{,}10$
- всего парка	9.28	$P_{\text{yLmin}} = \min\{2{,}75;\ 2{,}20;\ 2{,}20\} = 2{,}20$
Неравномерность:		
- левого, правого плеча парка	9.29	$Н_{Л} = (1{,}65 – 1{,}10)/1{,}10 \cdot 100\% = 50\ \%$, $Н_{П} = (1{,}10 – 1{,}10)1{,}10 \cdot 100\% = 0\ \%$
- всего парка	9.30	$Н_{\Sigma} = (2{,}75 – 2{,}20)/2{,}20 \cdot 100\% = 25\ \%$

При определении расчетных мощностей осветительной установки территории железнодорожного парка принимаем коэффициент спроса $K_{\text{с}}$, равным единице. Результаты расчета приведены в таблице 9.8Пр.

Таблица 9.8Пр – Результаты расчета расчетных мощностей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
Одна жесткая поперечина	9.35	$P_{\text{рР}} = 0{,}55 \cdot 1 = 0{,}55$ кВт
Жесткие поперечины в левом плече парка:		
подключенные к фазе L1	9.36	$P_{\text{рЛL1}} = 1{,}65 \cdot 1 = 1{,}65$ кВт
подключенные к фазе L2	9.37	$P_{\text{рЛL2}} = 1{,}10 \cdot 1 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазе L3	9.38	$P_{\text{рЛL3}} = 1{,}10 \cdot 1 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3 (эквивалентная трехфазная нагрузка)	9.39	при $Н_{Л} > 15\ \%$ $P_{\text{рЛ}} = 3 \cdot 1{,}65 \cdot 1 = 4{,}95$ кВт
Жесткие поперечины в правом плече парка:		
подключенные к фазе L1	Аналог. 9.36	$P_{\text{рПL1}} = 1{,}10 \cdot 1 = 1{,}10$ кВт,

Продолжение таблицы 9.8Пр

Осветительная установка, часть	Расчетная формула	Расчет
подключенные к фазе L2	Аналог. 9.37	$P_{рПL2} = 1{,}10 \cdot 1 = 1{,}10$ кВт
подключенные к фазе L3	Аналог. 9.38	$P_{рПL3} = 1{,}10 \cdot 1 = 1{,}10$ кВт,
подключенные к фазам L1, L2, L3 (эквивалентная трехфазная нагрузка)	Аналог. 9.39	$P_{рП} = 1{,}10 + 1{,}10 + 1{,}10 = 3{,}30$ кВт.
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка:		
подключенные к фазе L1	9.40	$P_{рL1} = 2{,}75 \cdot 1 = 2{,}75$ кВт
подключенные к фазе L2	9.41	$P_{рL2} = 2{,}20 \cdot 1 = 2{,}20$ кВт
подключенные к фазе L3	9.42	$P_{рL3} = 2{,}20 \cdot 1 = 2{,}20$ кВт
подключенные к фазам L1, L2, L3	9.43	при $Н_{\Sigma} > 15$ % $P_{р\Sigma} = 3 \cdot 2{,}75 \cdot 1 = 8{,}25$ кВт

9.2.2 Расчетный ток

Для расчета режимов электросети осветительной установки и выбора элементов этой электросети более удобно использовать нагрузку в виде расчетного тока, который можно определить по формулам приведенным в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Формулы расчетных токов в фазных (линейных) и нулевых рабочих проводниках цепей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Применение для расчетов	Формула	Номер формулы
Одна пара осветительных приборов	Однофазная нагрузка	$I_{р2ОПL} = \frac{2P_{у}}{U_{нС}\,\lambda}$	9.44
Одна жесткая поперечина	Однофазная нагрузка	$I_{рPL} = \frac{P_{рP}}{U_{нС}\,\lambda}$	9.45
Жесткие поперечины в левом плече парка (для правого плеча аналогичные формулы с обозначением величин индексом "П")	Трехфазная нагрузка при k_{I3}:	$I_{рЛL} = \frac{P_{рЛ}}{3U_{нС}\,\lambda}$	9.46
	- до 15 %, $Н_{Л} \le 15$%	$I_{рЛN} = 0{,}5I_{рЛL}$	9.47
	- до 15 %, $Н_{Л} > 15$%	$I_{рЛN} = \sqrt{I_{рPL}^{2} + 0{,}25I_{рЛL}^{2}}$	
	- от 15 до 33 %	$I_{рЛN} = I_{рЛL}$	
	- свыше 33 %	$I_{рЛN} = 1{,}73I_{рЛL}$	

Продолжение таблицы 9.4

Жесткие поперечины всего железнодорожного парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3}:	$I_{p\Sigma L} = \frac{P_{p\Sigma}}{3U_{нС}\lambda}$	9.48
	- до 15 %, $H_\Sigma \le 15\%$	$I_{p\Sigma N} = 0{,}5I_{p\Sigma L}$	9.49
	- до 15 %, $H_\Sigma > 15\%$	$I_{p\Sigma N} = \sqrt{I_{pPL}{}^2 + 0{,}25I_{p\Sigma L}{}^2}$	
	- от 15 до 33 %	$I_{p\Sigma N} = I_{p\Sigma L}$	
	- свыше 33 %	$I_{p\Sigma N} = 1{,}73I_{p\Sigma L}$	

Примечания.

1. λ – коэффициент мощности при несинусоидальной нагрузке (пояснения по применению этой характеристики приведены далее в тексте).
2. k_{I3} – коэффициент третьей гармонической составляющей тока (пояснения по определению и применению этой характеристики приведены далее в тексте).

В условиях и коэффициентах формул (9.47), (9.49) коэффициент k_{I3} определяется относительно действующего значения фазного тока согласно примерам расчета в ГОСТ Р 50571.5.52-2011/ МЭК 60364-5-52:2009 [9.15, приложение Е]. Погрешность определения тока в нулевом проводнике при таком подходе оценивается менее 10 % в диапазоне k_{I3} до 33 % (см. пояснения далее).

3. Индекс L в обозначениях соответствует току в фазном проводнике, N – в нулевом рабочем проводнике;
4. Формула (9.44) применяется для определения расчетного тока двух светильников, которые устанавливаются на одном брусе (в одном междупутье на жесткой поперечине) и, как правило, подключаются к одной монтажной коробке.
5. Формула (9.45) справедлива для включения всех осветительных приборов на жесткой поперечине в одну фазу. В случае подключения осветительных приборов на жесткой поперечине к трем фазам необходимо вводить коэффициент 1/3.
6. Формулы (9.47) и (9.49) при неравномерности $H_Л > 15$ % включает две составляющие тока в нулевом проводе:
- ток из-за неравномерности нагрузки – результат геометрической суммы первых составляющих (частота 50 Гц) фазных токов;
- ток обусловленный гармоническими составляющими, кратными трем.

Ток в нулевом проводнике, обусловленный неравномерностью нагрузки, соответствует схемам подключения однофазных нагрузок к магистральной линии электропередачи при условии, что количество подключений к наиболее нагруженной и наименее нагруженной фазе отличается на единицу, т.е.

$$G_{Lmax} - G_{Lmin} = 1.$$

Такие схемы рассмотрены в примерах пункта 9.1.

Погрешность расчетов тока в нулевом проводнике без учёта составляющей из-за неравномерности нагрузки составляет до 5 % для случаев с k_{I3} до 15 % и $H_Л \le 15\%$, а так же с k_{I3} более 15 %. Исключение составляет случай с k_{I3} от 15 до 33 % и $H_Л$ равным 100% с погрешностью результатов – около 10 %.

7. В формулах (9.47), (9.49) коэффициенты соответствуют верхнему значению диапазона k_{I3}, что согласуется с требованиями СН 4.04.01-2019 [9.16, пункт 10.9] и ПУЭ [9.14, пункт 6.2.8] (см. пояснение далее).

Коэффициент мощности в формулах (9.44) – (9.46), (9.48) обозначен λ, так как осветительные приборы, в том числе светодиодные, имеют

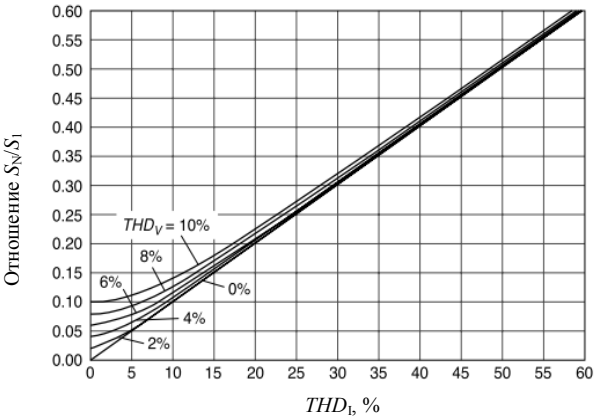
значительный состав высших гармонических составляющих в потребляемом токе.

Полная мощность S для нелинейных нагрузок включает не только реактивную мощность Q, но и мощность искажений T

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2},$$

Мощность искажений характеризует степень различия в формах кривых напряжения и тока. Если сопротивление цепи активное (линейное), тогда отсутствует фазовый сдвиг на основной частоте между кривыми напряжения и тока, следовательно, мощность Q равна нулю. В варианте линейной нагрузки мощность T также равна нулю, потому что формы кривых тока и напряжения подобны.

Представление мощности искажений единой характеристикой не позволяет решить ряд важных задач, например, подбора фильтро-компенсирующих устройств. Для этих задач можно использовать метод изложенный в IEEE 1459 [9.17], в котором T заменена на S_N (nonfundamental apparent power) из трех составляющих. Автором этого метода А. Э. Эмануэлем оценена погрешность определения мощности S_N без учета гармонических искажений напряжения THD_V [9.18, рис. 4.10, 4.11]. При допустимом THD_V до 8% по ГОСТ 32144 [9.19, табл. 4] и в диапазоне THD_I более 15 % погрешность не будет превышать 15 % (рисунок 9.1). Такую погрешность можно допустить в большинстве инженерных расчетов с учетом относительно низкой достоверности исходной информации по коэффициенту THD_V на этапах проектирования новых систем электроснабжения.



S_N – неосновная полная мощность;
S_1 – основная полная мощность для частоты 50 Гц;
THD_I – суммарный коэффициент гармонических искажений тока;
THD_V – суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения.

Рисунок 9.1 – Зависимость отношения неосновной и основной полных мощностей

При допущении, что форма напряжения в энергосистеме синусоидальна, т.е. отсутствуют гармонические составляющие напряжения, активная мощность P определяется по формуле

$$P = P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = UI_1 \cos\varphi_1.$$

Индекс 1 обозначает, что величина характеризует первую гармоническую составляющую, соответствующую частоте 50 Гц.

Так как было принято допущение, что напряжение имеет синусоидальную форму, то действующее значение напряжения в электросети U и первой гармонической составляющей U_1 равны. Коэффициент мощности λ (иногда обозначается PF – power factor) при указанном допущении определяется по выражению

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{UI_1 \cos\varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I}\cos\varphi_1 = k_и \cos\varphi_1 ,$$

Напомним, что отношение действующего значения тока первой гармонической составляющей к действующему значению тока нагрузки I_1/I в Теоретических основах электротехники и Основах теории цепей называется коэффициентом искажения $k_и$. Однако, в последние годы чаще применяется коэффициент суммарных гармонических искажений тока THD_I в связи с унификацией подходов путем гармонизации международных стандартов.

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h / I_1)^2},$$

где I_h – гармоническая составляющая тока порядка h, А;

I_1 – действующее (среднеквадратичное) значение тока на основной частоте, А.

Выразим коэффициент мощности λ через THD_I

$$\lambda = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} .$$

Значение коэффициента мощности λ практически все производители осветительных приборов указывают в документации. В отличие от информации по искажениям – значения THD_I и его составляющих, например, коэффициент третьей гармонической составляющей тока k_{I3} ($I_3/I_1 \cdot 100\%$). Такая информация крайне редко доводится производителем до потребителя. Следует помнить, что гармонические искажения тока в электросетях могут иметь ряд негативных последствий по тепловому воздействию и повышенным потерям напряжения из-за увеличения значений токов в фазных и нулевых проводниках. Наибольшие негативные последствия обусловлены протеканием в нулевом проводнике трехфазной сети гармонических составляющих, кратных трем, которые в трех фазах имеют одинаковую векторную направленность. Результирующий ток этих составляющих равен алгебраической сумме, т.е. для реальных электросетей может превышать фазный ток до максимально возможного значения в 1,73 раза.

В отсутствие достоверной информации о величинах THD_I и k_{I3} для инженерных расчетов необходимы хотя бы оценочные значения этих величин.

В таблице 9.5 приведены наибольшие гармонические искажения тока, которые допускаются для осветительных приборов. Применение этих значений целесообразно при отсутствии данных производителя по указанным характеристикам и обеспечения высокого уровня надежности электроснабжения объекта.

Таблица 9.5 – Нормы эмиссии гармонических составляющих тока для осветительных приборов по ГОСТ IEC 61000-3-2 [9.20]

Порядок гармоники *h*	Значение при активной входной мощности			
	> 25 Вт	От 5 до 25 Вт [1]		
	в %	мА/Вт (%) [2]	%	%
2	2	-	5	-
3	27[3]	3,4 (62,4)	35	86
5	10	1,9 (34,9)	25	61
7	7	1,0 (18,3)	30	-
9	5	0,5 (9,2)	20	-
11	3	0,35 (6,4)	20	-
нечетные от 13 до 39	3	3,85/*h* (70,64/*h*)	-	-
Итого THD_I не более	32 %	76 %[4]	70 %	105 %[5]
Суммарные искажения от гармоник, кратных трем	28 %	63 %	40 %	86 %

Примечания.
1) В столбцах 3 – 5 значения могут не совпадать, так как эти предельные значения относятся к осветительному оборудованию с различной формой потребляемого тока [9.20, п.7.4.3].
2) Значения в процентах рассчитаны при $\lambda = 0{,}8$ и $\cos\varphi \approx 1$.
3) Норма определяется на основе предположения, что $\lambda \geq 0{,}90$.
4) Наибольшее значение THD_I соответствует $\lambda = 0{,}8$ и $\cos\varphi \approx 1$.
5) Соответствует $\lambda = 0{,}7$ при $\cos\varphi \approx 1$.

В большинстве практических задач проектирования или модернизации системы электроснабжения более целесообразно использовать средние значения 3-й гармонической составляющей тока для осветительных приборов [9.21, рис. N56; 6.22, табл. 2.4; 9.23] (таблица 9.6).

Даже типовые значения 3-й гармонической составляющей тока осветительных приборов имеют широкий разброс при наличии ЭПРА. Поэтому рекомендуется провести косвенную оценку этой характеристики на основе представляемого производителем показателя коэффициента мощности λ (иногда в документации светильников с ЭПРА коэффициент мощности указывается $\cos\varphi$, что не корректно).

На рисунке 9.2 представлена зависимость коэффициента мощности на основной частоте $\cos\varphi$ от коэффициента мощности с учетом несинусоидальности тока λ для светодиодного осветительного прибора мощностью более 25 Вт.

По известному значению λ определяется $\cos\varphi$ и далее THD_I

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{\cos\varphi_1}{\lambda}\right)^2 - 1} \cdot 100\%.$$

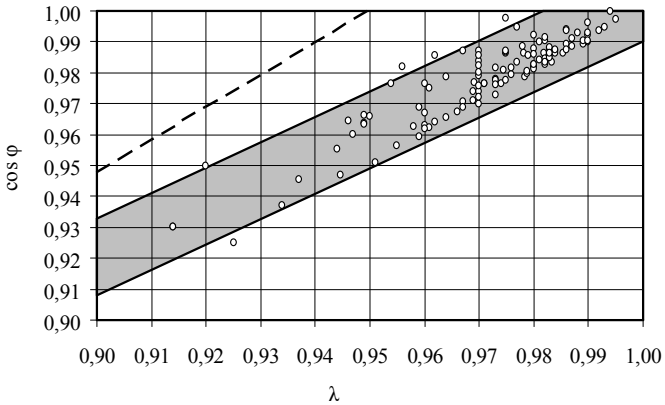
Таблица 9.6 – Типовые значения 3-й гармонической составляющей тока осветительных приборов

Тип источника света	Типовая мощность осветительного прибора, Вт	ПРА	Третья гармоническая составляющая тока, % [1)]
Лампа накаливания	100	Диммер (фазовое регулирование)	От 5 до 45 %
Люминесцентная лампа	100	ЭмПРА без емкостной компенсации	10 %
		ЭмПРА с емкостной компенсацией	20 %
	> 25	ЭПРА	от 5 до 27 %
Разрядная лампа высокого давления	100	ЭмПРА без емкостной компенсации	10 %
		ЭмПРА с емкостной компенсацией	20 %
Светодиоды	> 25	ЭПРА	от 5 до 27 %

Коэффициент мощности на частоте 50 Гц определяется:

а) по верхней границе статистической зависимости (на основе выборки данных с сайта lumen2b.ru, рубрики "Проверено [Lumen]");

б) по зависимости с постоянным THD_I, равным 33% – штриховая линия на рисунке 9.2.



Штриховая линия – зависимость с постоянным THD_I, равным 33%, Закрашенное поле – статистическая зависимость в границах доверительного интервала с вероятностью 95 %

Рисунок 9.2 – Зависимость составляющих коэффициента мощности светодиодного осветительного прибора мощностью более 25 Вт

Штриховая линия показывает, что при коэффициенте λ более 0,95 коэффициент THD_I, следовательно, и значение коэффициента 3-й гармонической составляющей тока будет менее 33 %. Аналогичная точка косвенного определения 15-ти процентного значения k_{I3} соответствует λ примерно равному 0,99.

В инженерных расчетах для снижения трудоемкости принято допущение, что третья гармоническая составляющая тока определяется в процентах от фазного тока I, а не от значения тока основной частоты (первой гармонической составляющей) I_1. Эти величины обычно отличаются менее чем на 10 %. Для примера на рисунке 9.3 представлена зависимость при допущении, что фазный ток состоит только из первой и третьей гармонических составляющих. При I_3/I_1 равном 33 %, отличие фазного тока I от I_1 составляет примерно 6 %.

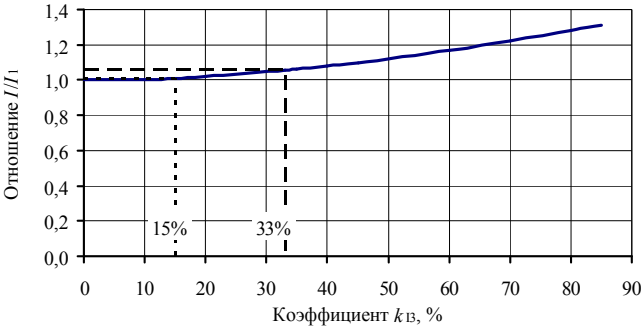


Рисунок 9.3 – Оценка отличия между фазным током и его первой гармонической составляющей

В формулах (9.47), (9.49) коэффициенты для определения тока в нулевом рабочем проводнике при наличии гармонических составляющих фазного тока, кратных трем (в инженерных расчетах допускается учитывать только третью гармоническую составляющую), соответствуют верхнему значению указанного диапазона k_{I3}, что согласуется с требованиями СН 4.04.01-2019 [9.16, пункт 10.9] и ПУЭ [9.14, пункт 6.2.8].

В случаях наличия достоверной информации о значении k_{I3} для осветительных приборов с целью снижения расходов на кабель и/или провод рекомендуется в формулах (9.47), (9.49) использовать более точные отношения токов в нулевом и фазном проводниках по рисунку 9.4.

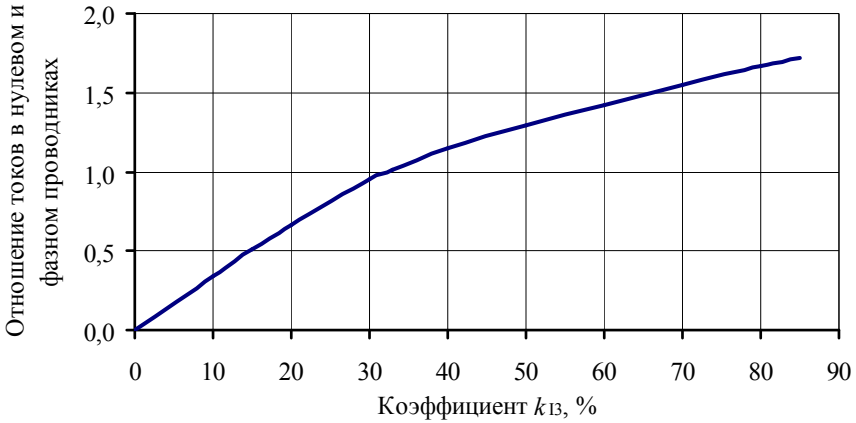


Рисунок 9.4 – Зависимость нагрузки нулевого проводника от тока третьей гармоники [9.21, стр.266, 425]

Выписки из нормативно-правовых источников о поправочных коэффициентах при несинусоидальных токах

Выписка из СН 4.04.01-2019, п. 10.9.

При наличии в трехфазной сети, в том числе и симметрично загруженной, нелинейной нагрузки с несинусоидальными токами высших гармоник, источниками которых являются, например, информационно-вычислительная техника, разнообразное оборудование обработки информации, кассовые аппараты, разрядные лампы, стиральные машины и т.д., следует учитывать, что в нулевом рабочем проводнике протекают токи, превышающие ток в фазном проводе приблизительно в 1,73 раз.

Для разрядных ламп в трехфазных пятипроводных распределительных и групповых линиях сечение нулевых рабочих проводников целесообразно принимать в соответствии с ПУЭ.

Выписка из ПУЭ 6-е издание, п. 6.2.8

6.2.8. Сечение нулевых рабочих проводников трехфазных питающих и групповых сетей с лампами люминесцентными, ДРЛ, ДРИ и натриевыми должно выбираться:

1) для участков сети, по которым проходит ток от ламп с компенсированными пускорегулировочными аппаратами, – по рабочему току наиболее нагруженной фазы;

2) для участков сети, по которым проходит ток от ламп с некомпенсированными пускорегулировочными аппаратами, – близким к 50 % сечения фазного провода.

Пример 9.2.2А

Исходные данные по заданию А. Номинальное напряжение сети $U_{нС}$ равно 230 В.

Данные по установленным и расчетным мощностям из примеров 9.1А и 9.2.1А.

Для определения коэффициента мощности λ для осветительного прибора Доломант-Т СОКр-5-120-02 был сделан запрос производителю и им представлена информация, что в светильнике установлен ЭПРА XLG-50 [9.24] со следующими характеристиками для напряжения сети 230 В:

– номинальная выходная мощность – 50 Вт;
– КПД при загрузке от 80 до 90 % – 0,9;
– коэффициент мощности λ при загрузке от 80 до 90 % – примерно 0,97;
– коэффициент THD_I при загрузке от 80 до 90 % – примерно 5 %.

Проверка правильности выбора диапазона загрузки ЭПРА при номинальной мощности осветительного прибора $P_у$ равной 0,046 кВт (см. пример 9.1А):

$$k_{зЭПРА} = 0{,}046 / (0{,}050 / 0.9) \cdot 100\ \% = 82{,}8\ \%,$$

соответствует диапазону от 80 до 90 %.

По анализу выше представленных характеристик ЭПРА можно сделать вывод, что коэффициент третьей гармонической составляющей тока k_{I3} для осветительного прибора СОКр-5-120-02 будет меньше коэффициента THD_I и находиться в диапазоне до 15 %.

При указанных исходных данных определяются расчетные токи в проводниках осветительной установки железнодорожного парка (таблица 9.9Пр).

Таблица 9.9Пр – Расчетные токи в фазных и нулевых рабочих проводниках цепей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Применение для расчетов	Номер формулы	Расчёт
Одна пара осветительных приборов	Однофазная нагрузка	9.44	$I_{p2ОПL} = \frac{2 \cdot 0{,}046}{0{,}23 \cdot 0{,}97} = 0{,}41$ А
Одна жесткая поперечина	Однофазная нагрузка	9.45	$I_{pPL} = \frac{0{,}55}{0{,}23 \cdot 0{,}97} = 2{,}47$ А
Жесткие поперечины в левом плече парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3} до 15 %, $H_Л > 15\%$ (см. пример 9.2.1А)	9.46	$I_{pЛL} = \frac{3{,}30}{3 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}97} = 4{,}93$ А
		9.47	$I_{pЛN} = \sqrt{2{,}47^2 + 0{,}25 \cdot 4{,}93^2} = 3{,}49$ А
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3} до 15 %, $H_Σ > 15\%$ (см. пример 6.2.1А)	9.48	$I_{pΣL} = \frac{6{,}60}{3 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}97} = 9{,}86$ А
		9.49	$I_{pΣN} = = \sqrt{2{,}47^2 + 0{,}25 \cdot 9{,}86^2} = 5{,}51$ А

Пример расчета при наличии достоверной информации о коэффициенте k_{I3}

В примере 9.2.2А для определения тока в точке подключения нулевого проводника магистральной линии левого плеча парка использована формула (9.47), которая соответствует k_{I3} равному 15 %. Ток в этом проводнике, обусловленный гармоническими составляющими, кратными трем, равен половине тока в фазном проводнике (см. рисунок 9.4).

В рассматриваемом случае имеется достоверная информация, что k_{I3} не более 5 % (k_{I3} всегда меньше THD_I), тогда формулу (9.47) с учетом соответствующего коэффициента по рисунку 9.4 можно записать:

$$I_{pЛN} = \sqrt{I_{pPL}{}^2 + (0{,}15 I_{pЛL})^2},$$

$$I_{pЛN} = \sqrt{2{,}47^2 + (0{,}15 \cdot 4{,}93)^2} = 2{,}58\ \text{А}.$$

Аналогично изменится формула (9.49) расчёта для осветительной нагрузки всего железнодорожного парка:

$$I_{\text{p}\Sigma\text{N}} = \sqrt{I_{\text{p}\Sigma\text{L}}{}^2 + (0{,}15 I_{\text{p}\Sigma\text{L}})^2},$$

$$I_{\text{p}\Sigma\text{N}} = \sqrt{2{,}47^2 + (0{,}15 \cdot 9{,}86)^2} = 2{,}88 \text{ А}.$$

Пример 9.2.2В

Исходные данные по заданию А. Номинальное напряжение сети $U_{\text{нС}}$ равно 230 В.

Данные по установленным и расчетным мощностям из примеров 9.1В и 9.2.1В.

Коэффициент мощности λ для осветительного прибора Доломант-Т СОКр-5-120-02 равен 0,95 (для мощности более 25 Вт) по паспорту [9.25]. В паспорте не содержится информации об величинах THD_{I} и/или k_{I3}, поэтому принимаем k_{I3} в диапазоне от 15 до 33 % согласно наихудшему варианту по таблицам (9.5), (9.6) и рисунку 9.2.

При указанных исходных данных определяются расчетные токи в проводниках осветительной установки железнодорожного парка (таблица 9.10Пр).

Таблица 9.10Пр – Расчетные токи в фазных и нулевых рабочих проводниках цепей осветительной установки

Осветительная установка, часть	Применение для расчетов	Номер формулы	Расчёт
Одна пара осветительных приборов	Однофазная нагрузка	9.44	$I_{\text{p2ОПL}} = \frac{2 \cdot 0{,}046}{0{,}23 \cdot 0{,}95} = 0{,}42$ А
Одна жесткая поперечина	Однофазная нагрузка	9.45	$I_{\text{pPL}} = \frac{0{,}55}{0{,}23 \cdot 0{,}95} = 2{,}52$ А
Жесткие поперечины в левом плече парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3} от 15 до 33 %	9.46	$I_{\text{pЛL}} = \frac{4{,}95}{3 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}95} = 7{,}55$ А
		9.47	$I_{\text{pЛN}} = 7{,}55$ А
Жесткие поперечины в правом плече парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3} от 15 до 33 %	Аналог. 9.46	$I_{\text{pПL}} = \frac{3{,}30}{3 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}95} = 5{,}03$ А
		Аналог. 9.47	$I'_{\text{pПN}} = 5{,}03$ А
Жесткие поперечины всего железнодорожного парка	Трехфазная нагрузка при k_{I3} от 15 до 33 %	9.48	$I_{\text{p}\Sigma\text{L}} = \frac{8{,}25}{3 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}95} = 12{,}59$ А
		9.49	$I_{\text{p}\Sigma\text{N}} = 12{,}59$ А

Список использованных источников

9.1 СТБ 2574-2020 Электроэнергетика. Основные термины и определения [Текст] – С Изм. №1, изм. №2. – Введ.10.08.2020.

9.2 ГОСТ 19431-2023 Энергетика и электрификация. Термины и определения. [Электронный ресурс]. – Взамен ГОСТ 19431-84 ; введ. 25.09.2023 // ИПС «Стандарт». – Режим доступа : https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=687212. – Дата доступа : 01.11.2024.

9.3 ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009) Напряжения стандартные [Текст] – С Изм. 1. – Взамен ГОСТ29322-92; введ. 01.06.2017

9.4 Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь. – Введ. 1.07.2016 г.

9.5 Козловская, В. Б. Электрическое освещение: учебник / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. Минск: Техноперспектива, 201, – 543 с, [12] л, цв. ил.

9.6 Кабышев, А. В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие / А. В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 185 с.

9.7 Кнорринг, Г. М. Осветительные установки / Г. М. Кнорринг – Л.: Энергоиздат. Ленинград. отд-ние, 1981. – 288 с., ил.

9.8 Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с : ил.

9.9 Руководящий технический материал. Проектирование электроустановок. О расчете электрических нагрузок. Указания по расчету электрических нагрузок. РТМ 36.18.32.4-92* (технический циркуляр ВНИГМ Тяжпромэлектропроект №359-92 от 30 июля 1992 г.) [Текст] – Взамен "Указаний по расчету электрических нагрузок" ,шифр М788-1068, 1990 г.; введ. 01.01.1993.

9.10 Радкевич, В. Н. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 03 "Электроснабжение (по отраслям)" / В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская, И. В. Колосова. – Минск: БНТУ, 2013. – 124 с.

9.11 Сибикин, Ю. Д. Основы электроснабжения объектов : учебное пособие / Ю. Д. Сибикин – Изд. 3-е, стер. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 328 с.

9.12 Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / И. А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 356 с.: ил.

9.13 ТКП 460-2017 (33240) Порядок расчета величины технологического расхода электрической энергии на ее передачу по электрическим сетям, учитываемой при финансовых расчетах за электроэнергию между энергоснабжающей организацией и потребителем (абонентом) [Текст] – С Изм. №1, изм. №2 – Взамен ТКП 460-2012; введ. 22.06.2017.

9.14 Правила устройства электроустановок : главы, действующие в Республике Беларусь [Электронный ресурс] – 6-е изд., перераб. и доп. – Минск: Экономэнерго, 2015 – Режим доступа: https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/9332.pdf – Дата доступа: 25.11.2024.

9.15 ГОСТ Р 50571.5.52-2011/МЭК 60364-5-52:2009 Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. [Текст] – Взамен ГОСТ Р 50571.15-97 (МЭК 6064-5-52–93); введ. 13.12.2011.

9.16 СН 4.04.01-2019 Системы электрооборудования жилых и общественных зданий [Текст] – С Изм. №1 – С отменой ТКП 45-4.04-326-2018 (33020); введ. 29.11.2019.

9.17 IEEE Standart Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459TM-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) [Электронный ресурс] / IEEE Power & Energy Society. – Режим доступа: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf – Дата доступа: 29.11.2024.

9.18 Emanuel, Alexander Eigeles. Power definitions and the physical mechanism of power flow [Электронный ресурс] / Alexander Eigeles Emanuel. – p. cm. – Includes index. ISBN 978-0-470-66074-4 (cloth) – Режим доступа: https://skillexperto.com/index/power-definitions-and-the-physical-mechanism-of-power-flow/ – Дата доступа: 29.11.2024.

9.19 ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ) [Текст] – Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 01.04.2016.

9.20 ГОСТ IEC 61000-3-2-2021 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А на фазу) [Текст] – Взамен ГОСТ IEC 61000-3-2–2017, ГОСТ 30804.3.2-2013; введ. 01.02.2023.

9.21 Руководство по устройству электроустановок [Электронный ресурс] / Life is on, Schneider Electric – Schneider Electric, 2019. – Режим доступа: https://www.c-o-k.ru/library/instructions/schneider-electric/generatory elektrosnabzhenie/24847 – Дата доступа: 29.11.2024.

9.22 Жежеленко, И. В. высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – 4-е изд.. перераб. и доп. – М.: энергоатомиздат, 2000 – 331 с., ил.

9.23 Исследование высших гармоник тока, генерируемых энергосберегающими источниками света / Г. Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. – 2014 – №6 – С.51–55.

9.24 50W Constant Power Mode LED Driver. XLG-50 series [Электронный ресурс] / Mean Well. // File Name:XLG-50-SPEC 2019-07-12 – Режим доступа: https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=XLG-50 – Дата доступа : 02.12.2024.

9.25 Светодиодный осветительный комплекс серии "СОКр-5-02". Паспорт / ООО "ДОЛОМАНТ-Т". – 4с.