

А.В. САПРЫКА

A night cityscape, likely New York City, with numerous skyscrapers illuminated. A large, glowing blue sphere, resembling a full moon or a large light source, dominates the upper half of the image. The sky is dark with some clouds. The water in the foreground reflects the city lights and the blue glow of the sphere.

ПОВЫШЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ЭНЕРГИИ

А.В. Сапрыка

**ПОВЫШЕНИЕ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Харьков  
ХНАМГ  
2009

УДК621.971, 628.9

ББК 31.294 – 5 я73

С-19

А.В.Сапрыка. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учетом качества электрической энергии. Монография. – Харьков: ХНАМГ, 2009 – 126с.

В монографии изложено современное состояние потребления электрической энергии в Украине осветительными комплексами городов, а также влияние качества электроэнергии на их работу. Проведены анализ имеющихся в научной литературе данных по физическим процессам и эксплуатационным характеристикам ламп высокого и сверхвысокого давления, а также экспериментальные исследования устойчивости работы ламп высокой интенсивности в аномальном режиме, получены данные для определения режимов их эффективного использования. Даются практические рекомендации по повышению энергоэффективности осветительных комплексов.

Рассчитана на широкий круг специалистов, научных сотрудников, аспирантов и студентов энергетических специальностей.

Ил. – 46. Табл. – 7. Библиогр. – 91 наим.

Рецензенты: Омеляненко В.И., д.т.н., проф. (Национальный технический университет «ХПИ»);  
Лисиченко Н.Л., д.т.н., проф. (Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства)  
Гриб О.Г., д.т.н., проф. (Харьковская национальная академия городского хозяйства);

*Рекомендовано Ученым советом Харьковской национальной академии городского хозяйства, протокол № 2 от 28.11.2008 р.*

**ISBN 966-695-115-0**

©А.В. Сапрыка, ХНАГХ, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава первая. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГОРОДОВ УКРАИНЫ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Структура и характеристика нагрузок в энергетических системах	8
1.2. Производство электрической энергии .....	10
1.3. Технологические затраты электрической энергии .....	13
1.4. Структура потребления электрической энергии и перспективы развития осветительных комплексов городов .....	14
<b>Глава вторая. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ.....</b>	<b>31</b>
2.1. Качество электрической энергии и современные измерительные приборы. ....	32
2.2. Исследования показателей качества электрической энергии в системах наружного освещения городов. ....	39
2.3. Исследования показателей качества электрической энергии в сетях внутреннего освещения. ....	44
2.4. Исследования качества электрической энергии в системах промышленных и коммунальных предприятий. ....	53
2.5. Исследование качества электрической энергии в системообразующих и питающих сетях.....	58
<b>Глава третья. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....</b>	<b>63</b>
3.1. Сравнительный анализ источников питания разрядных ламп.....	65

3.2. Влияние низкого качества электроэнергии на эксплуатационные характеристики источников оптического излучения и электрических систем .....	73
3.3. Процессы на электродах высокоинтенсивных разрядных ламп ..	90
3.4. Методика расчета средней за цикл удельной эрозии .....	95
3.5. Исследование эрозионных характеристик электродов .....	111
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>117</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние и тенденции развития в области освещения требуют разработки новых высокоэффективных технологий и образцов электротехнического оборудования. В настоящее время проблемы энергоэффективности в Украине приобретают особое значение, так как являются важнейшими условиями экономической и длительной эксплуатации электрооборудования [1,2,3]. Задача рационального использования электроэнергии и снижения затрат на искусственное освещение относится к важнейшим проблемам. Сегодня на искусственное освещение в Украине используется более 15% электроэнергии, вырабатываемой всеми электростанциями страны, при этом общая эффективность преобразования энергии топлива в световую энергию составляет приблизительно 3% [4]. Оптическое излучение все в большей степени используется в современных технологических процессах в промышленности, в коммунальном и сельском хозяйстве. Наибольший объем генерации световой энергии приходится на разрядные лампы, схемы питания которых еще далеки от совершенства. Мощные установки с разрядными лампами снижают  $\cos \varphi$  в системах электроснабжения и искажают форму кривой силы тока. Снижение качества электроэнергии приводит к дополнительным потерям, нагреву оборудования, ухудшению работы осветительных комплексов, сокращению срока службы изоляции и ламп. Согласно [3,5] качество электроэнергии (КЭ) - это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование, приборы и аппараты и оцениваемых показателями качества электроэнергии (ПКЭ), численно характеризующими уровни электромагнитных помех (ЭМП) в системе электроснабжения (СЭС) по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии и импульсам напряжения.

Согласно исследованию, проведенному EPRI – Electric Power Research Institute (США) ежегодные убытки от сниженного качества электроэнергии составляют 15-24 млрд. долларов ежегодно. Исследования, проведенные CEA – Canadian Electrical Association (Канада) показали, что убытки от провалов и внезапного повышения напряжения, от импульсов напряжения и гармоник составляют 1,2 млрд. долларов ежегодно. В бывшем СССР они составляли около 10 млрд. долларов [7]. По данным Института электродинамики НАН Украины, снижение качества электроэнергии увеличивает её расход на 10-12%.

Одним из интегральных показателей качества электрической энергии является годность, вычисляемая на основании показателей качества электроэнергии, определяемых ГОСТ 13109-97: это отношение числа измерений, находящихся в нормально допустимых по ГОСТ 13109-97 границах к общему числу измерений за отчётный период. Если значение показателя качества соответствует ГОСТ, значение годности больше или равно 0,95, если не соответствует – меньше 0,95. Годность по показателю, превысившему выходы за предельно допустимые значения, считается равной нулю и не отвечает требованиям ГОСТа.

Содействие наиболее полному и квалифицированному использованию современных оптических приемников электрической энергии в системах электроснабжения составляет цель настоящей монографии.

# **ГЛАВА ПЕРВАЯ. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГОРОДОВ УКРАИНЫ**

Производство электроэнергии является высокотехнологичным, полностью автоматизированным процессом, при котором в электроэнергетической системе Украины строго синхронно работают сотни мощных генераторов электрических станций. Вырабатываемая ими электроэнергия непрерывно преобразуется на напряжения разных уровней, необходимых для передачи, распределения и потребления. Распределительные системы преобразования и передачи электроэнергии (трансформаторные подстанции и линии электропередачи) работают строго согласовано по многим электрическим параметрам [8].

Характерной особенностью электроэнергетики, определяющей специфику ее работы, является неразрывность процесса производства, передачи и потребления электроэнергии, поскольку электроэнергия используется непосредственно в момент ее выработки и не может быть запасена впрок, как другие энергоносители.

Непрерывность процесса электроснабжения потребителей обеспечивается только при постоянном балансе вырабатываемой и потребляемой электроэнергии и мощности, который непрерывно меняется (по времени суток, дням недели, сезонам). От степени сбалансированности вырабатываемой и потребляемой электроэнергии и мощности зависит частота электрического тока, которая одинакова для всей Украины. При недостатке топлива или генерирующих мощностей во избежание развала работы энергетической системы Украины и прекращения электроснабжения потребителей производят вынужденное отключение избыточной части потребителей электрической энергии и мощности с тем, чтобы сохранить устойчивость работы энергосистемы.

Обеспечение непрерывного электроснабжения потребителей особенно важно, поскольку ущерб (экономический, социальный, оборонный) от нарушения электроснабжения в десятки раз превышает потери от разрушения поврежденного оборудования.

Основой электроэнергетики страны является Объединенная энергетическая система (ОЭС) Украины, которая связана между собою системоопределяющими линиями электропередачи напряжением 220 - 750 кВ. Оперативно-технологическое управление ОЭС, управление режимами энергосистемы, создание условий надежности, параллельной работы с энергосистемами других стран осуществляется централизованно государственными предприятиями НЭК «Укрэнерго» [9].

### **1.1. Структура и характеристика нагрузок в энергетических системах**

В 90-е годы прошлого столетия объем потребления электроэнергии существенно уменьшился, а процесс обновления мощностей практически остановился. Отсутствовали стимулы к повышению эффективности, рациональному планированию режимов производства и потреблению электрической энергии, энергосбережению. По технологическим показателям (удельный расход топлива, средний коэффициент полезного действия, рабочая мощность станций и др.) энергокомпании Украины отставали от своих аналогов в развитых странах.

Качество электрической энергии в подавляющих случаях, зависит от режимов и характера потребителей, так как нагрузки влияют на режимы электрических сетей и энергосистемы в целом.

Энергия, поступающая в сеть от генератора, имеет высокое качество: форма кривых напряжения синусоидальна, трехфазные системы напряжений симметричны. Этот поток энергии, распределяющийся по

сети и потребляющий нагрузки, называется основным потоком, а его мощность – мощностью основного потока [2].

Часть энергии, которая преобразуется искажающими нагрузками и передается обратно в сеть, определяет искажение и приводит к ухудшению качества электроэнергии. Этот поток и его мощность, распространяющаяся от искажающих нагрузок по энергосистеме, называется вторичным потоком энергии или просто вторичной мощностью.

Обычные приборы измерения мощности и энергии с той или иной погрешностью замеряют алгебраическую сумму этих потоков энергии и мощностей.

Нелинейные нагрузки вызывают искажение формы кривой напряжения и тока. К ним относятся вентильные электроприборы, дуговые печи, а также электродвигатели. Нелинейные нагрузки являются источниками высших гармоник. Основной поток энергии определяется первыми гармониками напряжения и тока, вторичный поток – высшими гармониками.

Суммарные активные и реактивные мощности нагрузок будут состоять из мощностей основного потока и вторичных мощностей. Для нелинейных нагрузок вторичные мощности будут отрицательными [2].

В структуре энергосистем имеется немало нагрузок, мощность которых изменяется периодически. Они вызывают колебания напряжения и тока, т.е. создают модулированные по амплитуде и фазе режимы напряжений и токов. К ним, например, относится большая группа нагрузок металлургической промышленности (прокатные станы, дуговые печи и т.п.).

Для нагрузки, создающей модуляцию, вторичная мощность будет отрицательной, т.е. модулирующая нагрузка будет генерировать вторичную активную и реактивную энергию.

Активные и реактивные трехфазные мощности складываются из мощностей различных последовательностей. Этого нельзя сказать о мощности одной фазы, которая складывается из всех возможных комбинаций произведения сопряженных комплексов токов различных последовательностей.

## **1.2. Производство электрической энергии**

Электроэнергетика является базовой областью, которая обеспечивает потребности страны в электрической энергии и может вырабатывать значительный объем электроэнергии для экспорта. Общая мощность электрогенерирующих станций составляет около 52,0 млн. кВт, из которых мощность тепловых электростанций (ТЭС) и теплоэлектроцентралей ТЭЦ составляет 57,8%, атомных электростанций (АЭС) - 26,6%, гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроаккумулирующих ГАЭС - 9,1%, блок-станций и других источников - 6,5% [9].

Для обеспечения спроса потребления электрической энергии и ее экспорта в соответствии с базовым сценарием развития экономики страны до 2030г. планируется увеличить мощность генерирующих электростанций до 88,5 млн. кВт. По пессимистическому сценарию развития экономики этот уровень составит 74,9 млн. кВт, по оптимистическому – 98,6 млн. кВт.

Объемы производства электроэнергии атомными электростанциями будут увеличиваться как за счет введения в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС, так и реконструкции действующих энергоблоков с продолжением срока эксплуатации по меньшей мере на 15 лет. При этом в 2030г. в эксплуатации будут находиться 9 действующих сегодня энергоблоков (7 из них с удлинённым сроком эксплуатации). Объемы производства электроэнергии на АЭС будут составлять в 2010г. 101,2 млрд. кВт.ч; в 2015г. – 110,5 млрд. кВт.ч; в 2020г. – 158,9 млрд. кВт.ч; в 2030г. 219,0 млрд. кВт.ч.

Объемы производства электроэнергии гидроэлектростанциями определены, исходя из среднегодовых показателей водности рек Украины. До 2010г. они будут составлять в среднем 9,8 млрд. кВт.ч. За счет модернизации существующих и развития новых мощностей производство электроэнергии на ГЭС должно увеличиться в 2015г. – до 11,4 млрд. кВт.ч; в 2020г. – до 12,7 млрд. кВт.ч; в 2030г. – до 14,1 млрд. кВт.ч.

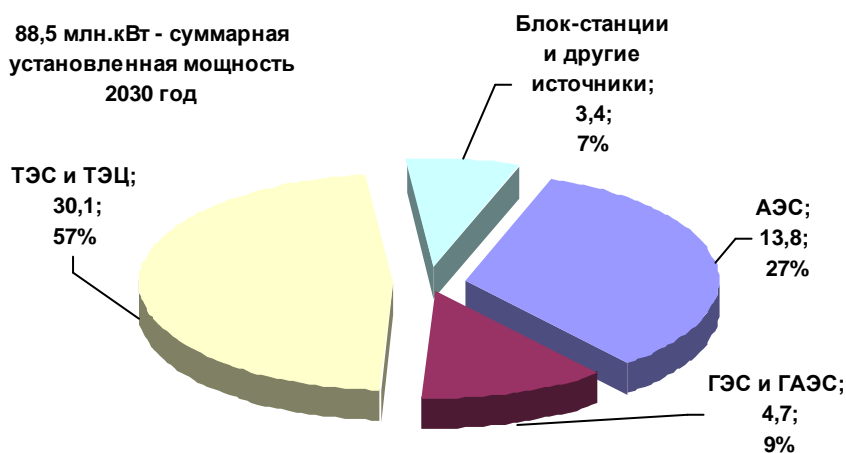


Рис. 1.1 - Структура энергогенерирующих мощностей электрических станций Украины

Прогнозируемые значения объемов производства электроэнергии гидроаккумулирующими электростанциями учитывают введение до 2010г. гидроэнергетических мощностей на Ташлицкой и Днестровской ГАЭС, а в период 2020 - 2030 гг. - на Каневской ГАЭС.

В перспективе они достигнут: в 2010г. – 2,2 млрд. кВт.ч; в 2015г. – 3,2 млрд. кВт.ч; в 2020г. – 3,9 млрд. кВт.ч; в 2030г. – 4,5 млрд. кВт.ч.

Производство электрической энергии тепловыми электростанциями и блоками-станциями будет увеличиваться, достигая: в 2010г. – 96,4 млрд. кВт.ч; в 2015г. – 125,0 млрд. кВт.ч; в 2020г. – 129,9 млрд. кВт.ч и в 2030г. – 180,4 млрд. кВт.ч.

Прогнозируется увеличение производства электроэнергии электростанциями, которые используют нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (без учета производства

электроэнергии на малых ГЭС и на биотопливе), до 50 млн. кВтч в 2010г; 800 млн. кВтч – в 2015г; 1500 млн. кВтч – в 2020г; 2100 млн. кВтч – в 2030г.

Таблица 1.1

**Основные показатели развития электроэнергетики Украины на период до 2030 года**

Показатели	Годы												
	2005 (оперативные данные)	2010			2015			2020			2030		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Установленная мощность электростанций, всего, ГВт	52,0	49,2	49,2	47,4	58,2	58,1	51,9	73,2	70,6	58,4	98,6	88,5	74,9
ТЭС (в т.ч. блок- станции)	33,5	27,9	27,9	27,8	32,9	32,8	28,8	39,2	37,6	32,0	54,0	46,4	39,0
АЭС	13,8	13,8	13,8	13,8	15,8	15,8	15,8	22,8	21,8	17,8	32,0	29,5	25,0
ГЭС и ГАЭС	4,7	7,4	7,4	5,7	8,7	8,7	6,5	9,6	9,6	7,5	10,5	10,5	9,0
Возобновляемые источники энергии	0,0*	0,1	0,1	0,1	0,8	0,8	0,8	1,6	1,6	1,1	2,1	2,1	1,9
Производство электроэнергии, всего, млрд. кВтч	185,236	226,0	210,2	195,5	266,7	251,0	223,0	328,8	307,0	259,2	470,4	420,1	356,4
ТЭС (в т.ч. блок- станции)	84,1	112,2	96,4	84,6	140,8	125,1	100,8	144,3	129,9	115,1	211,4	180,4	152,4
АЭС	88,8	101,2	101,2	101,2	110,5	110,5	110,5	166,3	158,9	129,6	238,3	219,0	186,2
ГЭС, ГАЭС	12,3	12,5	12,5	9,6	14,6	14,6	10,9	16,6	16,6	13,0	18,6	18,6	15,9
Возобновляемые источники	0,0	0,1	0,1	0,1	0,8	0,8	0,8	1,6	1,5	1,5	2,1	2,1	1,9
Потребление электроэнергии (брутто), млрд. кВтч	176,884	214,5	198,9	184,3	246,7	231,0	208,0	303,8	287,0	244,2	440,4	395,1	336,4
Экспорт электроэнергии, млрд. кВтч	8,352	11,5	11,3	11,2	20,0	20,0	15,0	25,0	20,0	15,0	30,0	25,0	20,0

I – оптимистический, II – базовый, III – пессимистический сценарии) до 70 МВт.

### 1.3. Технологические затраты электрической энергии

Величина технологических затрат электрической энергии на ее транспортирование и сегодня в 1,6 раза превышает уровень 1990г. и в 2-2,5 раза больше, чем в государствах с развитой экономикой [9].

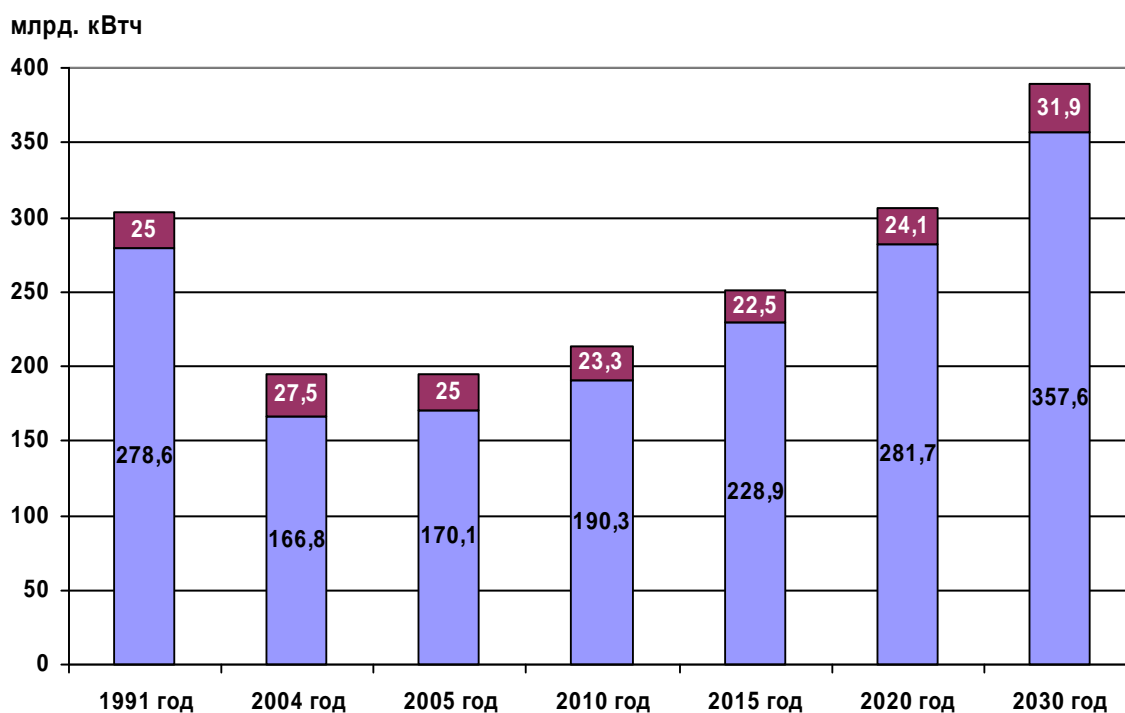


Рис.1.2. Динамика отпуска электроэнергии и ее затрат на транспортирование электрическими сетями Украины, млрд. кВтч

За счет проведения мероприятий по снижению технологических затрат электрической энергии в сетях их объем следует ожидать: в 2010 году на уровне 12,2% от общего отпуска электроэнергии в сеть, в 2015г. - 9,8%, в 2020г. - 8,6%, в 2030г. - 8,2%. Это обеспечит годовую экономию электрической энергии в 2030г. сравнительно с процентом затрат 2005г. в объеме 25 млрд. кВт.ч, в том числе за счет организационно-технических мероприятий - 4 млрд. кВт.ч (рис.1.3).

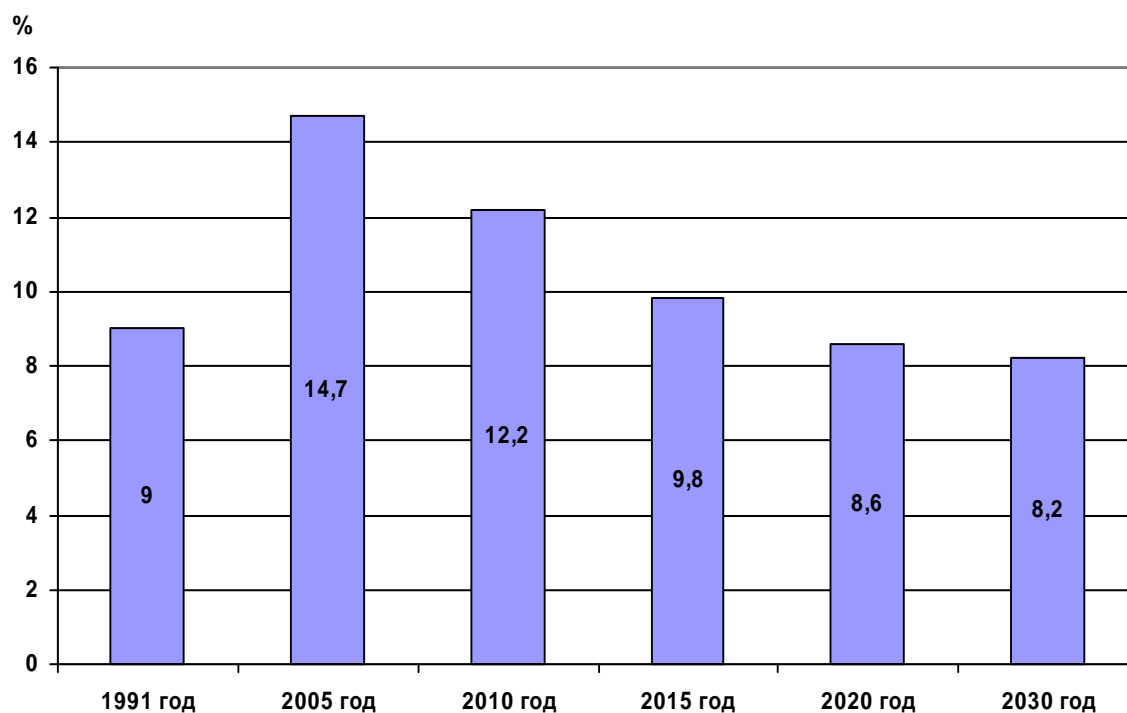


Рис. 1.3 - Динамика уменьшения затрат электрической энергии на ее транспортирование электрическими сетями

#### **1.4. Структура потребления электрической энергии и перспективы развития осветительных комплексов городов**

Потребление электроэнергии прогнозируется в 2030г. в объеме 395,1 млрд кВт.ч, в сравнении с 2005г. (176,9 млрд.кВт.ч) оно увеличится на 218,2 млрд.кВт.ч (123%). Наибольшими потребителями среди областей экономики Украины будет оставаться промышленность, электропотребление которой в 2030г. оценивается на уровне 169,8 млрд кВт.ч (среднегодовой прирост будет составлять 2,4%) [9]. За этот период электропотребление в сельском хозяйстве возрастет почти в три раза (с 3,4 до 10,1 млрд. кВт.ч) Электропотребление в строительстве за период с 2005 по 2030гг. повысится с 1,0 до 5,8 млрд кВт.ч, на транспорте - с 9,2 до 12,9 млрд.кВт.ч, в жилищно-коммунальном хозяйстве и быту (с учетом электроотопления) – с 41,7 до 143,6 млрд.кВт.ч (рис. 1.4)

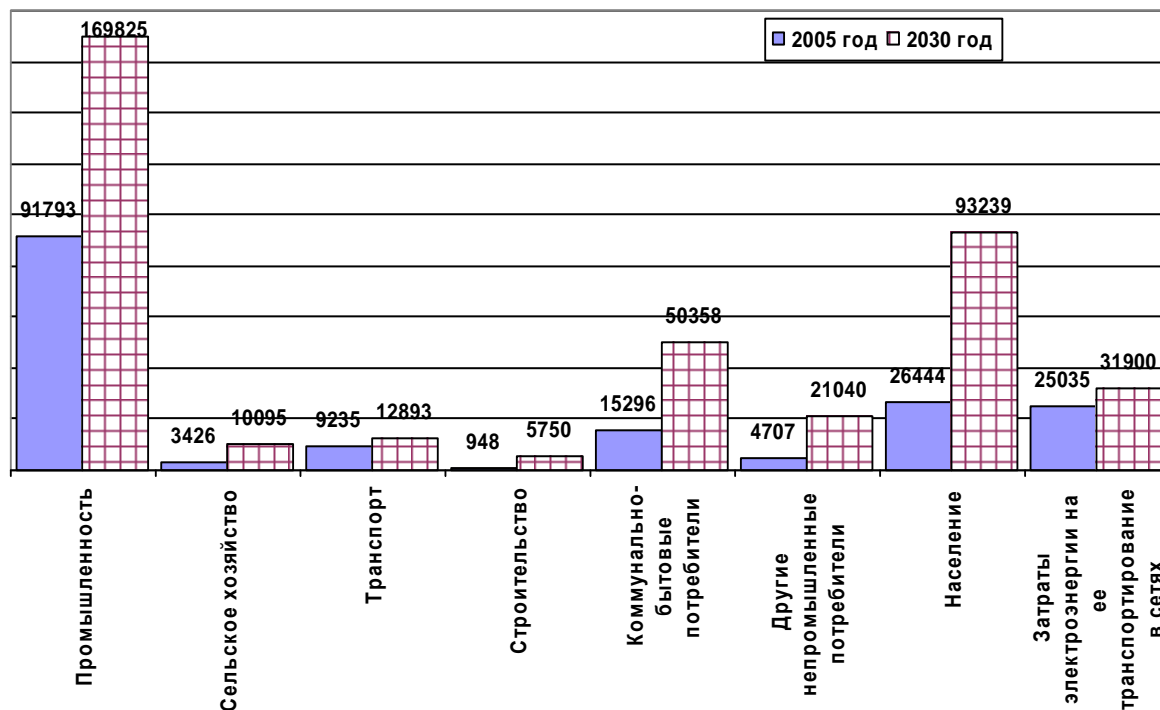


Рис. 1.4 - Прогноз потребления электрической энергии по группам потребителей, млн. кВт.ч

В технической системе, включающей четыре процесса: производство, передачу, распределение и потребление электроэнергии существует широкое разнообразие потребителей электрической энергии. Потребитель электрической энергии – это электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории [8].

Приемником электрической энергии (электроприемником) называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии.

Существующие сегодня классификационные признаки требуют доработки в связи с тем, что в указанной системе в последнее время, кроме основных процессов необходимо учитывать процесс повышения энергоэффективности, который охватывает все элементы традиционных

составляющих электроэнергетических систем, определяя, в том числе, и возможности приемников электроэнергии (ПЭЭ) в решении задач энергосбережения и повышения показателей качества электроэнергии [10].

В настоящее время города являются основными потребителями электрической энергии в Украине, в которых проживает более 80% всего населения страны, при этом процесс урбанизации активно продолжается. В городах размещается также большинство промышленных и коммунально-бытовых предприятий [8, 11].

Традиционно и укрупненно всех потребителей электрической энергии разделяют на следующие группы [10]:

- электроприемники жилых домов;
- промышленные электроприемники;
- электрический транспорт;
- общественно-коммунальные приемники электроэнергии.

Рассмотрим классические классификационные признаки по первой группе:

*Электроприемники жилых домов* в случае многоквартирного жилого дома подразделяются на две группы: *электроприемники квартир* и *электроприемники общедомового назначения*.

К *электроприемникам квартир* относится: осветительная нагрузка и бытовые электроприборы, а к *электроприемникам общедомового назначения* - светильники служебных и других помещений, лифтовые установки, вентиляционные системы, различные противопожарные устройства и т.д.

Независимо от величины и промышленного потенциала города создается система их электроснабжения. В крупных городах с населением более 100 тыс. человек система электроснабжения создается общей для всех потребителей, и промышленные предприятия получают электроэнергию от районных подстанций и электросетей города. В

средних (до 100 тыс. человек) и в малых (до 50 тыс. человек) городах потребители коммунально-бытовой зоны нередко получают электроэнергию от электросетей промышленных предприятий, которые в свою очередь, получают ее по линиям с напряжением 35 кВ и выше от сетей энергосистемы.

В последнее время доля потребления электроэнергии промышленными предприятиями уменьшается, а потребление электроэнергии коммунально-бытовыми и сельскохозяйственными электроприемниками увеличивается, при этом часть потребления бытовыми потребителями в Украине значительно меньше, чем в странах Евросоюза и США [11]. Это объясняется тем, что в нашей стране электроэнергия мало используется для отопления квартир и на нагревание воды, потому что в городах хорошо развито центральное теплоснабжение и горячее водоснабжение (это имеет как позитивные, так и негативные стороны).

В будущем с усовершенствованием процессов производства электроэнергии и КПД электростанций доля потребления электроэнергии бытовыми потребителями будет увеличиваться. Потребление электроэнергии на бытовые нужды вырастет в городах в первую очередь за счет увеличения количества различных бытовых машин и приборов, а также большого внедрения электроплит и электронагревательных приборов, особенно при внедрении сменных тарифов в течение дня на электроэнергию.

При укрупнении городов значительно вырастет потребление электроэнергии городским электротранспортом (в том числе метрополитеном) и службами водоснабжения, канализации и другими службами коммунального хозяйства.

Осветительные установки являются самыми массовыми приемниками электроэнергии. Осветительная установка - комплексное светотехническое устройство, предназначенное для искусственного и

(или) естественного освещения, состоящая из источника излучения, осветительного прибора или светопропускающего устройства, освещаемого объекта или группы объектов, приемника излучения и вспомогательных элементов, обеспечивающих работу установки (проводов и кабелей, пускорегулирующих и управляющих устройств, конструктивных узлов, средств обслуживания) [12]. Целью освещения является создание световой среды, обеспечивающей комфортные и безопасные условия труда, архитектурно-художественное восприятие окружающего пространства, а также передвижение пешеходов и транспорта и т. д.

В основе нормирования освещения лежат результаты научных исследований в областях физиологии зрения, гигиены человека, техники и экономии освещения.

На освещение в разных странах направляется до 20% всей вырабатываемой электроэнергии [4]. Сейчас в народно-хозяйственном комплексе Украины используются около 260 млн. штук приборов, которые на освещение за год используют более 15% электроэнергии, которая вырабатывается всеми электростанциями. Парк светильников Украины приведен на рис. 1.5, а парк светильников с разными источниками света в Украине и за границей - рис. 1.6, парк светильников в разных отраслях народного хозяйства - рис 1.7.

На ближайшее время основой экономии электроэнергии должна стать замена малоэффективных ламп на более энергоэкономичные, так в жилом секторе лампы накаливания составляют почти 99%, на сельскохозяйственных предприятиях – более 83%, в промышленности – 44%, в общественно-административных – 40% [13].

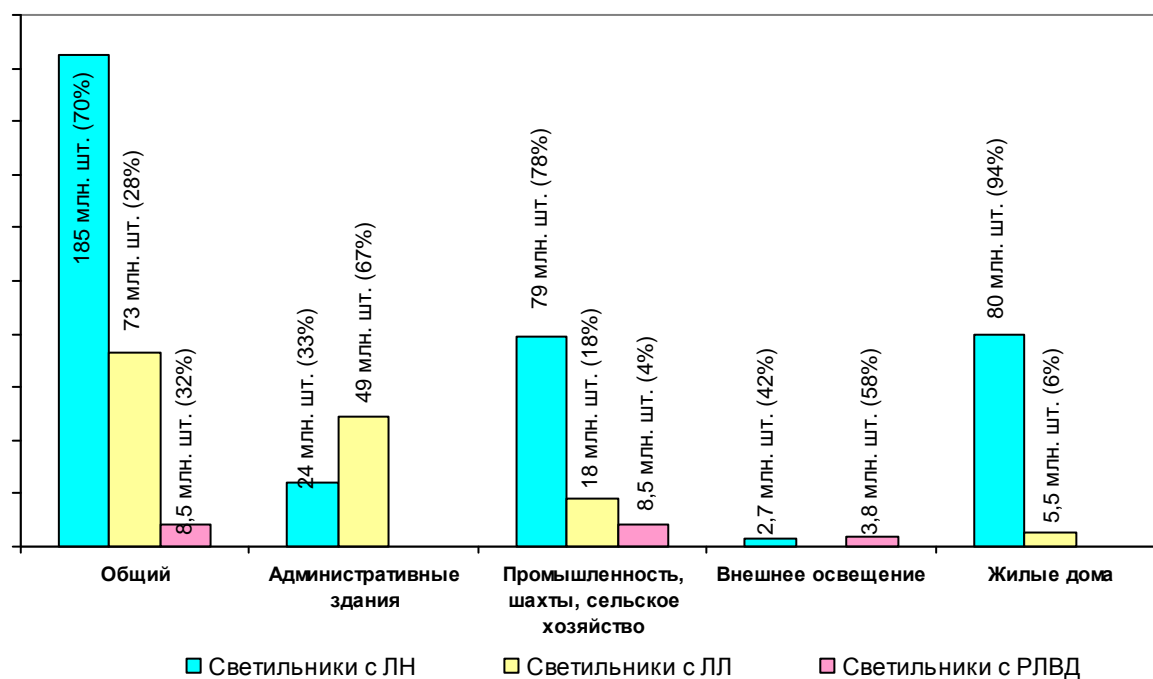


Рис. 1.5 - Парк светильников Украины

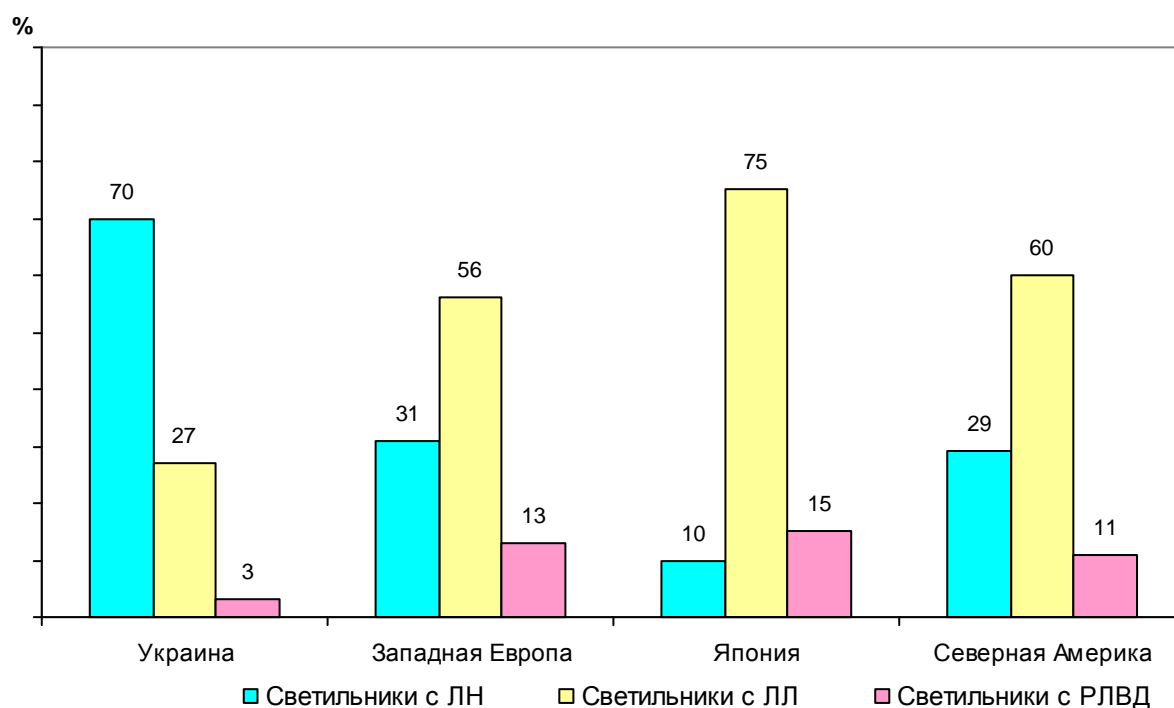


Рис. 1.6 - Парк светильников с разными источниками света в Украине и за границей

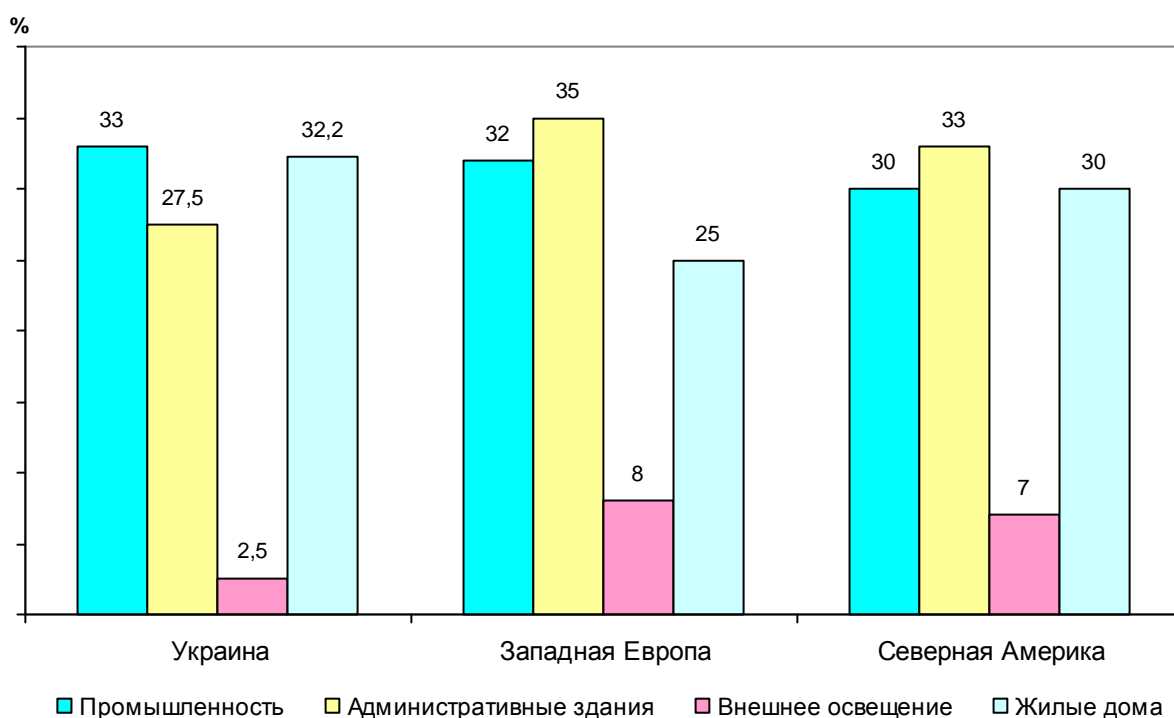


Рис. 1.7 - Парк распределения светильников по разным отраслям в Украине и за границей

В целом по стране этот показатель составляет 75%, тогда как в экономично развитых странах он не превышает 50%. Такое положение делает актуальной задачу рационального использования электроэнергии. В связи с необходимостью экономии электроэнергии в осветительных установках возникает вопрос о влиянии этой экономии на годовое ее потребление, так как при этом происходит сокращение мощности из графика нагрузки в системе электроэнергетики страны. Основными критериями выбора массовых источников света для установок освещения являются энергоэкономичность, реальная продолжительность горения, размеры светящегося тела и самой лампы, зависимость работы от климатических условий и требования к ПРА, цветности излучения и стоимость.

Опыт, накопленный некоторыми странами мира, показывает, что экономия электроэнергии в осветительных комплексах с целью снижения капитальных затрат на каждый киловатт установленной мощности с

экономической точки зрения вполне оправдана, но для максимальной эффективности внедряемых энергосберегающих мероприятий требуется активное вмешательство правительства.

Международные и национальные организации разработали мероприятия по повышению энергоэффективности, в том числе и по реализации первоочередных мер по экономии электроэнергии в установках внутреннего и внешнего освещения (рис. 1.8). Согласно [4] этим можно снизить затраты на электроэнергию до 60% и повысить энергоэффективность осветительных установок за счет:

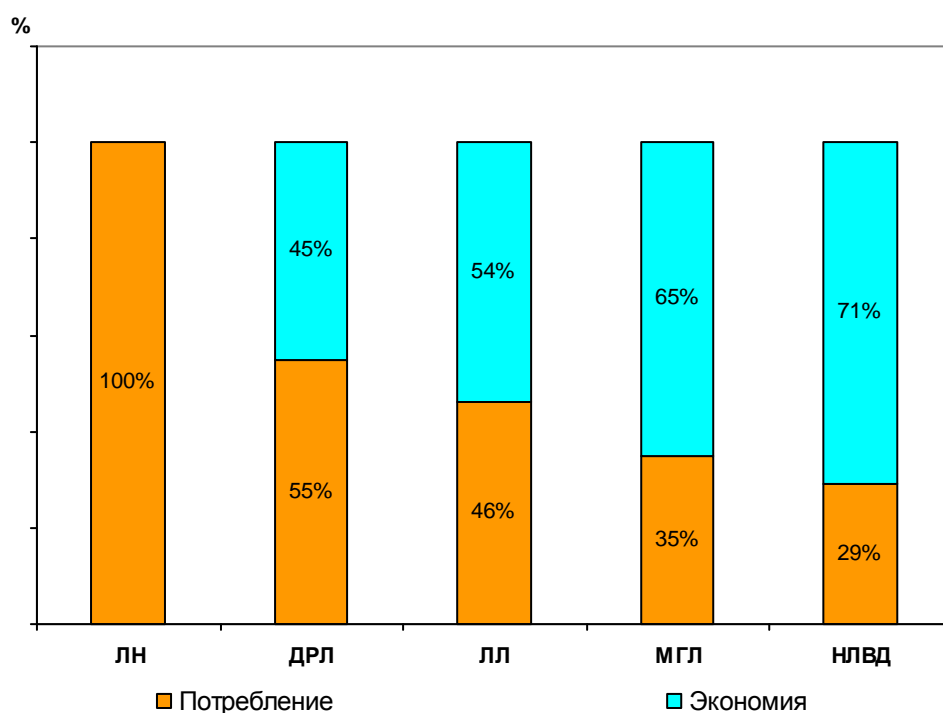


Рис. 1.8 - График экономии электрической энергии оптическими источниками света

- широкого внедрения в осветительные установки компактных люминесцентных ламп путем прямой замены ими ламп накаливания;
- переход на осветительные приборы с линейными люминесцентными лампами нового поколения с высокой световой отдачей ( $>100$  лм/Вт);

- использования в осветительных установках электронных ПРА вместо электромагнитных;

- автоматизированного контроля и управления освещением в зависимости от интенсивности естественного света.

Вместе с тем необходимо отметить, что в Украине, в отличие от стран ЕС, имеет место повышенное потребление электроэнергии в промышленности и снижение её нормы при внутреннем освещении. Это связано в основном с низкой обеспеченностью населения жилой площадью и малыми доходами населения. Нормативным требованиям не отвечают системы осветительных установок более 60% площадей промышленных зданий, 75% помещений административных учреждений, 90% наружного освещения [4].

Экономичность светодиодных светильников для освещения позволит более, чем двукратную экономию электроэнергии в сравнении с обычными осветительными системами. При этом светильники на светодиодах обладают спектром излучения, близким к солнечному, и не мерцают, а также создают освещенность с более высокой контрастностью, что улучшает качество освещения объекта.

Осветительная техника сегодня переходит на новый уровень, становится все более сложной, поэтому помощь в выборе осветительных средств, проектировании современных комплексов освещения, создании оптимальной световой среды и светового дизайна, соблюдение принципов энергосбережения становится все более важной для потребителя [14-20].

В настоящее время потребляемая мощность на искусственное освещение составляет миллионы кВт. ч., система архитектурного и наружного освещения включает в себя сотни тысяч световых приборов, тысячи километров электрических сетей, что обуславливает требования к качеству электроэнергии согласно действующим нормативам (ГОСТ 13109-97). Значительная часть осветительных световых приборов и опор имеют сверхнормативный срок службы [19]. Часто световые приборы

размещают на опорах, принадлежащих “Горэлектротранспорту”, поэтому они подвергаются дополнительному воздействию вибраций. Значительное количество улиц, проездов и внутриквартальных территорий городов имеют недостаточное наружное освещение, а порой оно просто отсутствует. Большинство трансформаторных подстанций и высоковольтных кабельных сетей введены в эксплуатацию в 1960-1980 гг. и не соответствуют современным технологическим и функциональным требованиям. Большинство осветительных установок имеют вторую и третью категории надежности электроснабжения. Основная схема электроснабжения – однолучевая. Большой износ основных средств снижает эффективность работы комплексов наружного освещения городов Украины.

Среди многих задач особенно актуальной для города является задача создания вечерней световой среды, которая способствует снижению проявлений криминогенного характера, делает жизнь человека комфортнее. Освещение играет значительную роль в восприятии эстетического облика площадей, городских улиц, магистралей.

Применяемые осветительные установки не должны производить слепящего действия на пешеходов и водителей транспорта. В настоящее время имеются значительные резервы для повышения энергоэффективности при сохранении необходимых качественных и количественных показателей осветительных установок, дизайна и гармоничной световой среды. Системный подход к оптимизации разных видов наружного освещения должен учитывать все эти факторы. Повышение эффективности работы источников света в осветительных установках является одним из главных направлений развития наружного и архитектурного освещения города.



Рис.1.9 - Комплексное композиционное освещение

В последние годы вечерняя световая среда городов интенсивно изменяется. Кроме традиционных видов наружного освещения улиц, площадей и садово-парковых зон появляются интенсивно светящиеся рекламы, разнообразное архитектурное освещение - подсветка зданий, мостов, памятников. Поэтому для перспективного развития архитектурного и наружного освещения города назрела необходимость внедрения нового поколения светотехнического оборудования, применения осветительных установок с высоким КПД, отвечающих современным требованиям по дизайну, экономичности, технологичности с применением энергоэкономичных источников света. Комплексный подход в освещении диктует необходимость разработки световой концепции, которая будет включать все виды освещения: наружное, архитектурное, рекламное, витринное, ландшафтное для различных районов города.

Для центральных и густонаселенных районов города необходима комплексная разработка одной системы архитектурного, рекламного и

информационного освещения с максимальным использованием генерируемого светового потока для утилитарных целей и создания одинаковой комфортной световой среды. Для этого необходимы совместные работы светотехников, архитекторов и дизайнеров, возможно в рамках специальной рабочей группы. Разработка конкретных проектов в этом направлении позволит привлечь средства фирм и предприятий для повышения качества и комфортности световой среды, исключит возможность создания хаотических световых элементов, противоречащих требованиям эстетики и светотехники. Для освещения крупных городских магистралей, улиц, набережных, значимых объектов нужно разрабатывать эксклюзивные световые комплексы (рис. 1.10). Объемные монументы, памятники, малые архитектурные формы, имеющие многосторонний обзор, следует освещать с двух-трех сторон с четко выраженным основным направлением светового потока, определяющим расчетную плоскость, которая композиционно должна быть связана с главным направлением восприятия объекта [19]. В установках архитектурного освещения в основном следует использовать разрядные источники света. При локальной подсветке допустимо использование ламп накаливания, преимущественно галогенных, а также «интеллектуальных» световых приборов с управляемым цветосинтезом. Эти приборы обладают большим сроком службы, малым энергопотреблением, надежностью в работе и выполнены с применением светодиодов. Вместе с тем главными проблемами, мешающими массовому внедрению этих перспективных источников света, являются высокая цена вырабатываемой светодиодами световой энергии и отвод тепла.

Так стоимость 1 кЛм. ч, вырабатываемого самыми дешевыми китайскими белыми светодиодами со сроком службы 50 тыс.ч, составляет около 20 коп., а разрядными лампами 2 коп [14]. Возможно, что эта проблема будет решена в ближайшее время.



Рис. 1.10 - Концептуальная часть проекта светового комплекса

Яркость фасадов зданий, сооружений, монументов и элементов ландшафтной архитектуры в зависимости от их значимости, места

расположения и преобладающих условий зрительного восприятия в городе следует принимать по таблице «Нормы наружного архитектурного освещения городских объектов» [19].

Необходимо создание современной и эффективной системы автоматического управления наружным и архитектурным освещением, а также оптимизация расходов на её обслуживание. Устаревшая система управления не позволяет получать оперативную информацию о состоянии установок освещения, отказов при включении, а также осуществлять мониторинг установок в текущем режиме. Управление и мониторинг системы управления освещения должно контролироваться не только предприятием «Горсвет», но и сторонними организациями или гражданами – достаточно лишь иметь доступ в Интернет и пароль для входа в систему. Одной из таких современных систем является система управления наружным освещением “Гелиос” [6], реализованная на основе идеологии применения GSM-связи с использованием SMS-сообщений. Она позволяет осуществлять дистанционный контроль состояния сетей и приборов наружного освещения, вести учет электропотребления, на расстоянии управлять режимами освещения, применять смешанные схемы управления за счет частичного включения линий в зависимости от оживленности проезжей части. Она также имеет возможность установления мест несанкционированного подключения к сети и мониторинг состояния шкафов наружного освещения, в том числе защиту от вскрытия, при этом не требуется присутствие человека при снятии показаний с приборов учета и представляет возможность гибкого изменения графиков включения наружного освещения.

При эксплуатации осветительных комплексов имеет место отклонение световых параметров от нормируемых. Частично это связано с загрязнением светильников веществами, находящимися в воздухе, что приводит к резкому снижению их КПД и изменению светораспределения. Рациональное использование светового потока источников света, особенно

в наружном освещении может обеспечить повышение их эффективности до 20% [19]. Это может быть достигнуто за счет точности воспроизведения необходимых кривых силы света световых приборов и их юстировки в процессе монтажа и эксплуатации, а также за счет соблюдения норм периодичности чистки светильников. Как известно, для наружного освещения должны применяться светильники с полуширокой или широкой диафрагмой направленности. При этом высота подвеса светильников должна быть с полуширокой диафрагмой направленности – 7-11,5м, а для светильников с широкой диафрагмой направленности – 7,5-13м [21].

Материал корпуса светильника должен обеспечивать его привлекательный вид и прочность в течении всего срока эксплуатации. Наиболее предпочтительными в настоящее время являются корпуса, изготовленные из алюминиевых сплавов, выполненные методом литья под давлением. Эти корпуса светильников отличаются большой долговечностью, отсутствием коррозии, хорошей адгезией к покрытию при условии надлежащей подготовки поверхности порошковыми эмалями. В последнее время большое распространение получили корпуса из конструкционных пластмасс или композитных материалов. Используемые в них современные материалы позволяют добиться стойкости корпусов к инсоляции, достаточной морозостойкости, механической прочности и стойкости к агрессивным элементам атмосферы. Отсутствует проблема восстановления покрытия. Однако на сегодняшний день они имеют большую стоимость по сравнению с корпусами из алюминиевых сплавов. В последние годы в мире широкое распространение получили оптические системы, позволяющие производить установку источника света с внутренней части светильника, что, в свою очередь, дало возможность создать полностью герметичный оптический блок, обеспечивающий степень защиты IP 65. Немаловажным фактором, влияющим на сохранение светотехнических параметров светильников, является защитное стекло. Здесь в первую очередь следует выбирать светильники, изготовленные из силикатного, ударопрочного,

термостойкого защитного стекла, не изменяющего своих свойств на протяжении всего срока службы светильника. Наиболее предпочтительными при выборе осветительных приборов являются светильники, в которых используются комплектация ведущих мировых фирм-производителей, таких как Vossloh-Schwabe, ELT, Helvar, Philips, Tridonic [19]. Дроссели этих фирм в комплекте с пускозажигающими устройствами обеспечивают хороший, стабильный поджиг лампы и долговременную работу осветительных приборов. Среди применяемых источников света следует отметить высокое качество ламп производства Osram, Philips, General Electric, Polar, BLV. Эти фирмы производят лампы высокого качества и хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации.

Исследования показали, что белый свет имеет преимущества перед другим освещением:

- улучшает ночное видение на 40-100% относительно освещения другого спектра;
- улучшает цветовое восприятие, что в свою очередь увеличивает контраст изображения и восприятия глубины пространства. Учитывая то обстоятельство, что светильники на светодиодах обладают спектром излучения, близким к солнечному, и не мерцают, нормы освещенности для них будут ниже, чем для традиционных разрядных источников света. Светодиодный светильник создает освещенность с более высокой контрастностью, что улучшает качество освещения объекта. Срок их службы значительно превышает существующие аналоги – 25 лет эксплуатации при 10 - часовой работе в день. Применение светодиодных светильников фирмы «НОТИС», оптимизированных для получения нормативных освещенностей согласно СНиП 23-05-95, позволяет получить двукратную экономию электроэнергии [15]. Кроме того, при оценке экономии электроэнергии необходимо учитывать потери в сетях линий наружного освещения. Потребляемый лампами МГЛ или ДНаТ ток составляет 2,1-2,2 А (пусковой ток 4,5 А), потребляемый ток светильника

LZ - 0,6-1,0 А в зависимости от режима работы. Таким образом, рассеиваемая на проводах питания мощность уменьшается в 4-9 раз. Светодиодные светильники по экономии электроэнергии, эксплуатационным и другим затратам являются более перспективными, чем традиционные несмотря на более высокую цену.

В качестве основной схемы электроснабжения назрела необходимость применения двухлучевой схемы с двумя трансформаторами в каждой подстанции и установок автоматического ввода резервного питания (АВР) на стороне 0,4 кВ. Данная схема обеспечивает более надежное энергоснабжение установок наружного освещения. Способствовать экономии электроэнергии будет также замена неизолированных воздушных алюминиевых проводов на самонесущие изолированные провода (СИП), которая позволит снизить потери в сети и затраты на электроэнергию до 2,5% [6].

## **ГЛАВА ВТОРАЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

В современных условиях проблема качества электроэнергии, надежности электроснабжения и энергоэффективности приобретают особую актуальность, так как она является одним из важнейших условий экономичной и длительной эксплуатации осветительных комплексов [16]. Качество электроэнергии - это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование, приборы и аппараты и оцениваемых показателями качества электроэнергии, численно характеризующими уровни электромагнитных помех в системе электроснабжения по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии и импульсам напряжения. В контексте современных методов и средств обеспечения качества электроэнергии электроэнергию следует рассматривать, с одной стороны, как товар, с другой - как физическое понятие [3]. При этом электроэнергия как товар должна соответствовать определенному качеству, требованиям рынка и отличается от других видов энергии особыми потребительскими свойствами, а электроэнергия как физическое понятие - это способность электромагнитного поля совершать работу под действием приложенного напряжения в технологическом процессе ее производства, передачи, распределения и потребления.

Для измерений использовались микропроцессорные анализаторы токов и напряжений в электрических сетях АНТЭС АК 3Ф (рис.2.1), разработанные в ХНАГХ, а также РЕСУРС-UF2М и ЭНЕРГОМОНИТОР 3.3. Приборы метрологически аттестованы, позволяют измерять более 60 параметров, в том числе показатели качества электрической энергии, определённые в ГОСТ 13109-97. Приборы обеспечивают высокую

точность измерений (относительная погрешность по частоте не более 0,1%, по другим параметрам – не более 0,5%).



Рис. 2.1 - Микропроцессорный анализатор тока и напряжения в электрических сетях АНТЭС АК 3Ф

## **2.1. Качество электрической энергии и современные измерительные приборы**

Под качеством электрической энергии понимают соответствие её показателей, характеризующих напряжение и частоту в сети, нормированным значениям [5,22]. В настоящее время на территории Украины действует межгосударственный стандарт [5], устанавливающий показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности

различных потребителей электрической энергии, или приёмники электрической энергии.

Различают такие свойства электрической энергии, как: отклонение напряжения; колебание напряжения; провал напряжения; временное перенапряжение (рис. 2.2); несинусоидальность напряжения (рис. 2.3); несимметрия трехфазной системы напряжений; отклонение частоты; импульс напряжения (рис. 2.4). Этим свойствам соответствуют следующие показатели качества электрической энергии:

установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$ ;

размах изменения напряжения  $\delta U_t$ ;

доза фликера  $P_f$ ;

коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ ;

коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ;

коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;

коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ;

отклонение частоты  $\Delta f$ ;

длительность провала напряжения  $\Delta t_n$ ;

импульсное напряжение  $U_{имп}$ ;

коэффициент временного перенапряжения  $K_{перU}$ .

Отклонение напряжения характеризуется таким показателем качества электрической энергии, как установившееся отклонение напряжения, для которого установлены нормы:

- нормально допустимые  $\pm 5\%$ ;
- предельно допустимые  $\pm 10\%$ .

Колебание напряжения – быстро изменяющиеся отклонения напряжения длительностью от полупериода до нескольких секунд. Его

характеризуют размах изменения напряжения и доза фликера, где под дозой фликера понимают меру восприимчивости человека к воздействию колебаний светового потока источников освещения, вызванных колебанием напряжения (рис. 2.5).

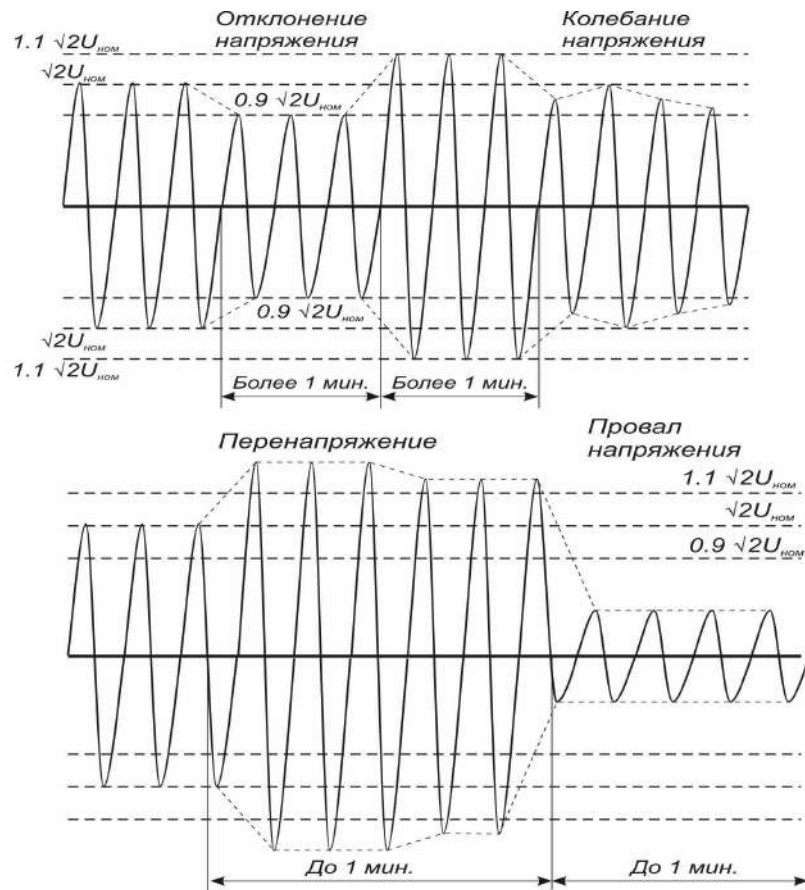


Рис. 2.2 – Отклонение напряжения, колебание напряжения, провал напряжения и временное напряжение

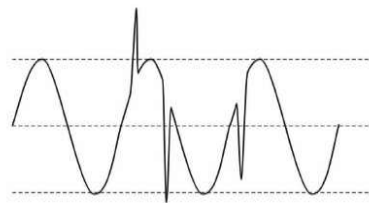
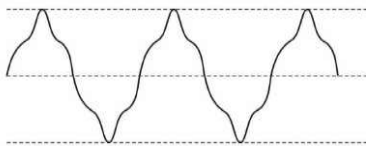


Рис. 2.3 – Несинусоидальность напряжения  
Рис. 2.4 – Импульс напряжения

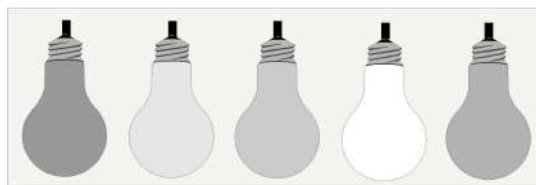


Рис. 2.5 – Колебания светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения

Несинусоидальность напряжения – искажение синусоидальной формы кривой напряжения. Это свойство нормируется коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.

Несимметрия напряжений – несимметрия трехфазной системы напряжений. Она характеризуется коэффициентами несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

Отклонение частоты - отклонение фактической частоты переменного напряжения от номинального значения в установившемся режиме работы системы электроснабжения. Оно характеризуется одноименным показателем.

Провал напряжения – внезапное понижение напряжения ниже  $0,9U_{ном}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд. Он характеризуется длительностью провала напряжения.

Импульс напряжения – резкое изменение напряжения, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд. Он характеризуется величиной его напряжения  $U_{имп}$ .

Временное перенапряжение – повышение напряжения выше  $1,1U_{ном}$  продолжительностью более 10 миллисекунд, возникающее в системах

электроснабжения при коротких замыканиях. Оно характеризуется коэффициентом временного перенапряжения.

Для оценки качества электрической энергии необходимо определить соответствие показателей качества электрической энергии за расчетный период, равный 24 ч, установленным нормам, среди которых различают нормально и предельно допустимые значения. Все нормируемые показатели качества электрической энергии не должны превышать допустимых значений. Наибольшие значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения,  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, определяемые с вероятностью 95%, не должны превышать нормально допустимых значений. Наибольшие и наименьшие значения установившегося отклонения напряжения и отклонения частоты с учетом знака, определяемые с вероятностью 95%, должны находиться в интервале ограниченном нормально допустимыми значениями.

Указанные нормы являются обязательными во всех режимах работы системы электроснабжения общего назначения, кроме режимов, обусловленных:

- исключительными погодными условиями и стихийными бедствиями (ураган, наводнение, землетрясение и т.п.);
- непредвиденными обстоятельствами, вызванными действиями сторон, не являющейся энергоснабжающей организацией и потребителем электроэнергии (пожар, взрыв, военные действия и т.п.);
- условиями, регламентированными государственными органами управления, а также связанных с ликвидацией последствий, вызванных исключительными погодными условиями и непредвиденными обстоятельствами.

Для показателей качества электрической энергии, которые не нормируются, допускается устанавливать к ним требования в технических

условиях и договорах по согласованию между энергоснабжающей организацией и потребителями.

Качество электроэнергии в настоящее время все чаще становится предметом споров между поставщиками и потребителями электроэнергии, которые в основном имеют финансовый характер. Отечественное законодательство и отраслевые нормативные документы не дают чёткого пути разрешения таких споров, особенно в условиях дефицита приборов измерительной техники, пригодных для точного измерения показателей качества электрической энергии.

Анализ доступных на рынке Украины средств измерения показателей качества электроэнергии с точки зрения задач контроля её показателей и решения задачи определения ответственности субъектов электрической сети за её ухудшение показывает, что многие компании-производители средств измерительной техники и контрольно-измерительной аппаратуры выпускают большую номенклатуру приборов для контроля качества электроэнергии [23-30].

Следует отметить, что возможность измерять напряжение и частоту и контролировать соответственно установившееся отклонение напряжения и частоту в сети имеют практически все современные 3-фазные цифровые измерительные преобразователи мощности и счётчики электроэнергии, а многие счётчики также способны регистрировать провалы напряжения. Поэтому контроль ключевых показателей качества электрической энергии, являясь важнейшей функцией автоматизированных систем диспетчерского управления и учёта электроэнергии, может и должен быть реализован уже сегодня в существующих системах без изменения парка измерительных приборов только за счёт использования нереализованных возможностей аппаратуры и программного обеспечения.

Большинство современных цифровых 3-фазных счётчиков электроэнергии позволяет контролировать качество электроэнергии по

отклонению напряжения, провалам и перенапряжениям, но, как правило, полученные таким образом сведения о недопустимо низком качестве электроэнергии требуют дополнительных исследований с помощью специализированных приборов.

Так специализированные приборы РЕСУРС UF2S (Энерготехника), РЕСУРС UF2М (Энерготехника), ЦСИКЭ (СВНЦ НАН и МОН Украины), БИМ/ПКЭ (ГОСАН), ЭНЕРГОМОНИТОР 3.3Т, ЭРИС-КЭ.06 (ЭРИС), Fluke 1760 Memobox (FLUKE), Fluke 435 (FLUKE), РМ 172ЕН (SATEC), РМ 296 (SATEC), ION 7650 (PML), ION 8500 (PML) позволяют контролировать основные показатели качества электроэнергии и определять во многих случаях источники ухудшения её качества. Для определения соответствия качества электроэнергии на Украине пригодны только приборы РЕСУРС UF2S (Энерготехника), РЕСУРС UF2М (Энерготехника), ЦСИКЭ (СВНЦ НАН и МОН Украины), БИМ/ПКЭ (ГОСАН), ЭРИС-КЭ.06 (ЭРИС), которые разработаны с учётом требований ГОСТ 13109-97.

Приборы РЕСУРС UF2М (Энерготехника), ЦСИКЭ (СВНЦ НАН и МОН Украины), Fluke 1760 Memobox (FLUKE), Fluke 435 (FLUKE) предназначены для периодического контроля, а приборы - РЕСУРС UF2S (Энерготехника), ЭНЕРГОМОНИТОР 3.3Т, БИМ/ПКЭ (ГОСАН), ЭРИС-КЭ.06 (ЭРИС), РМ 172ЕН (SATEC), РМ 296 (SATEC), ION 7650 (PML), ION 8500 (PML) - для непрерывного контроля.

Наиболее эффективны одновременные измерения качества электроэнергии во всех точках контроля обследуемого объекта, для чего необходимо использовать соответствующее количество приборов.

В связи с быстрым прогрессом микропроцессорной техники и появлением новых моделей и производителей аппаратуры для контроля показателей качества электроэнергии необходимо регулярно производить сравнительный анализ приборов для контроля показателей качества электроэнергии.

## **2.2. Исследования показателей качества электрической энергии в системах наружного освещения городов**

Отклонение показателей качества электроэнергии от нормативных оказывает большое влияние на работу установок наружного освещения, которые в темное время суток должны обеспечивать уровни яркости порядка  $1 \text{ кд/м}^2$ . Проблема качества электроэнергии важна с точки зрения его влияния как на качество освещения, так и на яркость дорожного покрытия, которая сильно зависит от отражающих свойств поверхности. Исследования специалистов в работах [16, 17, 18, 31, 32, 33] показывают, что снижение качества электроэнергии приводит к дополнительным потерям, ухудшению работы осветительных систем, сокращению срока службы источников излучения. Международными нормативными материалами регламентируются определенные уровни освещенности и яркости для различных категорий дорог, проездов, пешеходных зон и т. д. (ДБН В. 2.5-28-2006). Эти показатели в первую очередь обусловлены требованиями создания безопасных условий для населения и движения транспортных средств. При этом нужно учитывать тот факт, что лампы типа ДНаТ при одинаковых световых потоках обеспечивают большую яркость на асфальтовых и бетонных покрытиях на 22-24%, как показано в работе [34], чем лампы типа ДРИ. Это связано, во-первых, с большей световой отдачей ламп типа ДНаТ, во-вторых, они излучают больше в длинноволновой части видимого спектра, чем в коротковолновой, при этом асфальтобетонные покрытия отражают сильнее в красно-желтой части спектра, чем в зелено-голубой.

Экспериментальные исследования показателей качества электроэнергии в осветительных сетях наружного освещения проводились в Харькове и Полтаве в соответствии к требованиям действующих нормативов [16, 35].

В настоящее время потребляемая мощность на наружное освещение в Харькове составляет более 7 тыс. кВт. Система наружного освещения включает в себя более 65 тыс. световых приборов из них осветительные установки с лампами ДНаТ составляют 45944 шт. и РВЛ - 19939 шт. Протяженность сетей 3875,136 км, из них кабельных – 1150 км (422,58 км – кабельные в земле), шкафов – 707 шт., что обуславливает требования к качеству электроэнергии согласно действующим нормативам (ГОСТ 13109-97).

Результаты исследований показали (рис. 2.6), что значения установившегося отклонение напряжения в сети г. Харькова не соответствуют требованиям к качеству электрической энергии в сетях наружного освещения. Это отклонение составляет от 6 до 11%, что приводит к резкому сокращению срока службы разрядных ламп, типа ДНаТ, которые используются коммунальным предприятием «Горсвет». Полученные нами данные соответствуют реальным значениям напряжения питания в осветительных сетях большинства городов и по данным исследования [36] колеблются в пределах 180-260В. В ночное время (0-5ч) среднее значение  $U_c$  составляет в начале линии 238В. Лампы типа ДНаТ будут зажигаться и работать при напряжении питания на 10% ниже номинального при правильном типе ПРА, однако для получения максимального срока службы и светоотдачи напряжение питания сети и паспортное напряжение балласта должны быть в пределах  $\pm 3\%$ , а колебания напряжения  $\pm 5\%$  допустимы в течение короткого промежутка времени. Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения сети нарушения зафиксированы на ИП-350, ИП-283, ИП-703. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не соответствует требованиям к качеству электрической энергии за время проведения измерений на ИП-283.

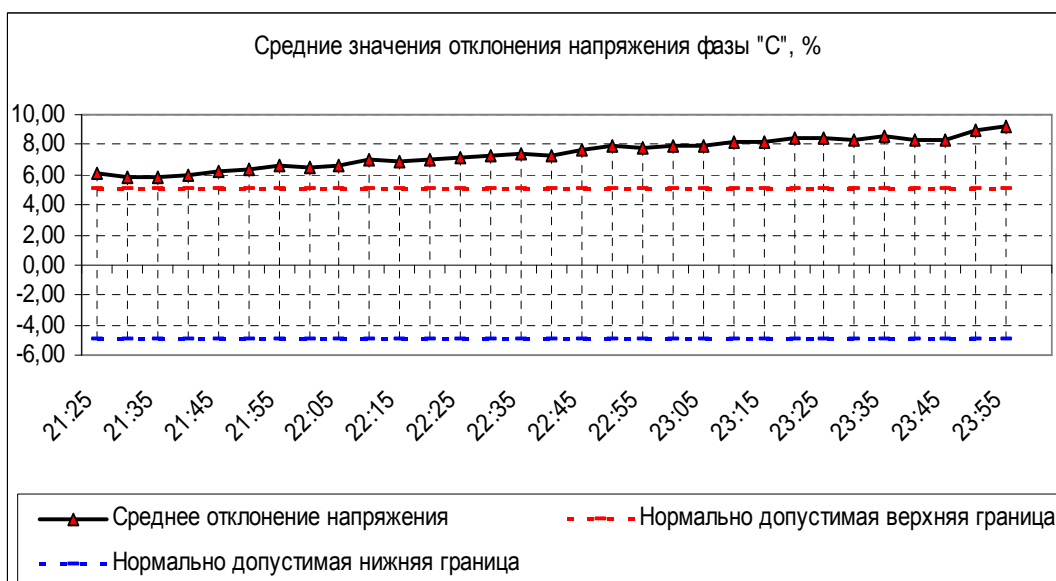
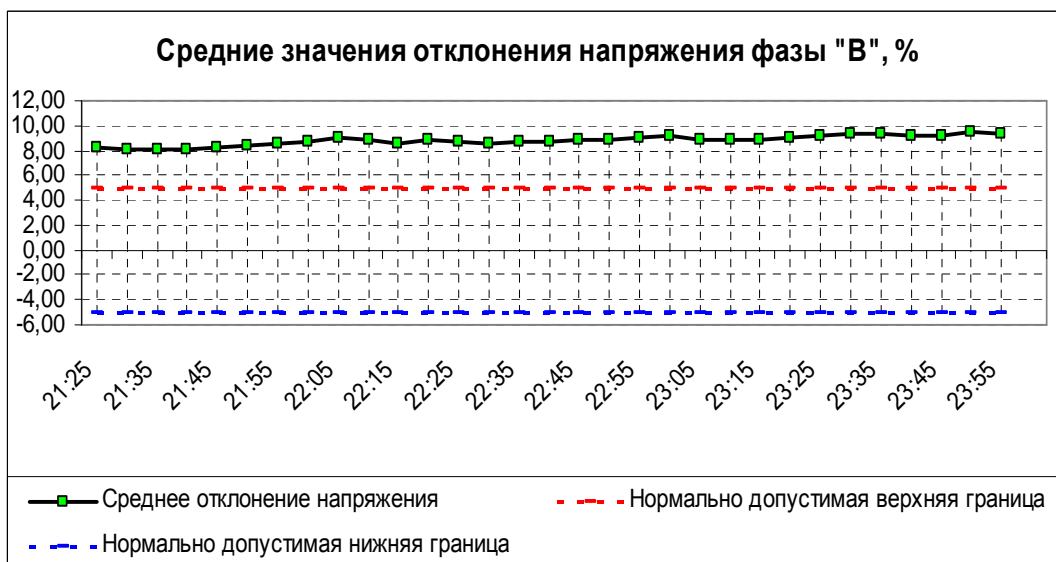
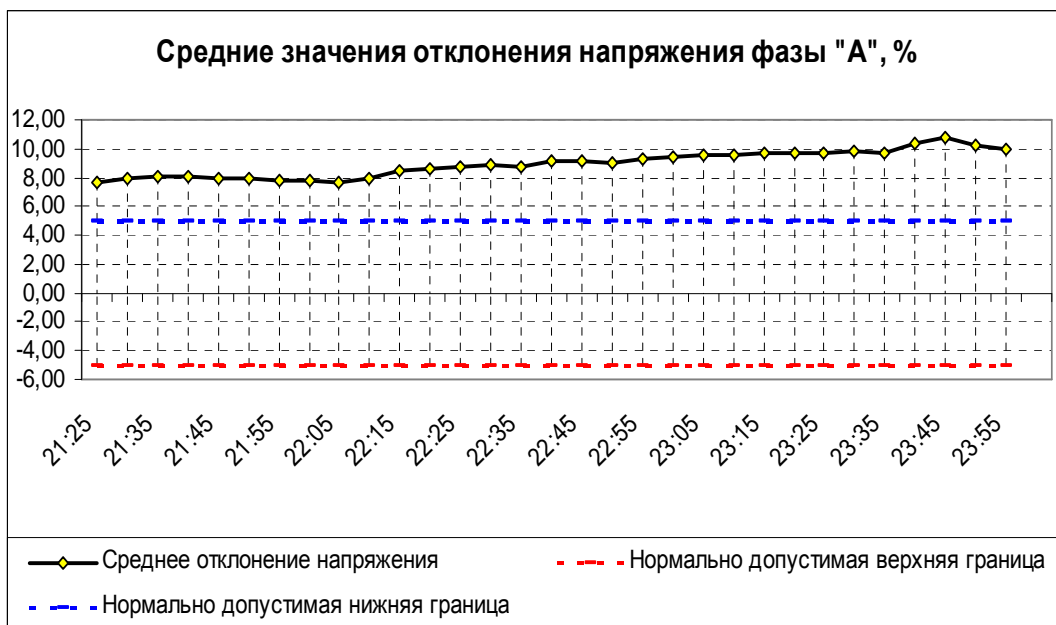


Рис. 2.6 - Установившееся отклонение напряжения

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности не соответствует требованиям к качеству электрической энергии за время проведения измерений на ИП-283, ИП-703, ИП-35. Отклонение частоты в сети не соответствует требованиям к качеству электрической энергии за время проведения измерений на ИП-350 и ИП-283.

Таким образом, основным нарушением норм качества электроэнергии является отклонение напряжения, которое приносит наибольший ущерб работе осветительных установок, так как работа с пониженными напряжениями заставляет увеличивать мощность светильников, а повышения напряжения приводят к резкому сокращению срока их службы.

Система наружного освещения г. Полтавы включает в себя более 16 тыс. световых приборов, из них осветительных установок с лампами ДРИ около 300 шт., остальные с лампами типа ДНаТ. Потребляемая мощность предприятием электросетей наружного освещения "Горсвет" составляет около 1,7 тыс. кВт. Значительная часть оборудования не соответствует технологическим и функциональным требованиям. Основная схема электроснабжения – однолучевая. Протяженность сетей наружного освещения - 470км, из них кабельных – 136км, что обуславливает требования к качеству электроэнергии согласно действующим нормативам (ГОСТ 13109-97). С целью модернизации наружного освещения предприятием "Горсвет" разработан пилотный проект «Світло». Реализация его предусматривает внедрение системы управления наружным освещением города, замену светильников на светильники с энергосберегающими лампами, а также замену кабельных линий. Для измерений показателей качества электроэнергии в сетях наружного освещения использовали многофункциональный измерительный прибор РЕСУРС – UF2М. Результаты исследований показали, что значения установившегося отклонения напряжения в сети наружного освещения не

соответствуют требованиям к качеству электрической энергии (рис. 2.7) [35].

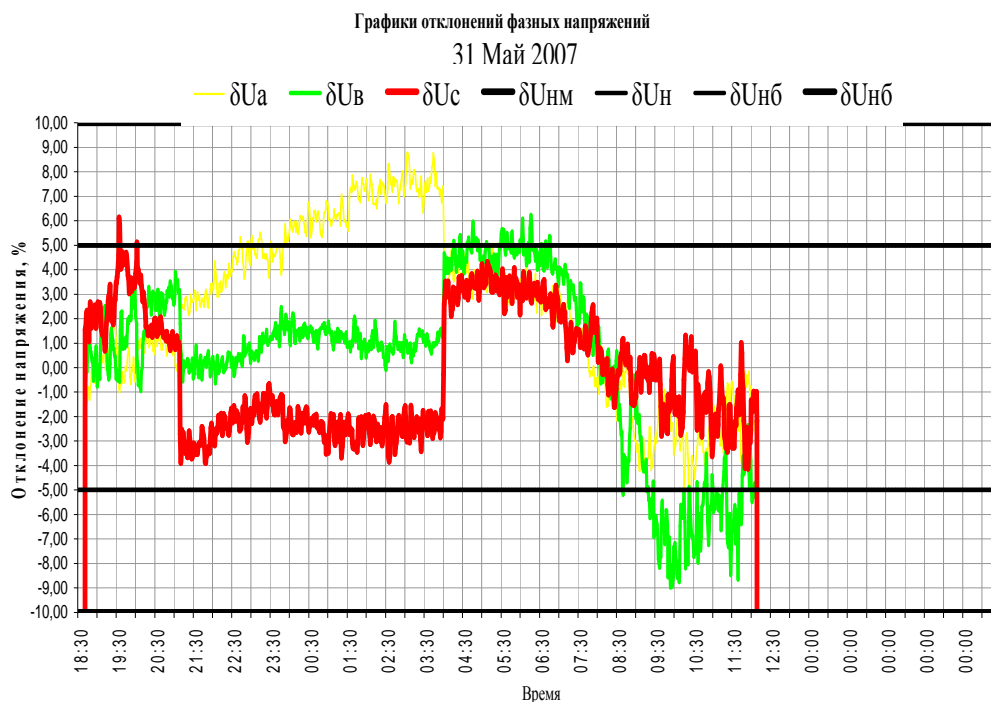


Рис. 2.7 - Установившееся отклонение напряжения

Это отклонение составляет от -9% до 9%, что приводит к резкому сокращению срока службы разрядных ламп типа ДНаТ, которые в основном используются предприятием «Горсвет» г. Полтавы.

Кратковременная доза фликера за время проведения измерений сети соответствовала требованиям к качеству электрической энергии и превышала предельно допустимые значения в 1,7 раза при включении, а также при выключении наружного освещения (рис.2.8).

Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения сети не соответствует требованиям к качеству электрической энергии, в сети присутствуют высшие гармоники, например 15, которая превышает предельно допустимое значение от 1,1 до 1,3 раза, что ведет к росту потерь, так как при одной и той же амплитуде потери на 15 гармонике больше в 2 раза, чем на первой. Отклонение частоты в сети за время

проведения измерений соответствует требованиям к качеству электрической энергии.

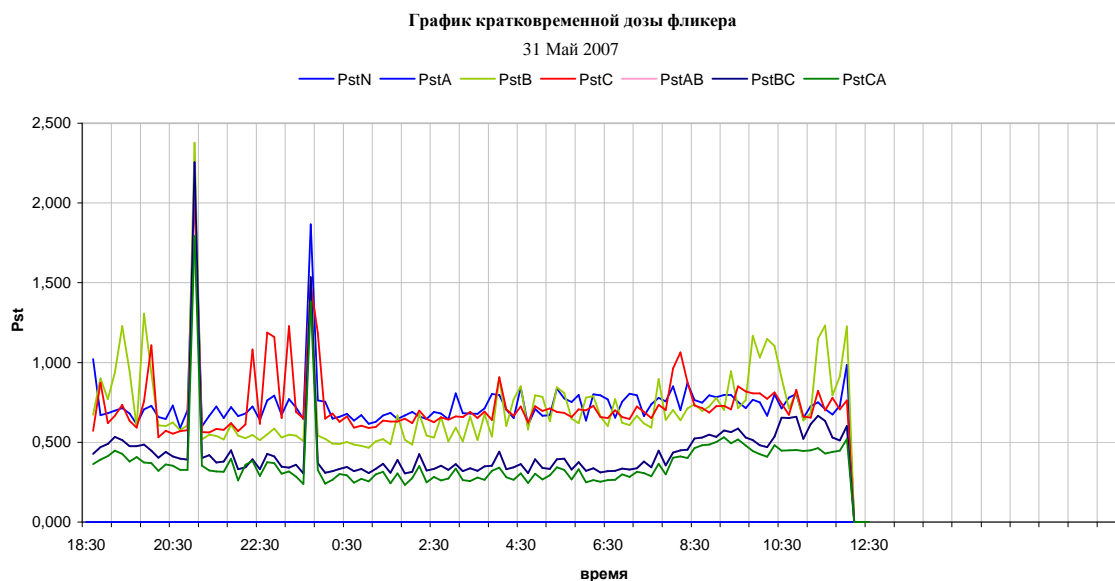


Рис. 2.8 - Кратковременная доза фликера

Существующее в настоящее время качество электроэнергии в сетях наружного освещения г. Полтавы обуславливает значительное снижение эффективности работы осветительной системы, вызывая изменения светового потока и срока службы разрядных ламп, что отрицательно сказывается как на качестве освещения, так и на яркости дорожного покрытия.

### **2.3. Исследования качества электрической энергии в сетях внутреннего освещения**

Характерной особенностью современных городов является увеличение удельного веса коммунально-бытовых нагрузок, оказывающих специфическое влияние на показатели качества электрической энергии в осветительных сетях. Случайный характер изменений напряжения в осветительных сетях с большим удельным весом нагрузок предъявляют особые требования к качеству напряжения. Величина потерь определяется

режимом работы осветительных установок, электроприемников, отдельных звеньев сети-линии и силовых трансформаторов. Предстоящий значительный рост коммунально-бытового потребления в городах Украины на перспективу до 2030 года примерно в четыре раза, а также увеличение численности городского населения подтверждают актуальность проблемы качества электроэнергии. Дальнейшее насыщение квартир приемниками электроэнергии повышенной мощности обострит вопросы качества электроэнергии в осветительных сетях. Случайный характер включения коммунально-бытовых приборов, присоединенных к однофазной сети, приводит к значительной несимметрии фазных нагрузок. При этом большинство электроприемников имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, что приводит к искажению формы кривой тока. Потребление электроэнергии на внутреннее освещение помещений составляет более 50% общего потребления бытовыми приемниками электроэнергии. Анализ электропотребления в жилищно-бытовой сфере показывает, что в отрасли имеются значительные резервы экономии электроэнергии в условиях действующих технологий. Электрические сети «Харьковгорлифт» имеют значительное количество электротехнического оборудования, которое располагается в 8500 многоэтажных домах, что обуславливает требования к качеству электроэнергии согласно действующим нормативам (ГОСТ 13109-97).

Исследовались сети 0,4 кВ на 18 объектах – это административные, общественные, спортивные учреждения и жилые здания. Измерения проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97. Использовали анализаторы напряжений и токов в электрических сетях типа АНТЭС АК-3Ф и измерительные приборы РЕСУРС – UF2M.

Отклонения напряжения за время проведения измерений были зафиксированы в 11 случаях (рис.2.9), в 7 случаях отмечены провалы напряжения и в 3 перенапряжения.

Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения сети в 11 измерениях превысил предельно допустимые значения, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности превысил предельно допустимые значения в 1 измерении, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности превысил в 4 случаях предельно допустимые значения.

В работе [17] исследовалось электропотребление общедомовой (рис.2.10), осветительной, лифтовой и квартирной нагрузки с учетом качества электроэнергии. Результаты исследований показали (рис. 2.11), что значения установившегося отклонения напряжения в сети составило за время проведения измерений от 3 (в часы максимальной нагрузки) до 10 % (в ночное время). Кратковременная доза фликера за время проведения измерений не превысила допустимых норм (рис.2.12).

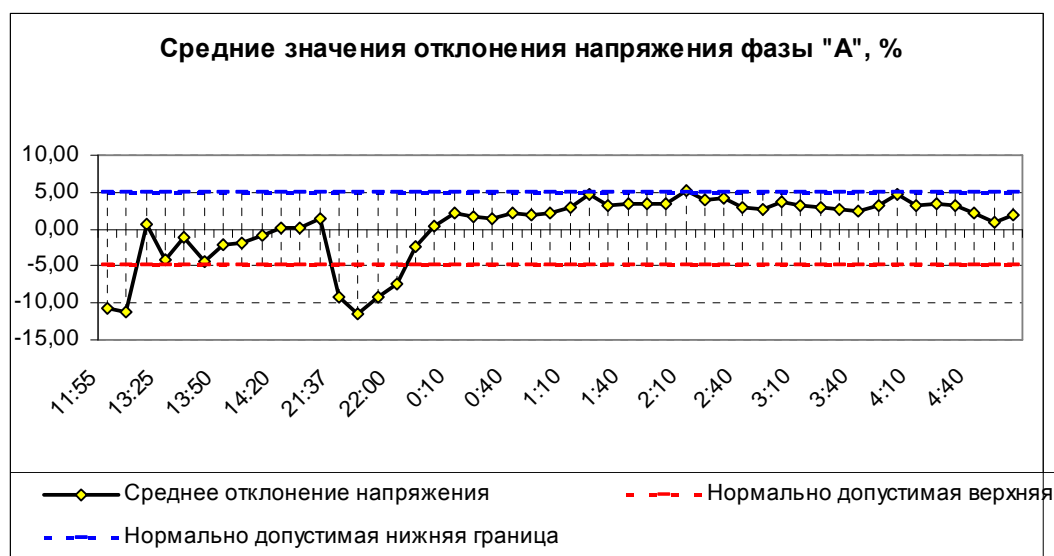


Рис. 2.9 - Установившееся отклонение напряжения (частный жилой сектор)

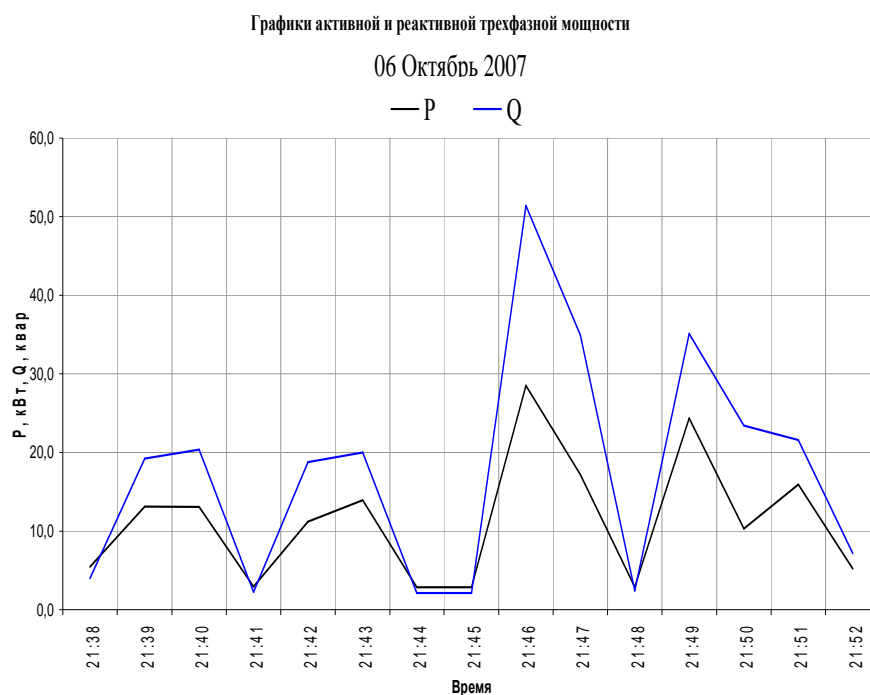


Рис. 2.10 - График активной и реактивной мощности жилого 16 этажного дома

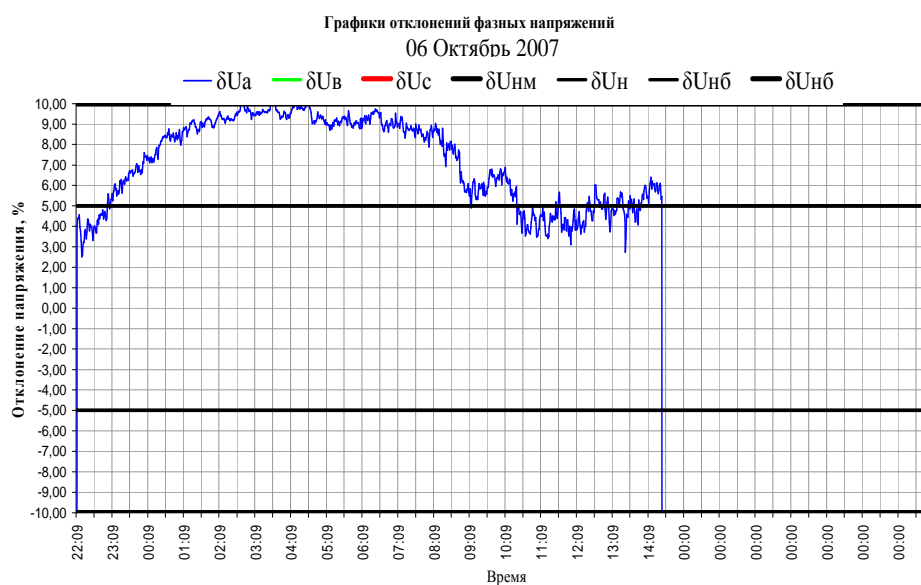


Рис. 2.11 - Отклонение напряжения в сети

Отклонение частоты в сети соответствует требованиям к качеству электрической энергии за время проведения измерений. Оно составило

максимально - 50,04, минимально - 49,97 при нормально допустимом значении 49,80-50,20 Гц.

Количество осветительных приборов, используемых для внутреннего освещения дома, составляет 230 единиц, из них около 50 приборов в рабочем состоянии. При этом мощность, потребляемая осветительными приборами составила, 2,9 кВт (фаза В). Большинство осветительных приборов таковыми назвать нельзя, так как они в основном состоят из патрона и лампы, при этом многие соединения не изолированы. Нормы освещения не соответствуют ДБН В. 2.5-28-2006, согласно которому освещенность при общем освещении в поэтажных коридорах, лестницах, лестничных площадках и лифтовых холлах жилых зданий должна составлять 20 Лк, которая практически нигде не выдерживается.

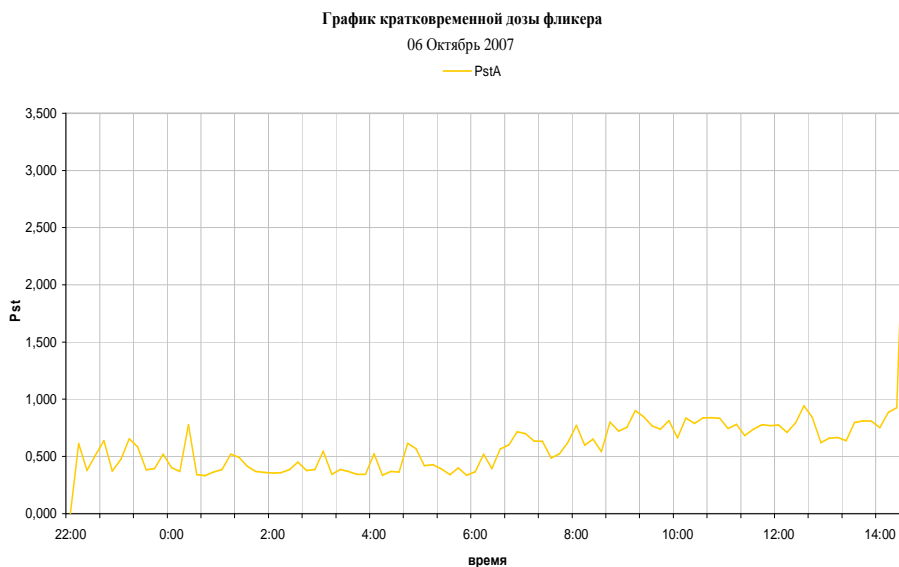


Рис. 2.12. Кратковременная доза фликера.

Использование компактных люминесцентных ламп при освещении жилых, административных, общественных и других зданий является одним из перспективных направлений экономии электроэнергии [12, 20]. Эти лампы соединяют в себе преимущества люминесцентной лампы и

лампы накаливания. Однако по сравнению с лампами накаливания они имеют следующие качества:

- уменьшение потребления электроэнергии до 80% при том же световом потоке;
- средний срок службы около 10000 часов свечения;
- возможность применения в обычных светильниках с цоколем типа E14 или E27;
- цветовая температура в пределах от 2700 К до 5000 К;
- мгновенное (0,6 с), без мерцания, зажигание;
- минимальное уменьшение светового потока, даже при низкой температуре (до -20 °C);
- небольшие размеры и хорошая цветопередача.

Из каталогов Philips, Osram, General Electric, Electrum следует, что световой поток к концу срока службы ламп составляет 85% от начального светового потока.

Безэлектродные ККЛ сегодня производятся тремя ведущими компаниями мира Philips, Osram, General Electric, а также рядом фирм КНР. Основным достоинством их является очень большой срок службы – около 100 тыс. часов, т. е. 12 лет непрерывной работы.

Следует также отметить, что в некоторых странах мира (Великобритания, КНР) приняты решения о запрете производства и продажи ламп накаливания.

Светодиоды сегодня стали полноправными партнерами ламп накаливания и разрядных ламп. Реально достигнута световая отдача более 100 лм/Вт, срок службы достиг в среднем 50 тыс. ч, а по сведениям некоторых фирм – и 100 тыс. ч. Вместе с тем главными проблемами, мешающими массовому внедрению этих перспективных источников света, являются высокая цена вырабатываемой светодиодами световой энергии и отвод тепла. [12].

В работе [37] исследовались показатели качества электроэнергии в административном здании с помощью измерительных приборов «Энергомонитор 3.3», которые производили по стандартной методике, определённой ГОСТ 13109-97, и обработали с помощью программы EMWorkNet.

Отклонения напряжения в период максимальных нагрузок не превышают предельно допустимые 5%. Ночью при отсутствии нагрузок напряжение поднимается до 237 В. Размах напряжения мал, так как измерения проводили на части электрической схемы отвечающей за внутреннее освещение. Нагрузка по фазам размещена не симметрично, так фазы А и В загружены практически одинаково, но почти в 2 раза меньше чем фаза С. Токowych гармонические составляющие значительно превышают допустимые значения, при этом преобладает гармоника № 3. Такие запредельные значения гармоник приводят к другой проблеме – несинусоидальности. Виды синусоид тока при таких значениях гармоник показаны на рис. 2.13.

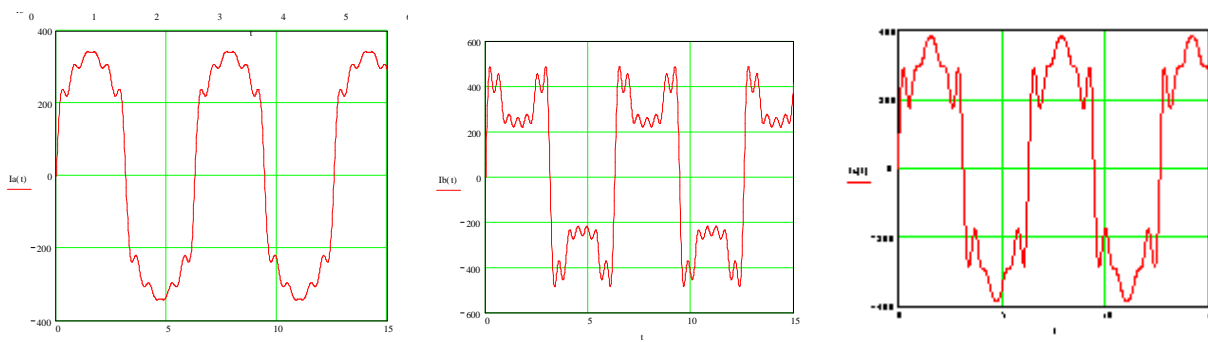


Рис. 2.13 - Синусоиды тока 3-х фаз в административном корпусе

Основной нагрузкой являлись световые приборы с люминесцентными лампами, которые и явились источниками несимметрии и высоких значений гармоник токов. При этом нужно учитывать, что напряжение на выводах ламп не должно быть выше 105% и ниже 95% номинального напряжения (ГОСТ 13109-97). Снижение

напряжения на 1% вызывает уменьшение светового потока ламп накаливания на 3-4%, люминесцентных ламп на 1,5% [38]. Перенапряжение сети приводит к увеличению потребляемой энергии осветительными установками. Так, повышение напряжения на 10% у ламп накаливания вызывает увеличение потребляемой мощности на 16,4%, а у люминесцентных ламп – на 20%. Это вызывает значительное сокращение срока службы ламп и увеличение количества ламп необходимых для эксплуатации осветительных приборов. При перенапряжении сети на 3% относительный срок службы сокращается до 66,2%, а при перенапряжении сети на 10% - до 7,8% от номинального у ламп накаливания и у разрядных ламп соответственно при 3% до 90%, а при перенапряжении 10% относительный срок службы - до 73%.

Для решения данной проблемы необходимо применять фильтрокомпенсирующие устройства. L-С цепочка, включенная в сеть, образует колебательный контур, реактивное сопротивление которого для токов определённой частоты равно нулю [39]. Подбором величин L и C фильтр настраивается на частоту гармоники тока и замыкает её, не пропуская в сеть (рис.2.14).

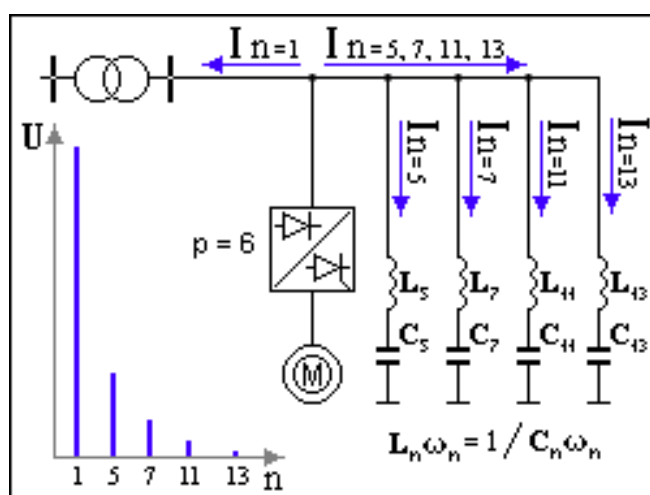


Рис. 2.14 - Фильтрокомпенсирующие устройства

Набор таких контуров, специально настроенных на генерируемые данной нелинейной нагрузкой высшие гармоники тока (рис.2.15), и образует фильтрокомпенсирующее устройство, которое не пропускает в сеть гармоники тока и компенсирует протекание реактивной мощности по сети.

Возможны и другие варианты решения этой проблемы:

- Применение оборудования с улучшенными характеристиками
- Подключение к мощной системе электроснабжения.
- Питание нелинейной нагрузки от отдельных трансформаторов или секций шин.
- Снижение сопротивления питающего участка сети.



Рис. 2.15 - Высшие гармоники тока в сети

Отклонения частоты были незначительны и не превышали 0,02 Гц, что не превышает положенного 0,1 Гц.

Таким образом, в целях энергосбережения в осветительных приборах внутреннего освещения целесообразно использовать компактные люминесцентные лампы и светодиоды. Во многих помещениях без естественного освещения, возможно, также нужно

установить датчики движения, обеспечивающие включение света только при наличии в помещении людей, а также сумеречные автоматы для отключения искусственного освещения при достаточном уровне естественного.

## **2.4. Исследования качества электрической энергии в системах промышленных и коммунальных предприятий**

Потребитель может быть источником различных помех, а уровень вносимых им помех практически неизвестен. Поэтому в 2003-2008 гг. в сетях 0,4 кВ промышленных и коммунальных предприятий нами было выполнено свыше 40 измерений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) [7]. Измерения проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97. Использовали анализаторы напряжений и токов в электрических сетях типа АНТЭС АК-3Ф. При измерениях в сетях 0,4 кВ использовали режим прямого подключения к сети без измерительных трансформаторов напряжения, что исключает дополнительные погрешности.

Измерения проводили в сетях, имеющих различные виды потребителей и различный характер нагрузки. Обобщённые результаты измерений приведены в табл. 2.1.

Измерения производились по стандартной методике. Значения ПКЭ, измеряемые каждый период основной частоты (50 Гц), усредняли на интервалах, приведенных в табл. 2.2.

Для каждого значения ПКЭ, усреднённого на указанном интервале, определяли соответствие величины нормально и предельно допустимым значениям (уставкам), приведенным в табл. 2.4. согласно [5]. Все нарушения уставок по каждому измерению зафиксированы в соответствующих журналах событий, включая фиксацию пикового значения ПКЭ.

Таблица 2.1

Обобщённые результаты измерений качества электроэнергии в различных регионах Украины (сети 0,4 кВ)

№ п/п	Код объекта измерений	Откл U	К-т несин	К-т n-й гармоники	К-т несимм по U2	К-т несимм по U0	Откл F	Провалы U	Перенапряжения	Отклонение U по 3 фазам
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Офис (г. Харьков)									
2	Бытовой потребитель (Харьковская область) (Пересечное)									
3	Бытовой потребитель (Харьковская область) (Пересечное)									
4	Коммунальный потребитель (г. Харьков) (Харьковский Горсвет РП-350)									
5	Коммунальный потребитель (г. Харьков) (Харьковский Горсвет шкаф ИП-1106)									
6	Бытовой потребитель (г. Харьков) (Пушкинский въезд №1)									
7	Коммунальный потребитель (Харьковская область) (МРК "Теплоэнергия": котельная Валки)									
8	Коммунальный потребитель (Харьковская область) (МРК "Теплоэнергия": Чугуев Котельная №6)									
9	Офис (г. Харьков) (офис Киевстар, Харьков)									
10	Трансформаторная подстанция (г. Херсон) (Херсонские горсети: ТП-306)									
11	Высшее учебное заведение (г. Харьков) (ХНАМГ)									
12	Спортивное сооружение (г. Донецк) (ФК «Шахтёр»)									
13	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ХГНИИМ «Институт метрологии»)									
14	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: Суш. камера №1)									
15	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: Суш. камера №2)									
16	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ТП800 фидер 9)									
17	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ТП800 фидер 6)									
18	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ШР02 №1)									

Продолжение табл. 2.1

19	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ШР02 №2)								
20	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ТП-800 ввод 1Т)								
21	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ТП-800 фидер 3)								
22	Научно-исследовательский институт (г. Харьков) (ИСМ «Монокристалл»: ТП-800 ввод 2Т)								
23	Учреждение здравоохранения (г. Сумы) (Сумской обл. клин. онколог. диспансер)								
24	Промышленный потребитель (г. Сумы) (ЗАО "Технология" г. Сумы ТП Ввод №1)								
25	Промышленный потребитель (г. Сумы) (ЗАО " Технология" г. Сумы ТП Ввод №2)								
26	Промышленный потребитель (г. Сумы) (ЗАО " Технология" г. Сумы ШР-6 №1)								
27	Промышленный потребитель (г. Сумы) (ЗАО " Технология" г. Сумы ШР-6 №2)								
28	Промышленный потребитель (г. Сумы) (ЗАО " Технология" г. Сумы ШР-9)								
29	Промышленный потребитель (Харьковская область) (Комбинат "Колос" г. Золочев Харьковской обл., холодильник)								
30	Коммунальный потребитель (Харьковская область) (ОКПТС: котельная Безлюдовка)								
31	Промышленный потребитель (г. Харьков) (ОАО ХФЗ "Красная звезда" ШР от яч10)								
32	Промышленный потребитель (г. Харьков) (ОАО ХФЗ "Красная звезда" ШР от яч12)								
33	Промышленный потребитель (Киевская область) (ИП Соса-Сола (пгт Бровары) ТП-1008 ф.203)								
34	Промышленный потребитель (г. Запорожье) (ОАО "Запорожжкокс" ШП 0.4 кВ всп. корп.)								
35	Промышленный потребитель (г. Запорожье) (ОАО "Запорожжкокс" ШП 0.4 кВ МСС)								
36	Сеть собственных нужд ПС-220 кВ (Донецкая область) (Донбасская ЭС НЭК "Укрэнерго" ПС Алмазная-220 ТСН-1)								
37	Сеть собственных нужд ПС-220 кВ (Донецкая область) (Донбасская ЭС НЭК "Укрэнерго" ПС Алмазная-220 ТСН-2)								
38	Промышленный потребитель (г. Киев) (ОАО "Фармак" ЩЭИ00 0_4 кВ)								
39	Учреждение (г. Киев) (Верховный суд Украины: шкаф ГРЩ-3)								
40	Учреждение (г. Киев) (Верховный суд Украины: шкаф ЯУ-2)								



Для определения статистических значений ПКЭ на всей совокупности измерений определяли экстремальные значения ПКЭ. Сначала были определены экстремальные за весь цикл измерений (как правило, 1 сутки) значения ПКЭ для каждого объекта измерений, а затем экстремальные значения ПКЭ среди всех объектов.

Для зафиксированных нарушений качества электроэнергии экстремальные по всему массиву измерений пиковые значения показателей качества составили величины, представленные в табл. 2.4.

Таким образом, результаты анализа показателей качества электроэнергии показывают, что нарушения по установившемуся отклонению напряжения отмечены на 70% объектов измерений, причём на 34% объектов отмечены нарушения предельно допустимых значений. Пиковые значения параметра 13% и - 47% от номинала при уставках  $\pm 5\%$  (нормально допустимое значение – НДЗ) и  $\pm 10\%$  (предельно допустимое значение – ПДЗ). Средние за 30 мин значения параметра достигали 13% и - 42% от номинального значения.

Нарушения по несинусоидальности напряжения отмечены на 63% объектов измерений, причём на 34% объектов отмечены нарушения предельно допустимых значений. Пиковые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения достигали 24,5% при уставках 8% (НДЗ) и 12% (ПДЗ), средние за 30 мин значения достигали 11,7%; Зафиксированы нарушения по всем высшим гармоническим составляющим до 40 включительно, наиболее значительны нарушения по следующим гармоникам (в порядке убывания): 15, 6, 21, 27, 33, 3, 18, 12, 39, 16. Отметим, что 9 гармоник с наибольшими нарушениями кратны 2, а 4 гармоники из 10 – чётные.

Нарушения по несимметрии напряжения зафиксированы на 56% объектов измерений, причём на 22% объектов отмечены нарушения предельно допустимых значений. В основном нарушения зафиксированы по нулевой последовательности.

Таблица 2.3

## Статистика нарушений уставок ПКЭ

Обозначение ПКЭ	Количество измерений	Количество выходов за НДЗ	Количество выходов за ПДЗ
$K_{0U}$	604322	93644	11575
$K_{1U}$	29982	12416	1393
$K_{2U}$	604322	1644	0
$U$	85806	36341	5615
$K_u$	1720592	163483	584
$K_u(n)$	604322 (по каждой гармонике)	1159939 (по гармоникам 2-40)	1151920 (по гармоникам 2-40)

Пиковые значение параметра 99.4% для коэффициента обратной последовательности и 9.2% для коэффициента нулевой последовательности при уставках 2% (НДЗ) и 4% (ПДЗ). Средние за 30 мин значения параметров достигали 2,2 и 7,5% соответственно.

## 2.5. Исследование качества электрической энергии в системообразующих и питающих сетях.

Качество электроэнергии в системообразующих сетях 330-750 кВ сильно влияет на качество в питающих сетях, поэтому исследования КЭЭ на основе реальных измерений являются актуальными, особенно в условиях информационного дефицита.

В работе [40], измерения проводились в 9 точках контроля уровня 330-750 кВ на 3 магистральных ПС («Североукраинская», «Лосево», «Залютино») в течение суток на каждой точке контроля в соответствии с положениями.

Таблица 2.4

Допустимые, средние и пиковые значения показателей качества электроэнергии

Обозначение показателя качества электроэнергии	Единица измерения	Допустимые значения по ГОСТ 13109-97		max (/ min ) среднее за интервал	% к НДЗ	max (/ min ) пиковые значения	% к НДЗ
		Нормально	Предельно				
Частота:	Гц	±0,2	±0,4	50.088 / 49.972	44% / 14%	-	-
$K_{0U}$	%	2	4	7.544	377%	9.161	458%
$K_{1U}$	%	±5	±10	12.802 / -41.631	256% / 833%	12.836 / -99.823	257% / 1996%
$K_{2U}$	%	2	4	2.178	109%	99.379	4969%
U	%	±5	±10	12.806 / -41.87	256% / 837%	13.149 / -47.713	263% / 954%
$K_U$	%	8	12	11.678	146%	24.490	306%
$K_U(2)$	%	2	3	2.047	102%	7.674	384%
$K_U(3)$	%	5	7,5	10.052	201%	10.457	209%
$K_U(4)$	%	1	1,5	1.733	173%	1.748	175%
$K_U(5)$	%	6	9	7.794	130%	9.343	156%
$K_U(6)$	%	0,5	0,75	1.917	383%	1.974	395%
$K_U(7)$	%	5	7,5	5.617	112%	7.762	155%
$K_U(8)$	%	0,5	0,75	0.602	120%	1.894	379%
$K_U(9)$	%	1,5	2,25	2.14	143%	2.203	147%
$K_U(10)$	%	0,5	0,75	0.499	100%	1.742	348%
$K_U(11)$	%	3,5	5,25	2.122	61%	6.331	181%
$K_U(12)$	%	0,2	0,3	0.324	162%	1.802	901%
$K_U(13)$	%	3	4,5	1.675	56%	8.831	294%
$K_U(14)$	%	0,2	0,3	0.274	137%	3.042	1521%
$K_U(15)$	%	0,3	0,45	1.222	407%	1.266	422%
$K_U(16)$	%	0,2	0,3	0.32	160%	3.810	1905%

Продолж.табл.2.4.

09

Ku( 17)	%	2	3	1.253	63%	3.267	163%
Ku( 18)	%	0,2	0,3	0.356	178%	2.801	1401%
Ku( 19)	%	1,5	2,25	1.02	68%	3.532	235%
Ku( 20)	%	0,2	0,3	0.251	126%	3.091	1546%
Ku( 21)	%	0,2	0,3	0.757	379%	4.146	2073%
Ku( 22)	%	0,2	0,3	0.232	116%	3.896	1948%
Ku( 23)	%	1,5	2,25	0.656	44%	1.512	101%
Ku( 24)	%	0,2	0,3	0.206	103%	4.265	2133%
Ku( 25)	%	1,5	2,25	0.644	43%	2.165	144%
Ku( 26)	%	0,2	0,3	0.201	101%	4.110	2055%
Ku( 27)	%	0,2	0,3	0.503	252%	3.510	1755%
Ku( 28)	%	0,2	0,3	0.21	105%	3.940	1970%
Ku( 29)	%	1,32	1,98	0.665	50%	2.546	193%
Ku( 30)	%	0,2	0,3	0.21	105%	3.078	1539%
Ku( 31)	%	1,25	1,87	0.497	40%	2.529	202%
Ku( 32)	%	0,2	0,3	0.261	131%	3.719	1860%
Ku( 33)	%	0,2	0,3	0.433	217%	3.040	1520%
Ku( 34)	%	0,2	0,3	0.212	106%	3.441	1721%
Ku( 35)	%	1,13	1,69	0.275	24%	2.012	178%
Ku( 36)	%	0,2	0,3	0.173	87%	2.860	1430%
Ku( 37)	%	1,07	1,61	0.332	31%	1.949	182%
Ku( 38)	%	0,2	0,3	0.185	93%	1.858	929%
Ku( 39)	%	0,2	0,3	0.324	162%	1.042	521%
Ku( 40)	%	0,2	0,3	0.161	81%	2.430	1215%

Примечания:



– превышение НДЗ



– превышение ПДЗ

Анализ результатов измерений показал:

- в 8 точках контроля из 9 зафиксированы нарушения КЭЭ;
- в 4 точках контроля качество электроэнергии не соответствует требованиям ГОСТ 13109-97;
- на ВЛ-330 кВ «Залютино-Артёма» зафиксированы длительные провалы напряжения;
- в 8 точках контроля зафиксированы нарушения нормально допустимых уставок по 5-й гармонической составляющей в различных фазах;
- в 3 точках контроля зафиксированы нарушения нормально допустимых уставок по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения;
- в 2 точках контроля зафиксированы постоянные превышения нормально допустимого напряжения, при этом ПС-330 кВ являются центрами питания сети 110 кВ и некоторое увеличение напряжения вполне допустимо;
- по коэффициентам несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности по частоте, выходов за допустимые значения не зафиксировано.

Как показано в работах [41, 42], для оценки качества электроэнергии в Харьковских городских сетях, которые являются многоуровневыми, было обследовано более 30 объектов всех уровней напряжений (рис. 2.16.).

В частности были проведены измерения на ПС 330/110/35 кВ «Залютино», АТП 10/04 «Коммунпромвод», тяговые ТП, ТП жилых районов г. Харькова и др.

Анализ полученных результатов показал, что на всех исследуемых объектах городских электрических сетей более 5% значений показателей качества электроэнергии превышает допустимые значения.

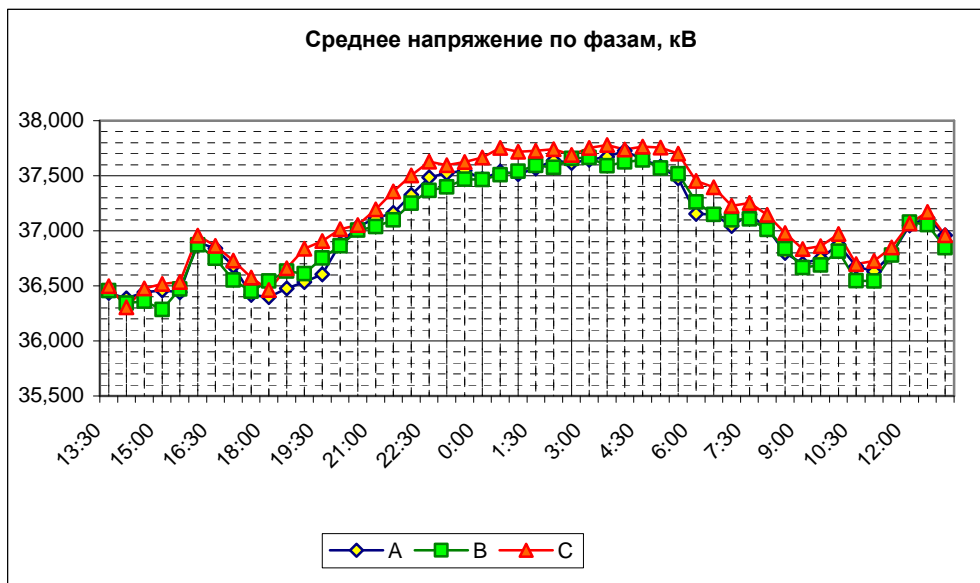


Рис. 2.16 - Среднее напряжение по фазам

Таким образом, в питающих и системообразующих сетях ОЭС Украины качество электрической энергии не соответствует нормативам, нуждается в постоянном контроле и требует улучшения.

## **ГЛАВА ТРЕТЬЯ. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Низкое качество электроэнергии, или повышение уровня электромагнитной совместимости в системе электроснабжения, обусловлено технологическим процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, т.е. процессом ее функционирования. Снижение качества электроэнергии приводит к отрицательным последствиям электротехнического и технологического характера, а именно к увеличению потерь активной и реактивной мощности, сокращению срока службы электрооборудования, увеличению капитальных вложений, нарушению условий нормального функционирования электроприемников и потребителей. Исследования [3, 15, 16, 17, 33, 35, 43, 44] показывают необходимость решения проблемы низкого качества электроэнергии на работу осветительных комплексов, а именно проведения методических, организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение качества электроэнергии в системах электроснабжения в пределах действующих норм и правил.

Анализ показывает, что современные высокоинтенсивные источники света имеют срок эксплуатации до 30 тыс. часов. Во второй половине срока эксплуатации 50% ламп выходят из строя в результате повышенного напряжения  $U_{л}$ , 14% - не загораются, другие выходят из строя по различным причинам, присущим всем разрядным лампам высокого давления [43]. Исходя из специфики режима электропитания ламп и задач увеличения срока их службы, надежности, экономичности и удобства в использовании, источники питания разрядных ламп должны обеспечивать выполнение определенного набора технических требований, выполнение которых во многом зависит от характеристик этих источников питания.

К ним относятся:

- зажигание лампы путем кратковременной подачи на ее электроды определенного повышенного напряжения;
- обеспечение необходимого светового потока при минимально возможной потребляемой мощности;
- стабилизация мощности, потребляемой лампой;
- обеспечение требуемых значений коэффициента амплитуды (коэффициента пульсаций при питании постоянным током) и степени симметрии формы тока лампы для повышения ее долговечности;
- защита при аномальных режимах;
- электромагнитная совместимость с сетью и низкий уровень звуковых и радиопомех;
- обеспечение общетехнических требований [45].

Дополнительные потери и сокращение срока службы изоляции подробно рассмотрены во многих работах, в которых для каждого вида силового оборудования получены аналитические выражения для их количественной оценки [2].

Используя метод симметричных составляющих и разложение несинусоидального периодического сигнала в ряд Фурье дополнительные потери активной мощности можно выразить в общем виде следующим образом:

$$\Delta P_{\text{дон}} = \sum_{n=2}^{40} (I_{nA}^2 + I_{nB}^2 + I_{nC}^2) \cdot r_n + 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 + 3 \cdot I_0^2 \cdot r_0,$$

где  $I_{nA}$ ,  $I_{nB}$  и  $I_{nC}$  - токи высших гармонических составляющих в фазах А, В и С соответственно;  $r_n$  - активное сопротивление току n-й гармонической составляющей;  $I_2$  и  $I_0$  - токи обратной и нулевой

последовательностей;  $r_2$  и  $r_0$  - активные сопротивления обратной и нулевой последовательностей.

Сокращение срока службы оборудования определяется в первую очередь, сокращением срока службы изоляции за счет нарушения температурных режимов работы. Сокращение срока службы изоляции определяется выражением:

$$z = C \cdot e^{-b \cdot \theta},$$

где  $C$  и  $b$  – постоянные коэффициенты для данного вида изоляции;  $\theta$  – температура изоляции.

### **3.1. Сравнительный анализ источников питания разрядных ламп**

Источники питания разрядных ламп называются пускорегулирующими аппаратами (ПРА), от которых в значительной мере зависит качество освещения, экономичность и продолжительность срока службы ламп. ПРА – это светотехническое изделие, с помощью которого осуществляется питание источника света от электрической сети, обеспечивающее необходимые пусковые и рабочие режимы источника света, конструктивно оформленного в виде единого аппарата [12]. ПРА классифицируют по следующим признакам: по типу источника света, по типу токоограничивающего элемента, по величине потерь мощности в ПРА, по виду входной энергии, по возможности регулирования светового потока, по конструкции и по уровню шума. Требования, предъявляемые к источнику питания, определяются свойствами разряда и условиями эксплуатации разрядной установки. Их можно разделить на общие и специальные [45, 46].

К общим требованиям к источнику питания относятся:

- зажигание разряда - пробой межэлектродного промежутка и формирование в нем требуемого вида разряда.

- выход на рабочий режим - установление рабочих параметров разряда после его зажигания.

- устойчивое горение разряда - существование разряда в заданном диапазоне электрических параметров.

- стабильность и возможность регулирования электрических параметров - мощности или тока в процессе эксплуатации. На практике наиболее важно обеспечить стабильность мощности разряда при колебаниях напряжения питания, технологическом разбросе и изменении характеристик разряда [45,46, 47].

Кроме того, источники питания должны отвечать другим общим требованиям. К ним относятся: защита при аварийных (аномальных) режимах в питающей сети и цепи нагрузки; электромагнитная совместимость с питающей сетью; работоспособность в заданных климатических и механических условиях и др.

Особо следует отметить требования к надежности, непосредственно связанной со сроком службы установки, экономичности (КПД) и массогабаритными показателями источника питания. Последние два показателя взаимосвязаны между собой. Увеличение КПД ведет к уменьшению тепловыделения и соответственно создает условия для более компактной конструкции источника питания и установки в целом.

Специальные требования к источнику питания определяются видом разрядного прибора или разрядной установки, режимом эксплуатации или технологическим процессом.

Исходя из перечисленных выше общих требований, источника питания должен обеспечить электропитание разряда в статических и динамических режимах в области характеристик, ограниченных кривой, определяющей предельные значения электрических параметров (линия *a-b-c-d* на рис. 3.1). Ограничения накладываются как условиями эксплуатационной надежности, долговечности разрядной установки, так и условиями реализации оптимальных технико-экономических показателей

самого источника питания. Предельные параметры по току и напряжению определяют установленную мощность источника питания, от которой зависят его массогабаритные показатели и стоимость.

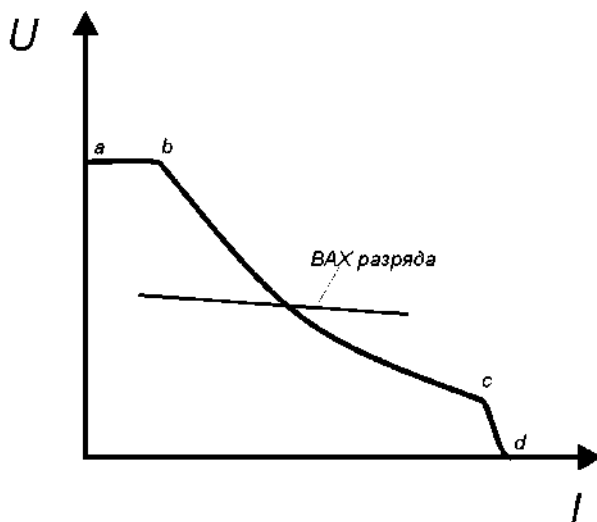


Рис. 3.1 - Рабочая область характеристик источника питания

Участок  $a-b$  соответствует режиму ограничения напряжения, определяемому условием надежного зажигания (перезажигания) и поддержания горения разряда. Участок  $b-c$  определяет максимальную мощность в рабочем режиме. Превышение этой мощности вызывает недопустимые с точки зрения эксплуатации режимы, приводящие к сокращению срока службы разрядной установки.

Участок  $c-d$  соответствует ограничению тока при выходе на рабочий режим. Значение этого тока определяет скорость выхода на рабочий режим и ограничивается, как правило, явлениями, приводящими к ускоренному выходу из строя электродов [12]. Наклон кривой на участке токоограничения зависит от применяемых средств стабилизации тока.

Источник питания характеризуется семейством ВАХ, которые располагаются в рабочей зоне и формируются элементами силовой цепи и системой управления.

Стабильность электрических параметров, обычно мощности или тока, определяется по их отклонению от заданных значений при изменении нагрузки, напряжения питающей сети, а также характеристик источника питания, вызванных технологическим разбросом параметров его элементов или изменением температуры. В качестве численного значения используется коэффициент неустойчивости [46], определяемый отношением относительного отклонения стабилизируемого параметра к относительному изменению параметра, вызывающего это отклонение. Например, коэффициент неустойчивости мощности  $P$  при изменении сетевого напряжения  $U_c$  определяется формулой

$$\lambda_{P,U_c} = (\partial P / P) / (\partial U_c / U_c). \quad (3.1)$$

Коэффициент неустойчивости тока разряда при изменении напряжения сети равен

$$\lambda_{I,U_c} = (\partial I / I) / (\partial U_c / U_c). \quad (3.2)$$

*Устойчивость горения* стационарного разряда в области точек равновесия, определяемых пересечением ВАХ разряда и ВАХ ИП, обеспечивается при выполнении известного условия:

$$R_{\text{дин.разряда}} - R_{\text{дин.ИП}} > 0, \quad (3.3)$$

где  $R_{\text{дин.разряда}} = \partial U / \partial I$  - динамическое сопротивление разряда в точке равновесия;

$R_{\text{дин.ИП}} = \partial U_{\text{ИП}} / \partial I_{\text{ИП}}$  - динамическое сопротивление ИП в точке равновесия.

Как следует из (3.3), при использовании ИП с характеристиками источника тока ( $R_{\text{дин.ИП}} \rightarrow -\infty$ ) условие устойчивого горения выполняется для всех возможных ВАХ разряда.

Для зажигания ламп и поддержания рабочего режима используются как электромагнитные ПРА, так и электронные ПРА (ЭПРА) или электронные балласты.

Когда требуемое напряжение дуги лампы ниже переменного напряжения сети, простейшим балластом является реактор, последовательно включенный с лампой (рис. 3.2). Для зажигания лампы используется устройство зажигания.



Рис. 3.2 - Схема электромагнитного ПРА

Недостатки электромагнитных ПРА:

- мерцание света,
- нестабильность мощности и светового потока лампы из-за колебаний напряжения;
- низкий коэффициент мощности;
- повышенный уровень шума;
- отсутствие возможности управления светом.

Электромагнитные ПРА из-за своих недостатков не позволяют в полной мере раскрыть все возможности освещения с использованием разрядных ламп.

Применение вместо электромагнитных ПРА электронных устраняет указанные недостатки и обеспечивает дополнительные преимущества для потребителя.

Принцип действия ЭПРА основан на преобразовании тока сетевой частоты или постоянного тока обычно в ток повышенной частоты для питания разрядных ламп [12, 46]. ЭПРА содержит необходимые узлы для поддержания оптимального режима зажигания и работы лампы, а также устройства контроля ее работоспособности и средства защиты от внешних аварийных режимов по сети и нагрузке. Кроме того, ЭПРА могут работать с устройствами управления светом.

Преимущества ЭПРА по сравнению с электромагнитными ПРА:

- мгновенное (без мерцаний и шума) зажигание ламп;
- комфортное освещение (приятный немерцающий свет без стробоскопических эффектов и отсутствие шума) при работе в высокочастотном диапазоне;
- стабильность освещения независимо от колебаний сетевого напряжения;
- отсутствие миганий и вспышек неисправных ламп, отключаемых электронной системой контроля неисправностей;
- высокое качество потребляемой электроэнергии – высокий коэффициент мощности, близкий к единице благодаря потреблению синусоидального тока с нулевым фазовым сдвигом;
- уменьшенные масса и габариты благодаря работе на повышенной частоте с высоким КПД и отсутствию необходимости в дополнительном оборудовании для компенсации реактивной мощности и снижения стробоскопического эффекта.

Экономическая эффективность использования ЭПРА заключается в следующем:

- уменьшенное на 10-25 % энергопотребление (при сохранении светового потока) за счет более высокого КПД и повышения светоотдачи лампы на большей частоте;
- увеличенный на 50% срок службы лампы благодаря щадящему режиму работы и пуска;
- снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения числа заменяемых ламп;
- дополнительное энергосбережение при управлении мощностью лампы.

Использование системы управления позволяет отключать или переводить на более экономный режим светильники с разрядными лампами в зависимости от условий освещенности, времени суток или других условий (например, изменение освещения в зависимости от наличия людей в помещении), а также дает возможность увеличения и уменьшения светового потока по желанию пользователя.

Высокочастотный электронный балласт поддерживает выходные параметры освещения дольше, благодаря тому, что может подавать дополнительное напряжение с целью продления нормального процесса старения лампы. При питании током повышенной частоты лампы имеют лучшую стабильность дуги и меньшее изнашивание электродов. Поэтому смена ламп требуется не так часто. Кроме того, ЭПРА конкурентоспособны по стоимости с электромагнитными ПРА, поскольку высокая начальная цена компенсируется увеличением срока службы и стоимостью электроэнергии.

К источникам питания ламп, как и ко всем устройствам широкого применения, ставится ряд жестких экономических требований. При этом на первый план выходит низкая стоимость при высокой надежности, приемлемой экономичности и соблюдении нормативных требований. Это приводит к тому, что конкуренцию выдерживают лишь ЭПРА с предельно простой топологией, соответствующей функциональным требованиям. В

результате схемные решения практически всех производителей имеют сходную структуру, которая приведена на рис 3.3. Общим для ЭПРА является наличие входного фильтра (включая фильтр радиопомех), и высокочастотного инвертора. При питании от сети ЭПРА содержит выпрямитель. Высокое качество потребляемой энергии обеспечивается присутствием в структуре корректора коэффициента мощности (ККМ).

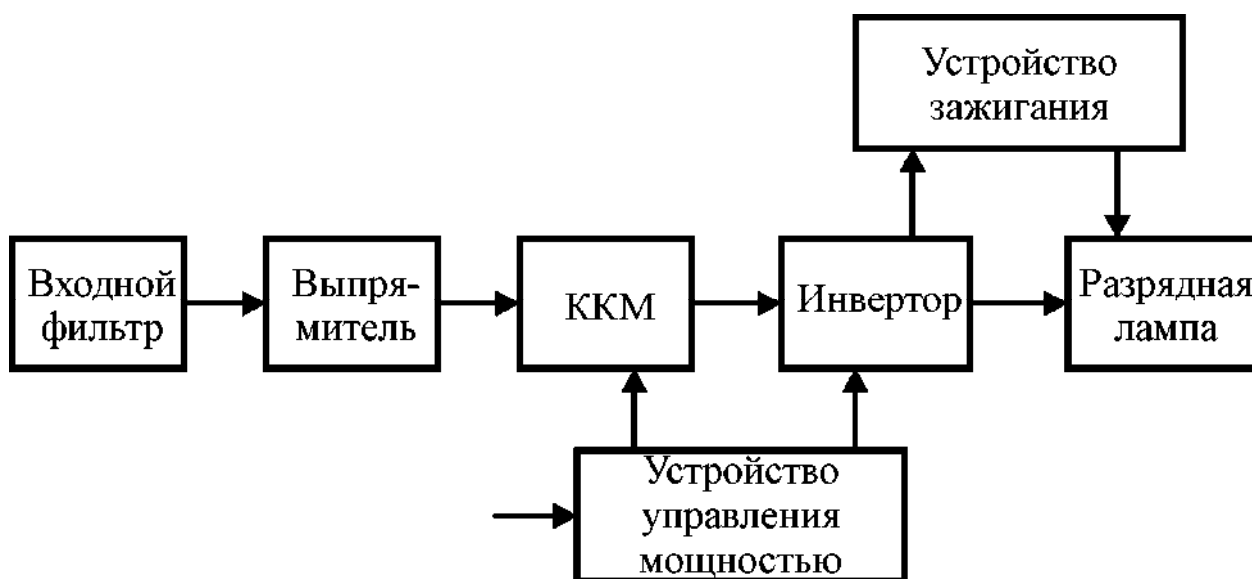


Рис. 3.3 - Функциональная схема ЭПРА

ЭПРА в настоящее время разрабатываются на ключевых элементах трех типов: биполярные транзисторы, МДП-транзисторы и IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором). Выбор определяется конъюнктурой, опытом и предпочтениями разработчика. Последние два типа являются удобными для непосредственного управления от специализированных интегральных схем, выпускаемых в увеличивающемся ассортименте ведущими фирмами и отечественными предприятиями.

### **3.2. Влияние низкого качества электроэнергии на эксплуатационные характеристики источников оптического излучения и электрических систем**

Источники оптического излучения можно квалифицировать по многим признакам, главными из которых являются: механизм генерирования света, область применения, конструктивно-технологические особенности. По физической природе оптическое излучение делят на тепловое излучение и люминесценцию[47-51].

К тепловым электрическим источникам света оптического излучения относятся прежде всего разнообразные лампы накаливания, в которых свет излучается проводником, накаливаемым протекающим через него электрическим током. К этому классу можно также отнести: электрические дуги между угольными электродами, газонакаливаемые лампы, электрические инфракрасные излучатели.

Действие тепловых источников света основано на законах теплового излучения. Согласно этим законам для получения высокого КПД в видимой области спектра необходимо нагревать тела до температуры около 6000 К и стремиться к тому, чтобы излучение источника света сосредоточивалось по возможности только в видимой области. В настоящее время наивысшие температуры нагрева и световые КПД удается получить при применении вольфрама – 3360 К и карбидов тантала и гафния – 4200 К, при этом значительная часть излучения лежит в ИК-области.

К люминесцентным источникам света относятся такие источники, свечение которых основано на явлении люминесценции. Оно возникает при локализованном поглощении внешней энергии частицами вещества с последующим излучением этой энергии и поэтому не связано с тепловым состоянием тела. Люминесценцией называют спонтанное излучение, избыточное по сравнению с тепловым, если его длительность значительно

превышает период колебаний электромагнитной волны соответствующего излучения. Спектр люминесценции может состоять из отдельных линий – излучение отдельных атомов и ионов, полос – излучение молекул и непрерывных участков – излучение твердых тел и жидкостей. В зависимости от рода применяемой первичной энергии люминесценция делится на различные виды: электролюминесценция – свечение веществ под воздействием электрического поля, фотолюминесценция – свечение веществ при облучении их светом, хемилюминесценция – свечение в результате химической реакции и др.

В разрядных лампах в основном используется дуговой разряд, который характеризуется высокими плотностями тока на катоде ( $10^2 - 10^4 \text{ А/см}^2$ ) и может происходить в широком диапазоне давлений (от 0,1 до  $10^7$  Па) и токов (от десятых долей до сотен ампер) [45]. По составу газовой или паровой смеси, в которой происходит разряд, разрядные лампы делятся на лампы с разрядом в газах, в парах металлов и парах металлов и их соединений. В зависимости от значения рабочего давления разрядные лампы делятся на лампы низкого давления НД (до 25 кПа), лампы высокого давления ВД (от 25 до  $10^3$  кПа) и сверхвысокого давления СВД(свыше  $10^3$  кПа).

Большинство используемых в настоящее время разрядных ламп составляют люминесцентные лампы (ЛЛ), которые являются разрядными лампами низкого давления (РЛНД). Свет в люминесцентных лампах возникает в результате преобразования люминофорным покрытием ультрафиолетового излучения в видимый свет после возникновения в них газового разряда.

Люминесцентные лампы имеют более продолжительный срок службы, чем лампы накаливания, их низкая интенсивность освещения предпочтительна для многих внутренних помещений, таких как банки, офисы, школы, магазины, больницы и т.п. Люминесцентные лампы обеспечивают светоотдачу до 100 лм/Вт, в то время как лампы

накаливания имеют диапазон от 15 до 25 лм/Вт и превращают до 25% используемого ими электричества в свет, тогда как лампы накаливания лишь 5% - в свет, а остальные 95% - в тепло. Повышенная светоотдача люминесцентных ламп обеспечивает в пять раз меньшее энергопотребление. При этом экономия затрат на электроэнергию может достигать 80%.

В зависимости от площади излучающей поверхности принято деление на трубчатые люминесцентные лампы и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Вследствие большой излучающей поверхности трубчатые люминесцентные лампы создают более рассеянный свет, чем малоразмерные источники, такие как лампы накаливания, галогенные и газоразрядные лампы высокого давления. Благодаря этому свойству, а также повышенной энергетической эффективности, люминесцентные лампы являются идеальными для освещения больших открытых помещений в промышленных, общественных и коммерческих зданиях.

КЛЛ имеют размер, форму и распространение света как и сравнимые с ними лампы накаливания, но срок службы и эффективность преобразования энергии, как у обычных люминесцентных ламп. Благодаря малым габаритам эти лампы имеют ту же область использования, что и лампы накаливания, но обеспечивают при этом повышенную экономичность и долговечность.

Другую большую группу составляют разрядные лампы высокого давления или лампы высокой интенсивности, среди которых ртутные лампы высокого давления, натриевые лампы высокого давления и металлогалогенные. Дуговые трубки (горелки) в этих лампах помещены во внешнюю колбу, которая служит для обеспечения теплового режима. В отличие от ламп низкой интенсивности, лампы высокой интенсивности имеют гораздо меньшие дуговые трубки, работающие при высоких давлениях рабочей смеси, более высоких температурах и плотностях

мощности. Как правило, чем больше давление в дуговой трубке, тем выше интенсивность света.

Лампы высокой интенсивности используют в основном для наружного освещения, т. е. освещения больших площадей, таких как улицы, магистрали, автомобильные стоянки, аэропорты, грузовые дворы и т.д.

Разрядные лампы высокого и особенно сверхвысокого давления, имеющие яркости в различных областях спектра, в сотни раз превосходящие яркости ламп накаливания, с успехом применяются в различных светоптических приборах и установках, например, в фотолитографических установках, проекционной аппаратуре и др.

Следует отметить, что разрядные лампы, как правило, работают на переменном токе, чтобы уравнивать износ электродов и избежать явления катафореза (в лампах на парах металлов). Однако в тех случаях, когда требуется низкий уровень пульсаций светового потока, чтобы не было стробоскопического эффекта, например, в кино и на телевидении, используют лампы, работающие на постоянном токе.

Практически все разрядные люминесцентные лампы при постоянной температуре колбы имеют статические ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Лампа обладает семейством ВАХ в зависимости от значения температуры, если поддерживать ее на заданном уровне при изменении тока или мощности.

С увеличением температуры, вызванной изменением тока или при разогреве после зажигания напряжение на лампе изменяется и, как правило, увеличивается. Инерционность ВАХ при установившейся (равновесной) температуре обуславливается тепловой инерционностью лампы, составляющей десятки и сотни секунд. Поэтому, при относительно быстрых изменениях режима питания, когда температура ( $T$ ) разрядной трубки не успевает измениться, следует пользоваться ВАХ для  $T = const$  (кривые а1 – а3 на рис. 3.4) [46]. При медленных изменениях

следует применять так называемые равновесные ВАХ (кривая б на рис. 3.4).

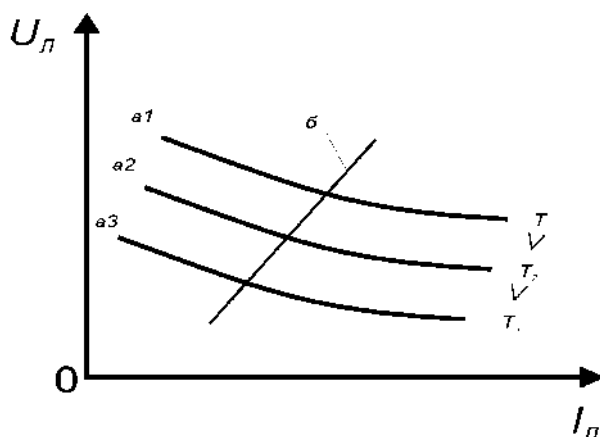


Рис. 3.4 - ВАХ разрядной лампы высокого давления

Наиболее значительно в зависимости от прогрева изменяется напряжение у разрядных ламп высокой интенсивности с парами металла. Например, напряжение на натриевой лампе высокого давления изменяется с момента пуска в 5-6 раз. Это вызвано испарением металла и ростом давления в разрядной трубке с увеличением температуры. В то же время в ксеноновых лампах сверхвысокого давления напряжение с момента пуска меняется незначительно.

Параметры лампы, стабильные в начале эксплуатации, со временем изменяются. В наибольшей мере это относится к источникам света на парах металлов (ДРЛ, ДНаТ, МГЛ), сопротивление которых может изменяться в течение эксплуатации в 4-5 раз, в меньшей мере – к лампам низкого давления, например, люминесцентные лампы, напряжение на которых может значительно изменяться лишь в самом конце срока службы. Продолжительность жизни ламп в основном ограничивается уменьшением эмиссионной способности активных элементов электродов, что вызывает сопутствующее и укорачивающее срок службы увеличение напряжения горения на протяжении срока работы лампы. Поэтому желательно снижать ток лампы с повышением напряжения, то есть обеспечивать работу лампы с постоянной мощностью.

Кроме того, наличие дестабилизирующих факторов (ухудшение температурных условий эксплуатации, рост сетевого напряжения) может вызвать увеличение мощности и, соответственно, температуры внутри разрядной трубки, что сопровождается повышением напряжения на лампе. Длительная работа при повышенных температурах вызывает резкое сокращение срока службы лампы. Поэтому для разрядных ламп необходим токовый балласт с ограничением мощности так, чтобы уровень номинальной мощности не превышался в процессе эксплуатации лампы

Режим работы, в котором параметры лампы отличаются от регламентированных нормативными документами, можно считать аномальным. Возможны следующие режимы [45]:

- лампа не зажигается (дезактивированы электроды либо повреждена разрядная трубка);
- лампа работает при пониженных или повышенных установившихся напряжениях  $U_{\text{л}}$
- дезактивирован один из электродов лампы, что приводит к повышению напряжения на ней в один из полупериодов или к работе в так называемом диодном режиме.

Длительная работа в аномальном режиме может привести к перегрузкам элементов силовой части источника питания и выходу их из строя. Поэтому система управления ИП должна отслеживать эти режимы и отключать питание лампы при длительном их проявлении. Так как отклонение напряжения в сетях наружного освещения значительно превышает рекомендуемые публикацией МЭК 662 значения  $\pm 5\%$ , а в осветительных установках еще используют схемы с индуктивным балластом, которые могут обеспечивать удовлетворительные параметры ламп высокого давления только при питании от сети с отклонением напряжения в пределах  $\pm 5\%$ , для получения максимального срока службы и светоотдачи напряжение питания сети и паспортное напряжение

балласта должны быть в пределах  $\pm 3\%$  [16]. Эти факторы приводят к резкому сокращению срока службы разрядных ламп, типа ДНаТ или ДРИ, особенно тех, которые работают в начале линии [52,53]. Анализ характеристик нагрузки с разными типами балластов показал, что значения светового потока в течение срока эксплуатации для системы “Лампа-ПРА” отличаются от соответствующих данных, которые обычно приводятся в каталогах для номинальной лампы [47].

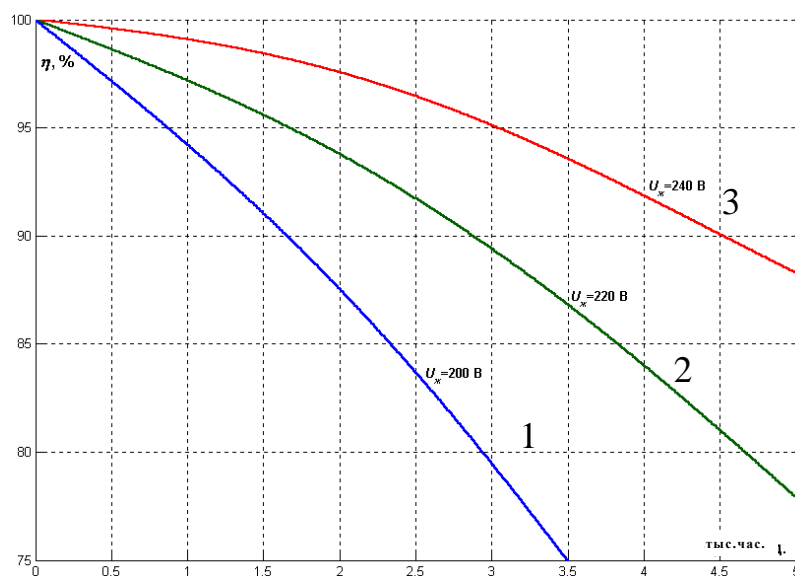


Рис.3.5 - Относительное изменение световой отдачи лампы типа ДНаТ 100 в процессе горения в сети с напряжением: 1 – 200 В; 2 – 220 В; 3 – 240 В

Степень отличия определяется отклонением мощности лампы от номинальной, которое, в свою очередь, определяется характеристикой кривой балласта и изменением напряжения на лампе в течение срока эксплуатации. Срок эксплуатации ламп в светильниках меньше в 1,5-2 раза, чем при испытаниях на стенде. Увеличение  $U_c$  до 240 В ведет к увеличению мощности ДНаТ на 28% и необоснованному использованию электроэнергии в 1,28 раза больше, чем надо. Снижение напряжения на 10% уменьшает световой поток до 22% [19]. При этом увеличивается скорость эрозии электродов, так как снижается их рабочая температура.

При работе на переменном токе промышленной частоты каждый полупериод происходит перезажигание лампы и возможны пики перезажигания, связанные с явлениями на катодах, что также приводит к дополнительному распылению электродов. В результате происходит выход лампы из строя из-за дезактивации электродов, повышенного напряжения зажигания или недостатка газа для существования разряда.

При повышении амплитуды тока по отношению к его действующему значению ток термоэмиссии катодов не обеспечивает в полной мере пиковый ток лампы, растет ионная составляющая тока, приводящая к дополнительному распылению катода. В сильноточных разрядах постоянного тока при пульсациях тока, превосходящих определенные значения, и при работе на переменном токе, происходит разрушение рабочей поверхности анода, вызванное явлениями термоусталости металла. Скорость разрушения возрастает со временем, поскольку на разрушенной поверхности повышается работа выхода вследствие испарения активирующих присадок и связанного с этим повышения температуры. Особенно сильно этот процесс наблюдается при разряде в ксеноне и других более легких инертных газах.

Увеличение силы тока по сравнению с оптимальной для работы катодов вызывает снижение срока службы лампы. Уменьшение силы тока ниже определенного предела также ведет к снижению срока службы. Это условие ограничивает возможности регулирования электрического режима разрядных ламп при отсутствии специальных мер по поддержанию термоэмиссии катодов на необходимом уровне.

Срок службы лампы существенно зависит от формы тока. При повышении амплитуды тока по отношению к его действующему значению ток термоэмиссии катодов не обеспечивает в полной мере пиковый ток лампы, растет ионная составляющая тока, приводящая к дополнительному распылению катода. Если срок службы лампы при синусоидальном токе (коэффициент амплитуды равен 1,41) принять за 100%, то при

коэффициенте амплитуды 2 продолжительность горения падает на 30-40% [18]. Поэтому в требованиях к источникам питания ламп указано, что коэффициент амплитуды не должен превосходить значения, равного 1,7 составляющего 95% срока службы лампы при синусоидальной форме тока. Длительная работа в аномальном режиме может привести к перегрузкам элементов силовой части источника питания и выходу их из строя. Поэтому система управления источника питания осветительной установки должна отслеживать эти режимы и отключать питание лампы при длительном их проявлении.

При рассмотрении проблем энергоэффективности следует учитывать не только световую отдачу, срок службы, но и считаться с «электрическим загрязнением» электрической сети высшими гармониками. Дешевые электронные ПРА, поставляемые из Юго-Восточной Азии, имеют коэффициент гармоник потребления тока (Total Harmonic Distortion) 169%, только с учетом первых 6 высших гармоник [47]. Это необходимо учитывать при работе осветительных установок и применять схемы компенсации.

Нами на примере лампы ДНаТ-250 проведены исследования [54] возможности значительного изменения мощности при обеспечении устойчивой работы, а также влияния изменения мощности на качество электрической энергии. На рис.3.6. приведены результаты изменения светового потока от напряжения сети. При изменении напряжения от 120 до 250 В световой поток лампы ДНаТ-250 изменяется приблизительно в 20 раз. Устойчивая работа лампы соответствует диапазону изменения напряжения 170 – 250 В. В этом диапазоне мощность лампы изменяется в 3 раза.

Трехкратное изменение светового потока обеспечивается при снижении напряжения до 180 В, т.е. находится в области устойчивого режима лампы. В мощных осветительных установках изменение мощности в таком широком диапазоне может снижать качества электрической энергии, питающей сеть. Поэтому нами были проведены исследования влияния изменения режима

мощности на основные показатели качества, в первую очередь на гармонический состав напряжения и  $\cos \varphi$ .

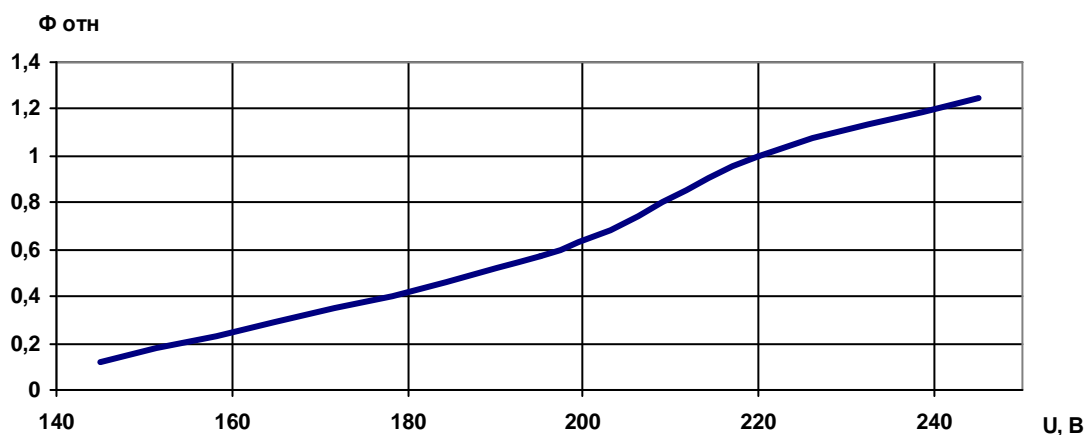


Рис. 3.6 - Зависимость относительного светового потока лампы типа ДНаТ от напряжения сети.

Измерения качества электрической энергии и влияния на него регулирования мощности ламп типа ДНаТ проводили с помощью анализатора тока и напряжения в электрических сетях «АНТЕС». На рис. 3.7 приведены значения напряжения гармоник при различных значениях напряжения питания лампы.

В работе [54] показано, что при изменении напряжения от 250 до 150 В напряжение 1 и 3 гармоник уменьшаются пропорционально изменению напряжения, с 5 по 21 гармонику снижение происходит в большей степени, а гармоники с 33 по 39 существенно растут. Таким образом, высокочастотные гармоники в спектральном составе напряжения при снижении мощности увеличиваются, но абсолютное значение их амплитуды незначительное. Амплитуды 3-й, 5-й и 7-й гармоник напряжения на лампах при изменениях напряжения от 150 до 250 В составляют от 1-й гармоники соответственно: 34-35%; 20-25%; 15-18%. Это нужно учитывать при работе осветительных установок и при необходимости применять схемы компенсации.

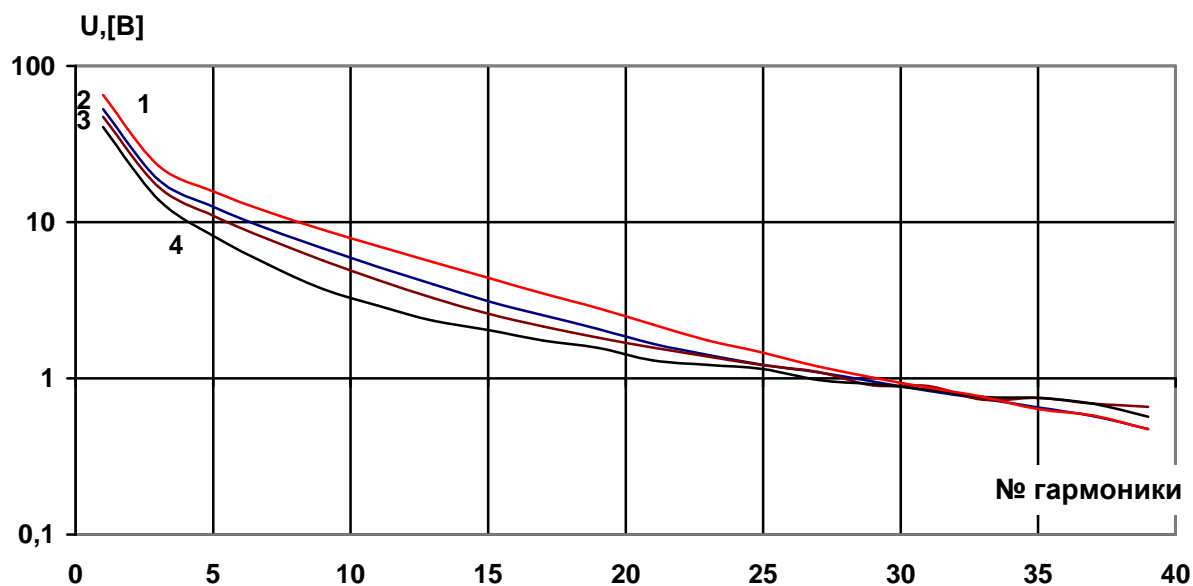


Рис. 3.7 - Напряжение нечетных гармоник на лампе

Напряжение сети: 1 – 250 В; 2 – 220 В; 3 – 198 В; 4 – 150 В.

Значение  $\cos \varphi$  остается практически постоянным (рис. 3.8) в указанном диапазоне изменения напряжения, что означает незначительные изменения качества питающей сети при изменении мощности лампы.

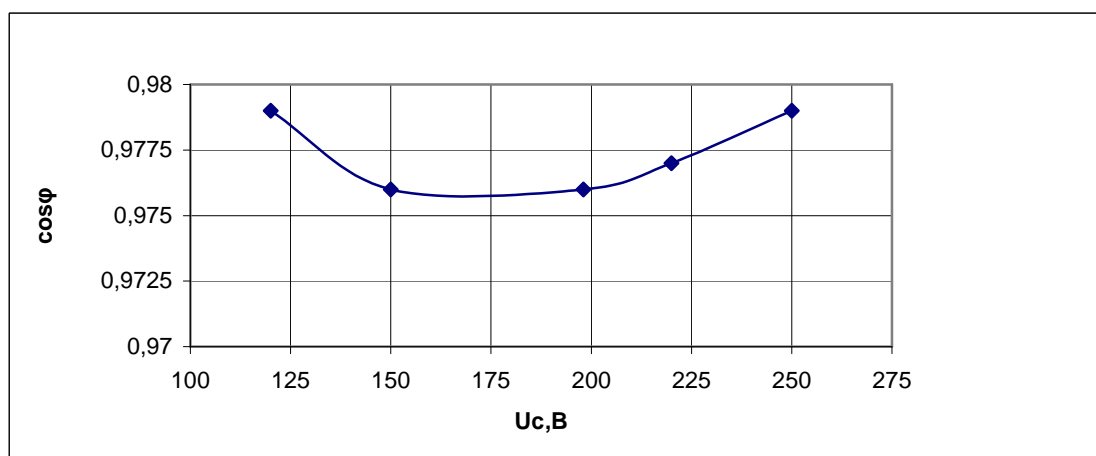


Рис. 3.8 - Зависимость  $\cos \varphi$  от напряжения в сети

В связи с тем, что срок службы светильника должен составлять не менее 10 лет, сохранение осветительным прибором своих начальных светотехнических параметров является важнейшим фактором, который должен влиять на выбор того или иного осветительного прибора. Существенное влияние на срок эксплуатации имеют колебание сети питания и вибрации. В [43] приведены сравнительные данные испытаний ДНаТ мощностью 400 Вт в лабораторных условиях при стабилизированном напряжении питания и в условиях эксплуатации при колебаниях в сети питания 5%. При стабилизированной сети питания срок эксплуатации составил 20 тыс. часов, а при колебаниях  $\pm 5\%$  - 14 тыс. часов.

в сети имеют место резкие кратковременные изменения напряжения до 20 В. Наличие резких изменений напряжения более 4 В может привести к гашению отдельных ламп. Угасание ламп приводит к повторному с длительным периодом подачи импульса воспламенения на горячую горелку, что сокращает срок работы лампы и импульсного зажигающего устройства.

В [55, 56] приведены данные о взаимном влиянии параметров ДНаТ, ПРА и светильников. Показано, что напряжение на натриевых лампах в течение срока эксплуатации растет в среднем на 1,2 В за каждую 1000 часов работы. Это связано с тремя причинами: испарением металла из электродов и осаждением его в приэлектродной области; потерей *Na* в результате реакции с материалом колбы; повышением температуры разряда за счет энергии, отраженной от светильника.

Американским национальным институтом стандартов (ANSI) утверждена зависимость мощности  $P_{л}$  от напряжения  $U_{л}$  для ДНаТ 400 Вт, которая является образцовой для изготовления ламп и ПРА. Показано, что для ламп с  $U_{л}=100В$  может быть экономически оправданным отклонение напряжения  $U_{л.ном}$  15 В. Определено, также, что схемы с индуктивным балластом могут обеспечивать

питании от сети с отклонением напряжения в пределах 5%.

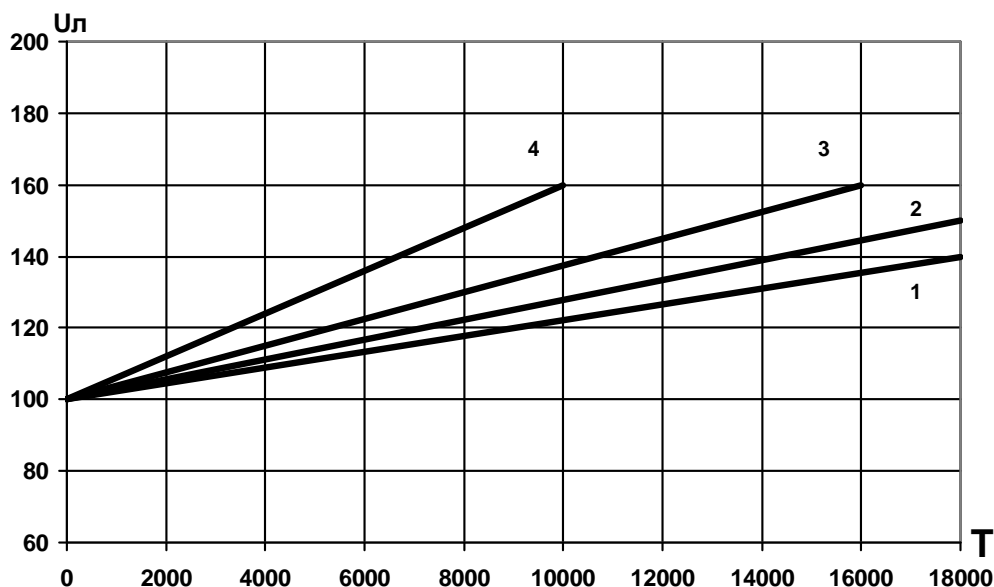


Рис.3.9. Влияние режимов эксплуатации на напряжение  $U_{л}$  НЛВД мощностью 400 Вт в процессе его работы: 1 –  $U_c=220$  В, без светильника; 2 –  $U_c=220$  В, номинальный светильник для ДНаТ; 3 –  $U_c=220$  В, светильник для ламп ДРЛ; 4 –  $U_c=240$  В, светильник для ламп ДРЛ

В осветительной системе с натриевыми лампами высокого давления необходимо учитывать целый ряд переменных величин, которые влияют на ее характеристики. Главные из них: диапазон напряжения на лампе (за счет допусков конструкции и технологии производства); диапазон полного сопротивления ПРА; колебания напряжения питания; изменение напряжения на лампе в процессе его работы; изменение напряжения на лампе в результате отбивания световой энергии на горелку [43].

Таким образом, при рассмотрении вопросов эксплуатационной надежности и нормирования срока эксплуатации ламп высокого давления необходимо учитывать реально существующие колебания напряжения электросети и прирост напряжения на лампе в результате влияния оптической системы светильника и общего теплового режима лампы в светильнике.

Современная система освещения города представляет собой сложный комплекс, который состоит из трансформаторных подстанций, шкафов питания, линий электропередач, осветительных установок. Надежность определяется способностью объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования. Процесс изменения параметров рабочего режима в системе освещения является как правило, случайным. Это связано прежде всего со случайным характером изменения нагрузок и соответствующим случайным характером изменения качества электроэнергии.

В соответствии с электрической схемой освещения, из всей совокупности оборудования и элементов конструкции можно выделить технологическую цепь, которую условно назовем базовым комплектом (БК). Рассмотрим систему наружного освещения, так как она на наш взгляд является наиболее сложной. Базовый комплект содержит в себе последовательно включенные трансформаторную подстанцию, шкаф питания, линию электропередачи, опору, кронштейн и осветительный прибор.

Опыт эксплуатации БК показывает, что частота отказов в рассматриваемый период для определенного типа осветительного прибора при одинаковой длине линии электропередачи, остается постоянной. Однако такого рода сочетания встречаются довольно редко, и наблюдение за их отказами не может дать объективную оценку частоты отказов. Следовательно, частота отказов БК – это расчетная величина.

Определение частоты отказов БК для совокупности последовательно включенных элементов осуществляется по формуле

$$\omega_{\text{БК}} = \sum_{i=1}^5 \omega_i ,$$

где  $\omega_1$  - частота отказов шкафа питания;

$\omega_2$  - частота отказов линии электропередачи;

$\omega_3$  - частота отказов опоры;

$\omega_4$  - частота отказов кронштейна;

$\omega_5$  - частота отказов осветительного прибора.

Следует отметить, что частота отказов линии электропередачи зависит от длины кабеля  $\ell$  и способа его прокладки

$$\omega_2 = \omega_2^0 \cdot \ell,$$

где  $\omega_2^0$  - удельная частота отказов линии электропередачи, приходящаяся на 1 км (выбирается из справочника в соответствии с типом кабеля).

Величины  $\omega_1$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$  вычисляются по результатам наблюдений в процессе эксплуатации городских сетей города Харькова и составляют  $\omega_1=0,0028$  1/год;  $\omega_3=0,0008$  1/год;  $\omega_4=0,0004$  1/год.

Наибольшую трудность вызывает оценка величины частоты отказов осветительного прибора  $\omega_5$ , поскольку она в значительной мере зависит от качества электрической энергии в городских осветительных сетях и не может быть принята в соответствии со справочными данными. Поэтому воспользуемся опытом эксплуатации осветительных приборов в сетях наружного освещения КП “Горсвет” г. Харькова, который показывает, что качество электрической энергии в городских сетях значительно отличается от нормативного [7, 16]. Также имеет место низкое качество источников света, применяемых в Украине, что позволяет оценить величину частоты отказов осветительного прибора  $\omega_5=1,25$  1/год.

Таким образом, при оценке надежности системы наружного освещения города необходимо учитывать не только реально существующее качество электроэнергии, но и качество применяемых источников света.

Поэтому возникает необходимость исследования процессов на электродах и в оболочке, а также определение допустимых границ изменения нагрузочных параметров для сохранения долговечности и безотказности источников света.

Деградация разрядных ламп любого типа определяется деструктивными процессами ее основных элементов – электродов (для ламп постоянного тока, в первую очередь, катодов), оболочки и наполнения. Эти процессы приводят к параметрическим отказам при снижении требуемых характеристик излучения до предельно допустимого уровня, или к полным отказам (повышению напряжения зажигания и перезажигания, механическим повреждениям либо взрывам).

С точки зрения характера процессов на электродах, как показано в [ 57, 58, 59], выделяют следующие зоны:

*Тело электрода.* Значительное влияние на характер процессов в приэлектродных областях оказывают физические (в первую очередь), геометрия и теплофизические свойства материала, технологические предыстории.

*Зона пятна,* расположенная на поверхности катода, через которую протекает разрядный ток и которая непосредственно контактирует с плазмой разряда.

*Ленгмюровский слой,* расположенный у поверхности катода. Толщина ленгмюровского слоя очень мала, поэтому он повторяет все особенности поверхности катода. За счет различной подвижности электронов и ионов перед катодом образуется нескомпенсированный объемный заряд, который приводит к резкому изменению потенциала в зоне катода. В ленгмюровском слое не выполняется условие квазинейтральности.

*Область неравновесной ионизации*, расположенная между ленгмюровским слоем и областью диффузии. В этой области выполняется условие квазинейтральности. Часть области неравновесной ионизации обеспечивает генерацию электронов, необходимую для поддержания катодного пятна и располагается до первого максимума потенциала в прикатодной области.

*Область диффузии* (переходная область) характеризуется нейтральным состоянием плазмы.

В *катодном пятне*, под которым подразумевается совокупность вышеперечисленных областей, протекает целый ряд взаимосвязанных сложных физических процессов, физическая сущность которых до сих пор не имеет однозначного толкования и теоретическая интерпретация далека от совершенства (рис. 3.10).

Поэтому до настоящего времени основой анализа и количественной оценки эрозионных процессов являются методы и модели, основанные на результатах экспериментальных исследований. Сложилась определенная группа общепризнанных требований к электродным материалам [60, 61]. Материал электрода должен иметь:

- а) низкую упругость пара;
- б) низкую работу выхода;
- в) оптимальную рабочую температуру.

Оболочка ламп подвергается мощным термическим воздействиям со стороны плазмы разряда, поглощаемой частью проходящего оптического излучения, воздействию продуктов эрозии электродов и других конструктивных элементов плазмы [62, 63]. Деградационные процессы в оболочке и напыление на нее продуктов эрозии приводят к снижению излучательных параметров и механической прочности, что, в конечном счете, ограничивает долговечность ламп, приводя к параметрическим и полным отказам [64].



Рис. 3.10 - Схема модели катодных процессов в источниках света высокого давления [65]

Анализу и исследованию вышеописанных процессов посвящен следующий раздел.

### 3.3. Процессы на электродах высокоинтенсивных разрядных ламп

Конструктивное исполнение электродов высокоинтенсивных разрядных ламп очень многообразно. Конструкция и форма электродов для ртутных ламп высокого давления зависят от мощности лампы, рода тока, давления и других факторов. В любом случае следует различать по длине электродов три температурные зоны.

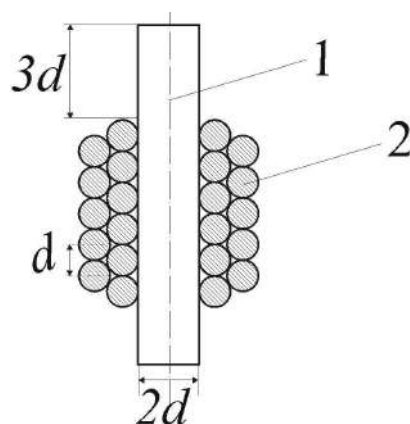


Рис. 3.11. Электрод высокоинтенсивной разрядной лампы переменного тока: 1 – керн, 2 – вольфрамовая спираль

Температура каждой зоны не должна быть выше некоторой определенной величины. Торцевая рабочая часть электрода должна иметь оптимальную по минимуму эрозии температуру порядка 2200-2800 К. Зажигающая часть электрода, если на ней размещается оксидная паста, в установившемся режиме должна нагреваться не выше 1700-1900 К. Дальняя от разряда часть электрода, соединяемая с вакуумноплотно запаиваемой фольгой, должна нагреваться не выше 800К [66, 67].

Размеры и конфигурации электродов для ламп заданной силы тока выбирают такими, чтобы было обеспечено требуемое распределение температуры. В некоторых случаях, для того, чтобы торцевая поверхность электрода не охлаждалась слишком сильно за счет теплопроводности по керну электрода и токоввода, применяются электроды с перетяжкой, ограничивающей теплоотдачу.

В лампах с короткой дугой возникает необходимость строгой фиксации положения разряда на электродах.

Если электрод изготавливают из торированного вольфрама, то дуга предпочтительно возникает на тех участках, где содержание тория выше. Когда торий испаряется из места расположения катодного пятна, дуга перемещается на другой участок поверхности электрода, содержащий

повышенное количество тория. Один из практических приемов устранения неконтролируемого положения привязки разряда - выбор подходящей формы торца электрода. Из общих соображений очевидно, что электроды с заостренными концами позволяют в достаточной мере обеспечить стабильную привязку. Однако слишком заостренные электроды не могут быть рекомендованы для практической конструкции, так как при этом возникает другое нежелательное явление: может произойти сильная деформация рабочей поверхности электрода и в связи с этим изменение длины дуги. При малых расстояниях между электродами такое увеличение длины дуги может существенно изменить светотехнические характеристики лампы, в частности привести к понижению яркости.

В начальной фазе развития разряда происходит ионизация инертного газа и ртути в промежутке между электродами. Для инициирования этого процесса между основными электродами требуется приложить достаточно высокое напряжение. Собственное время развития процесса первоначальной ионизации очень малое и протекает при небольшом токе.

В лампах некоторых типов для снижения напряжения зажигания применяется вспомогательный зажигающий электрод. Расположение вспомогательного электрода выбирают таким образом, чтобы расстояние между ним и одним из основных электродов было меньше, чем наименьшее расстояние между остальными электродами. Для того чтобы конец зажигающего электрода не нагревался дуговым разрядом, место расположения его выбирается вне возможного пути горения разряда.

Следует сказать, что число современных типов ламп с зажигающим электродом ограничено из-за ряда очень серьезных недостатков, которые свойственны трехэлектродным лампам по сравнению с двухэлектродными. Дополнительные элементы в конструкции лампы – ввод и электрод – снижают ее механическую прочность, увеличивают вероятность выхода лампы из строя и повышают её стоимость. Поэтому

более предпочтительным является решение вопроса надежного зажигания лампы с помощью специальных схем, вырабатывающих в пусковой период напряжение, достаточное для прямого пробоя разрядного промежутка между основными электродами.

При работе на переменном токе катод и анод периодически меняются местами. Анод является приемником электронов, поступающих из разрядного промежутка в цепь. Главная функция катода - обеспечение поступления в разрядный промежуток электронов, необходимых для поддержания тока разряда. Процессы на катоде являются определяющими для поддержания разряда. Явления на аноде имеют меньшее значение для поддержания разряда, но также важны, поскольку влияют на тепловой режим электрода в катодный полупериод, от которого зависит его эффективность. Температура электродов, определяемая тепловым балансом процессов в приэлектродных областях, влияет на механизм эмиссии, тип разряда и интенсивность этих процессов, от которых зависит долговечность электродов и ламп.

В большинстве источников света дугового разряда используются горячие катоды, электронная эмиссия которых состоит главным образом из термоэмиссии. Для снижения работы выхода электронов используются активированные катоды. Применяют в основном самокалящиеся электроды, разогрев которых производится током разряда.

Наиболее тяжелым режимом для катодов является режим пуска лампы (рис. 3.12). Исследования позволили установить некоторые особенности пусковых режимов современных осветительных установок с лампами типа ДнаТ. В связи с вышеизложенным нами получены экспериментальные данные осветительных установок в пусковом режиме типа ЖКУ «Гелиос» - Россия, «Ватра» - Украина и осветительных установок из Китая.

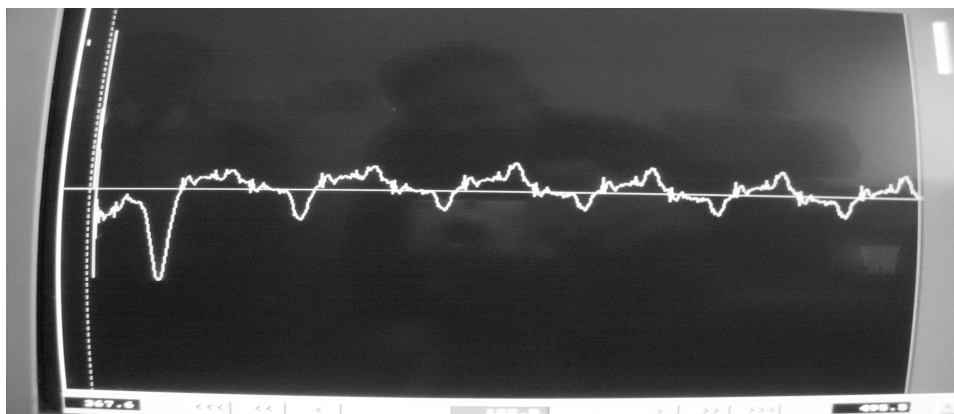


Рис. 3.12 - Импульсы тока в пусковом режиме

Исследования проводились при нормальных условиях окружающей среды на серийно выпускаемых образцах ламп «TUNGRAM» типа ДНаТ-150 (Венгрия). Отклонение напряжения от номинального не превышало  $+1\text{В}$ . Результаты приведены в табл. 3.1. Для измерений использовались микропроцессорные анализаторы токов и напряжений в электрических сетях АНТЭС АР 3Ф и «Ресурс-UF2».

Таблица 3.1

Мощность осветительных установок в пусковом режиме

	«Гелиос»	«Ватра»	О.У. Китай
Активная мощность	260,44 (В*А)	133,49 (В*А)	233,17 (В*А)
Реактивная мощность	74,47 (В*А) инд.	173,62 (В*А) емк.	68,05 (В*А) емк.
Полная мощность	270,88(В*А)	219(В*А)	242,89(В*А)

Из рисунка видно, что в момент включения наблюдаются импульсы тока, амплитудные значения которых, в зависимости от светильника, в 8-10 раз превышает значение тока в установившемся режиме [15]. Режим пуска лампы является наиболее тяжелым режимом для катодов. В момент

зажигания разряда катод не может обеспечить термоэмиссию, достаточную для образования термоэлектронной формы дуги, и возникает тлеющий разряд. Большое катодное напряжение в период тлеющего разряда приводит к распылению электродов за счет ионной бомбардировки и разрушению активированного слоя. Частицы распыляющегося вещества осаждаются на поверхности разрядной трубки, уменьшая ее прозрачность, а также поглощают газ, что приводит к постепенному снижению давления и вызывает увеличение катодного напряжения и напряжения зажигания. Увеличение катодного напряжения, в свою очередь, приводит к росту катодного распыления. Чем больше включений и чем дольше фаза тлеющего разряда, тем короче срок службы лампы.

При работе на переменном токе промышленной частоты каждый полупериод происходит перезажигание лампы и возможны пики перезажигания, связанные с явлениями на катодах, что также приводит к дополнительному распылению электродов. В результате происходит выход лампы из строя из-за дезактивации электродов, повышенного напряжения зажигания или из-за недостатка газа для существования разряда.

Для оценки влияния эрозионных процессов на срок службы разрядных ламп целесообразно определять изменение скорости эрозии при работе в аномальном режиме по отношению к ее значению в номинальном режиме. Априори можно полагать, что в номинальном режиме эрозионные процессы оптимизированы.

### **3.4. Методика расчета средней за цикл удельной эрозии**

Возможность количественной оценки скорости эрозии электродов разрядных ламп в динамическом режиме детально рассмотрена в работах

[68, 69, 70, 71]. Динамика эрозионных процессов в течение цикла изменения разрядного тока рассмотрена на основе анализа режимов растекания тока. Как показано в [71], в динамическом режиме привязка дугового разряда и характер растекания тока имеют четыре режима: режимы быстро и медленно перемещающихся пятен, распределенного пятна и режим предельно высоких температур катода с повышенной скоростью эрозии. Экспериментально определены значения удельных скоростей эрозии в каждом из режимов растекания тока. Разработана методика расчета скорости эрозии в различных режимах растекания тока. В наиболее общем виде методика расчета количества эродированного вещества за один цикл приведена в [72, 73].

В качестве исходных данных для расчета принято:

Зависимость мгновенных значений тока от времени:

$$i = f(t) .$$

Площадь рабочей поверхности катода  $S_k$ .

Значение потока тепла на поверхность катода:

$$q(t) = U_k i(t) ,$$

где  $U_k$  – катодное падение потенциала.

Теплофизические константы материала электрода.

$J_{кр1}(T)$  - зависимость средней по рабочей поверхности плотности тока, соответствующей границе перехода от режима с быстро перемещающимися пятнами к режиму с медленно перемещающимися пятнами от средней температуры поверхности катода.

Зависимость  $J_{кр2}(T)$  - соответственно от режима медленно перемещающихся пятен к режиму распределенного пятна от средней температуры поверхности катода.

Зависимость  $j_{кр3}$  – плотности тока, при которой наблюдается резкое увеличение скорости эрозии в режиме распределенного пятна при значительном увеличении температуры поверхности катода. При

дальнейшем анализе будем ограничивать режимы предельно допустимой температурой электродов, при которой исключается повышение скорости эрозии.

Значения удельной эрозии в каждом из режимов:

$\gamma_1 = dm_1/dq$  – в режиме с быстро перемещающимися пятнами;

$\gamma_2 = dm_2/dq$  – в режиме с медленно перемещающимися пятнами;

$\gamma_3 = dm_3/dq$  – в режиме с распределенным пятном.  $\gamma_1 = dm_1/dq$

Значения  $\gamma_1 - \gamma_3$  были определены экспериментально и, в общем случае, зависят от температуры катода.

Таким образом, исходные данные для расчета включают в себя:

$$i(t), q(t), J_{kp1}(T), J_{kp2}(T), \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3.$$

Зависимости и значения  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  нами взяты из [68].

По заданной функции  $i(t)$  определяем тепловой поток на поверхность электрода  $q(t)$  и рассчитывается (или определяется экспериментально) динамика температуры поверхности электрода во времени  $T = f(t)$ . Затем находим значения  $t_1$  и  $t_2$ , при которых происходит взаимный переход режимов растекания тока: быстро перемещающиеся пятна – медленно перемещающиеся – распределенное пятно.

Для этого необходимо решить соответственно системы уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} i = f(t) \\ i_{kp1} = f(t) \end{array} \right\} \Rightarrow t_1$$

$$\left. \begin{array}{l} i = f(t) \\ i_{kp2} = f(t) \end{array} \right\} \Rightarrow t_2$$

Зависимости  $i_{kp} = f(t)$  вычисляем по данным  $i_{kp} = f(T)$  и  $T = f(t)$ .

Затем определяем количество эродированного за цикл вещества катода в каждом из режимов:

$$\left. \begin{array}{l} i = f(t) \\ i_{kp1} = f(t) \end{array} \right\} \Rightarrow t_1$$

$$\left. \begin{array}{l} i = f(t) \\ i_{kp2} = f(t) \end{array} \right\} \Rightarrow t_2$$

$$\Delta M = \int_0^{t_1} \gamma_1(T) i(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \gamma_2(T) i(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} \gamma_3(T) i(t) dt, \quad (3.4)$$

так как в общем случае удельная эрозия в каждом из режимов зависит от температуры катода.

Как отмечалось выше, в четвертом режиме скорость эрозии резко увеличивается, поэтому он не должен реализоваться в источниках света, за исключением случаев, когда заведомо допускается ограниченный ресурс наработки. Удельная эрозия, усредненная за цикл, определяется соотношением

$$\frac{\Delta M}{\tau_{\text{ц}} \int_0 i(t) dt}, \text{ г/Кл} \quad (3.5)$$

Таким образом, детальное исследование эрозионных процессов на катодах для нестационарных условий возможно при наличии ряда данных и зависимостей, которые определены экспериментальным путем. В работах [68, 69, 71] установлены значения удельной эрозии для различных режимов растекания тока, зависимости критических плотностей тока от температуры поверхности для наиболее широко распространенных электродных материалов – вольфрама торированного и вольфрама иттрированного. Эти данные нами использованы в дальнейших расчетах.

Из изложенного очевидно, что для расчета средней скорости эрозии за цикл прежде всего необходимо определить зависимость температуры поверхности электрода от времени на протяжении цикла изменения тока лампы.

Очевидно, что анализ эрозионных процессов следует начинать с расчета термического режима электродов. Так как точные значения теплофизических констант электродных материалов определить сложно, мы пошли по пути расчетно-экспериментальных исследований динамики термического режима электродов на протяжении цикла ступенчатого режима.

Динамику температуры поверхности электрода во времени рассчитывали на основе решения уравнения теплопроводности. При выходе на установившийся режим, то есть при достижении постоянства значения температуры перед началом очередного цикла, термический режим можно характеризовать начальным значением температуры  $T_0$  и ее приращением за счет действия ступени  $\Delta T(t)$ :

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t). \quad (3.6)$$

Приращение температуры можно рассчитать в относительных единицах, тогда зависимость  $\Delta T = f(t)$  будет однозначно определяться одним параметром –  $\Delta T_{\max}$  для заданной формы функции изменения тока во времени [69, 75, 76].

Как показано в работах [75, 77], тепловой поток на катод можно считать пропорциональным силе тока:

$$q(t) = ki(t). \quad (3.7)$$

С учетом конечной длительности переднего и заднего фронтов, форму изменения силы тока ступени можно считать трапециидальной (рис.3.13).

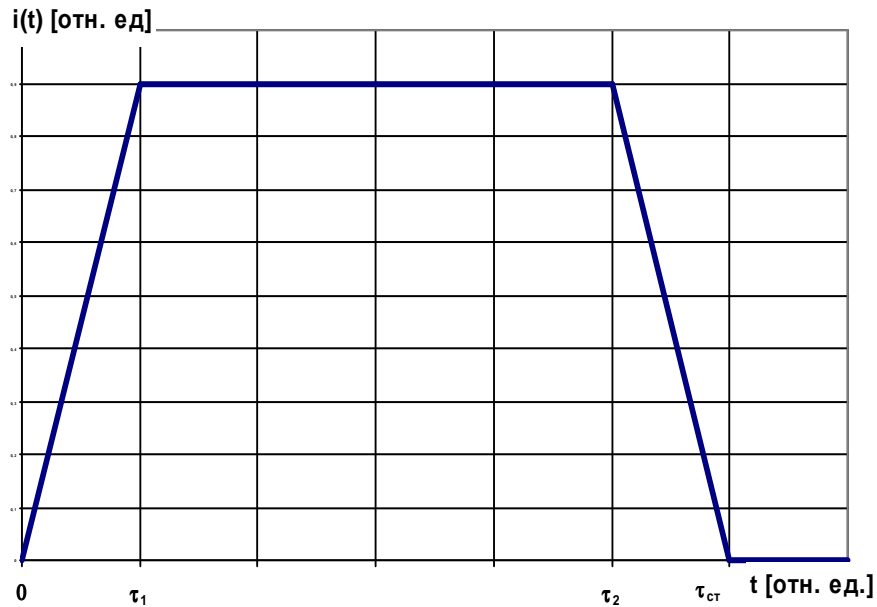


Рис. 3.13 - Трапециидальная форма тока ступени

Для трапециидальной формы тока ступени можно записать:

$$i(t) = \begin{cases} i_1(t), & \text{при } 0 < t < \tau_1 \\ i_1(t) + i_2(t), & \text{при } \tau_1 < t < \tau_2 \\ i_1(t) + i_2(t) + i_3(t), & \text{при } \tau_2 \leq t < \tau_{ст} \end{cases}, \quad (3.8)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – моменты времени начала и конца стабильного тока ступени.

Для теплового потока, согласно [75] и (3.8), можно записать:

$$q(t) = \begin{cases} q_1(t) & \text{при } 0 < t < \tau_1 \\ q_1(t) - q_1(t - \tau_1) & \text{при } \tau_1 < t < \tau_2 \\ q_1(t) - q_1(t - \tau_1) - q_2(t - \tau_2) & \text{при } \tau_2 < t < \tau_{ст} \end{cases}. \quad (3.9)$$

Если принять длительности переднего и заднего фронтов тока степени одинаковыми, то можно считать  $q_1(t)=q_2(t)=q(t)$ .

Согласно [58, 68, 74, 77], принимаем  $q(t)=ki(t)$  и считаем, что поле приращения температур в полубесконечном теле, на поверхность которого падает равномерно распределенный поток тепла  $q(t)$ , описывается уравнением [58]:

$$\Delta T(x, t) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} \int_0^t q(t) e^{\frac{-x^2}{4at}} \cdot t^{-0,5} dt,$$

где  $\tau$  - время действия потока тепла или любой момент времени действия источника тепла.

Принимая изменения тока в течение фронтов, линейно зависящими от времени, плотность потока тепла можно принять пропорциональной силе тока  $q(t)=u_k \cdot i(t)=k \cdot t$ , где  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала электрода и режима привязки дуги. Величина, стоящая перед интегралом, определяется теплофизическими характеристиками материала, которые задать с достаточной точностью сложно. В первом приближении они были приняты для вольфрама. Такой подход позволяет выполнить расчеты в первом приближении, обозначив

$\frac{\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} = b$ . Константа  $b$  определяется, как сказано выше, теплофизическими характеристиками материала и может быть уточнена путем экспериментального измерения приращения температуры в конце цикла. Для трех потоков тепла, полагая соблюдение принципа суперпозиции, уравнение для расчета приращения температуры можно записать в следующем виде:

$$\Delta T = b \left[ \int_0^{t_1} k_1 t \cdot e^{\frac{-x^2}{4at}} t^{-0,5} dt + \int_0^{t_1} k_2 (t - \tau_1) e^{\frac{-x^2}{4at}} t^{-0,5} dt + \int_0^{t_1} k_3 (t - \tau_2) e^{\frac{-x^2}{4at}} t^{-0,5} dt \right] \quad (3.10)$$

где  $t_1$  момент времени, в который определяется  $\Delta T$

Для определения текущего значения температуры на переднем фронте следует использовать первый член уравнения, в период ступени – сумму первого и второго, на заднем фронте – все три составляющие. В записанном виде решение уравнения даст значение температуры в конце ступени, т.е. максимальное приращение температуры  $\Delta T_{\max}$ . Для определения температуры в любой момент времени верхний предел следует взять соответствующим. Решение уравнения было проведено на ПК в программе MathCAD. Координату  $x$  принимали равной нулю, т.е. температуру определяли на рабочей поверхности. Расчет для разных значений  $x$  даст распределение температуры вдоль электрода. Принимая длительности переднего и заднего фронтов ступени одинаковыми, можно считать  $k_2 = -k_1$ . На рис 3.14 приведена расчетная зависимость изменения температуры в течение цикла лампы ДРШ-600 при равных длительностях ступени и паузы.

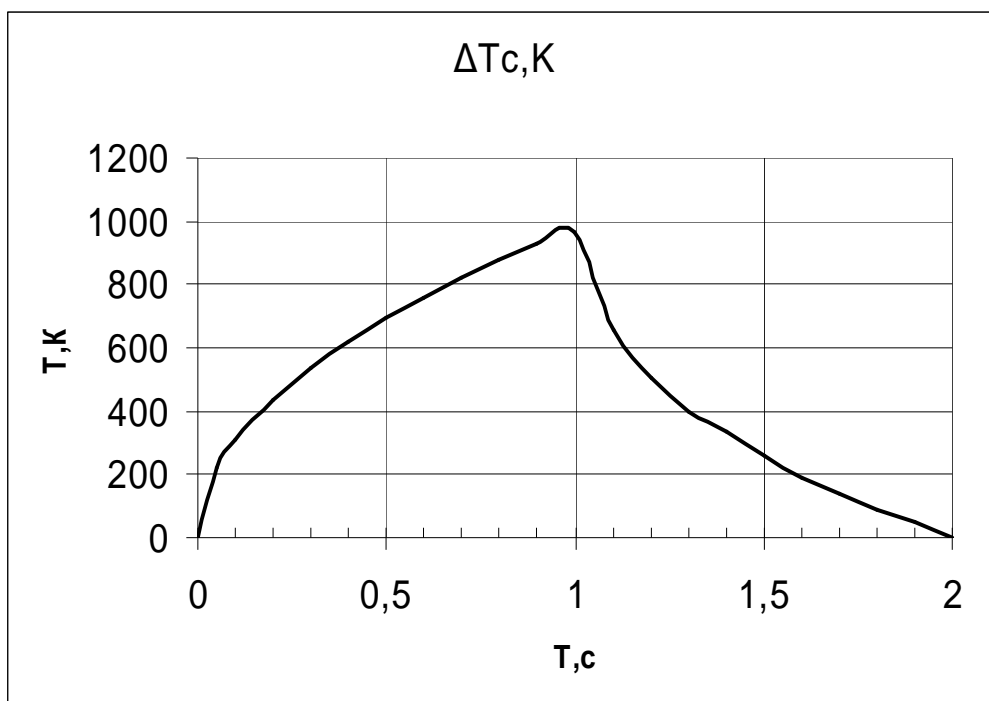


Рис 3.14 - Расчетная зависимость изменения температуры в течение цикла лампы ДРШ-600 при равных длительностях ступени и паузы.

Можно считать, что форма кривой температуры на протяжении ступени не изменяется при любых параметрах ступени. Поэтому дальнейший анализ термического режима можно проводить по двум параметрам: максимальному приращению температуры и длительности ступени.

Если принять длительность фронтов ступени намного меньшей длительности ступени, то из (3.10) можно записать достаточно простое уравнение для расчета максимального приращения температуры на поверхности электрода

$$\Delta T_{\max} = b\sqrt{\tau_{cm}}k_i, \quad (3.11)$$

где значение  $k_i$  следует принимать пропорциональным значению силы тока ступени  $k_i = u_k i_{cm}$ . Расчетная зависимость максимального приращения температуры приведена на рис 3.15.

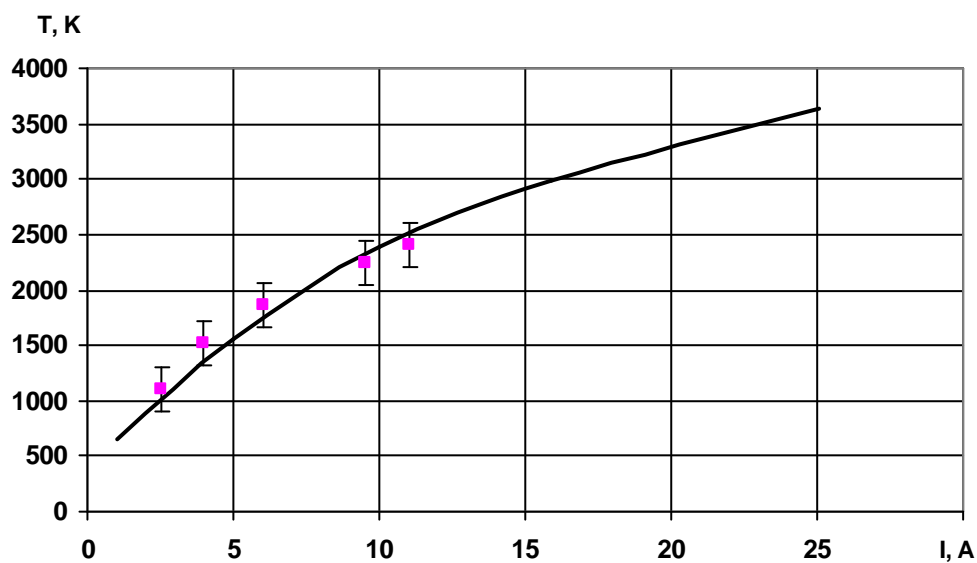


Рис. 3.15 - Расчетная зависимость максимальной температуры катода от тока лампы ДРШ-600 и экспериментальные точки

Произведение  $u_k b$  уточняли экспериментально:

$$\Delta T = b \cdot k \cdot i_{cm} \sqrt{t_{cm}}.$$

Это достаточно простое уравнение дает отклонение в результате расчета, отличающееся от приведенного расчета, выполненного по программе MathCAD, составленной на основе теоретических исследований профессора С.Н.Харина. По этой программе рассчитывается поле температур цилиндрического тела, нагреваемого периодически действующим источником. Расхождение в определении максимального приращения температуры не превышает 50-70К, что находится в пределах точности определения постоянных коэффициентов в уравнениях, приведенных выше, по экспериментальным исследованиям температурных полей.

Расчет эрозионных процессов может быть выполнен только при наличии информации о параметрах взаимоперехода режимов растекания тока.

Одна из эффективных возможностей идентификации режимов растекания тока может быть основана на измерении флуктуации азимутального магнитного поля или излучения в прикатодной области лампы [71, 74, 76].

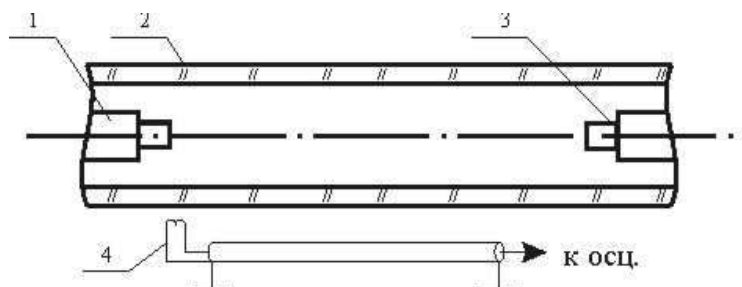
Скорость эрозии в условиях дугового разряда определяется характером растекания тока. Динамика катодных пятен, их возникновение и исчезновение должны приводить к миграции центра тока дуги, следовательно, к флуктуациям магнитного поля тока дуги в прикатодной области. Характер флуктуации должен определяться режимом растекания тока. Для установления этого нами были исследованы параметры флуктуационных шумов в прикатодной области в различных режимах импульсного дугового разряда. Исследования проводили на импульсных трубчатых источниках света, катоды которых изготавливались из различных материалов (вольфрам чистый, торированный) [74].

Для измерения флуктуационных шумов магнитного поля использовали индуктивные датчики в виде катушек, аналогичные описанным в [78], сигнал с которых через коаксиальный кабель подавался

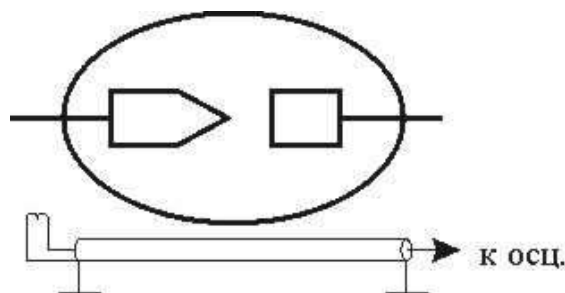
на вход осциллографа. Резонансная частота контура, образованная катушкой и кабелем, была равна 3-4 МГц, полоса пропускания – 0,5 МГц. Датчик располагали вблизи катода снаружи оболочки лампы (рис. 3.16).

Наибольший уровень флуктуации наблюдается в пусковой период разрядного тока (температура катода низка). При перемещении датчика вдоль оси лампы от катода в сторону положительного столба или в область токоввода уровень шумов уменьшается. Зависимость амплитуды сигнала с датчика от расстояния до катода показана на рис. 3.17.

Это подтверждает то, что флуктуации связаны с динамикой тока в прикатодной области. Изменение ориентации датчика показало, что максимальный сигнал наблюдается при положении датчика, соответствующем измерению азимутального поля  $H_\phi$ .



а)



б)

Рис.3.16 - Схема расположения датчиков флуктуации В.Ч. магнитного поля при исследовании процессов на катодах трубчатых - а и шаровых ламп - б.

Спустя некоторое время, по мере прогрева электродов шумы исчезают. Время исчезновения шумов зависит от температуры катода, эмиссионных свойств материала, тока и других факторов.

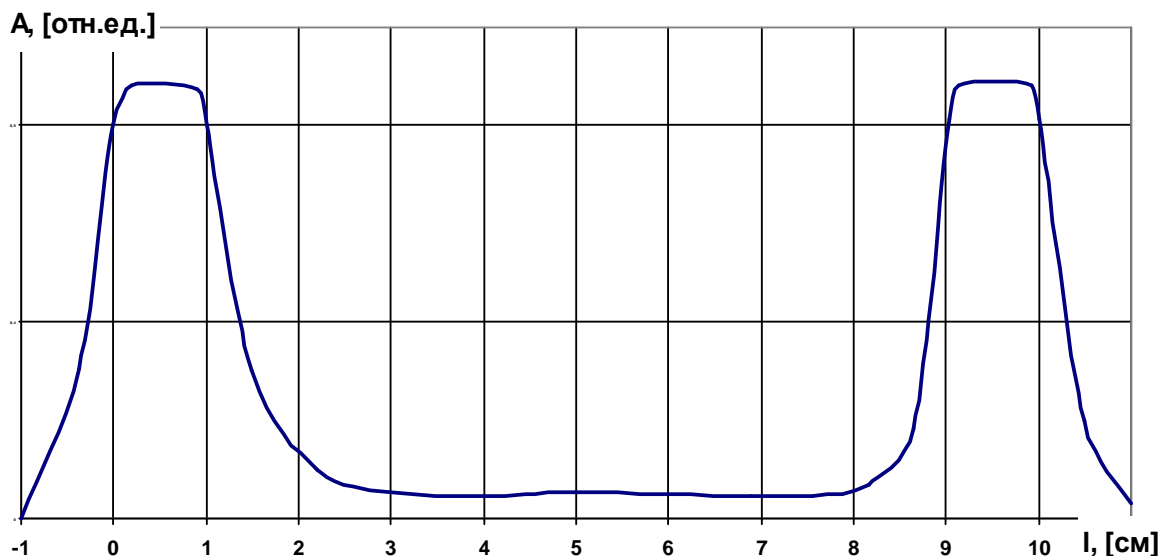


Рис. 3.17 - Амплитуда сигнала с датчика в пусковой период вдоль трубчатой лампы

С увеличением частоты циклов и их энергии, т.е. с ростом начальной температуры  $T_0$  и приращением температуры в течение цикла  $\Delta T$  длительность шумов уменьшается.

В работах [74, 79, 80] для установления корреляции флуктуации магнитного поля в прикатодной области с режимами растекания тока были выполнены СФР – исследования динамики катодных пятен. Было установлено, что при увеличении мощности (разрядного тока) на осциллограммах появляются три характерные участка. В начале цикла наблюдаются шумы с высокой интенсивностью, затем по мере нагрева катода уровень шумов уменьшается, участок в конце цикла соответствует полному исчезновению шумов. В соответствии с [74], режим с большим уровнем шума следует идентифицировать как режим быстро перемещающихся пятен. В конце участка с большой амплитудой шумов наблюдается возникновение медленно перемещающихся пятен, которые полностью формируются на участке, соответствующем меньшей

амплитуде шумов. В области исчезновения шумов характерных изменений в динамике пятен не наблюдается. Очевидно, это связано со стабилизацией микроструктуры пятен, образованием в областях отдельных макропятен распределенных пятен, которые в дальнейшем в области, соответствующей полному исчезновению шумов, сливаются в одно распределенное пятно.

При увеличении начальной температуры участок с большой амплитудой шумов уступает участку с малой амплитудой. В таких режимах практически с самого начала цикла наблюдается режим с медленно перемещающимися пятнами, которые, после прекращения шумов, переходят в распределенное пятно. При значительной средней мощности (токе) и большой начальной температуре шумы практически полностью отсутствуют, в этом случае на любом участке цикла наблюдается распределенное пятно, однако остается проблема возможного перехода в режим повышенной эрозии. Она может быть решена только на основе анализа термического режима либо путем заведомого ограничения максимальной температуры.

Анализ экспериментальных данных и результатов [74, 81, 82, 83, 84, 85] при широком диапазоне вариации режимов позволил установить, что изменение интенсивности шумов соответствует переходу от быстро перемещающихся пятен к медленно перемещающимся, а исчезновение шумов соответствует переходу в режим стационарного и распределенного пятен. Исходя из этого, анализ режимов растекания тока и их идентификацию можно проводить по осциллограммам флуктуации магнитного поля в прикатодной области.

Расчет скорости эрозии электродов может быть произведен только в том случае, если известны моменты перехода режимов растекания токов. В условиях дугового разряда эти времена, при прочих равных условиях, будут определяться моментами, при которых величина тока достигает критического значения. Для катодов с заданными свойствами значения

плотности критических токов будут определяться средней температурой поверхности катода, равной сумме начальной температуры и ее приращения во время ступени повышенной мощности. Определение зависимостей критических плотностей токов  $j_{kp1}$ ,  $j_{kp2}$ ,  $j_{kp3}$  (для переходов от быстроперемещающихся пятен к медленноперемещающимся, от медленноперемещающихся к распределенному пятну соответственно) было осуществлено экспериментально в работе [71].

Измерения критических токов проводились [73, 74, 75] на разборных лампах. Катоды ламп были выполнены из иттрированного и торированного вольфрама. Изменение начальной температуры производилось подогревом электродов токами высокой частоты. Значение тока  $i_{kp1}$ , определялось по моменту изменения уровня шумов, а  $i_{kp2}$  по моменту практически полного исчезновения шумов. В основном измерения были выполнены на катодах с полусферической и конической формой рабочей поверхности, площадь рабочей поверхности принималась равной  $\pi D^2/4$ , что соответствовало площади катода, подверженной эрозии, наблюдаемой в большом количестве экспериментов. Зависимость  $j_{kp1}$  для катодов из торированного вольфрама приведена на рис. 4.8. Значения  $j_{kp1}$  получены из осциллограмм тока, расчетных значений средней по рабочей поверхности температуры и осциллограмм флуктуации магнитного поля прикатодной области [69]. Момент времени, соответствующий точке перехода, определялся по моменту изменения амплитуды шумов. Погрешность в определении критического значения тока составляла от 5 до 15%. При прогреве катода значения критических токов изменяются. Это обусловлено различным характером распределения абсолютных значений температуры по поверхности катода при различной предыстории достижения данного конкретного значения температуры.

Результаты [69] получены в импульсном режиме, т. е. при больших скоростях изменения тока. Так как характер формирования пятен определяется многими факторами, нами были определены значения критических токов для лампы ДРШ – 600, электроды которой выполнены из торированного вольфрама. При сравнительно медленных изменениях силы тока в период ступени, значения критических плотностей тока практически однозначно определяются средней температурой поверхности катода. На рис. 3.18. приведены значения критических плотностей тока для лампы ДРШ – 600 при установившемся значении температуры. Полученные зависимости использовались также для анализа эрозионных процессов при работе лампы ДРШ – 600 в ступенчатом режиме изменения тока.

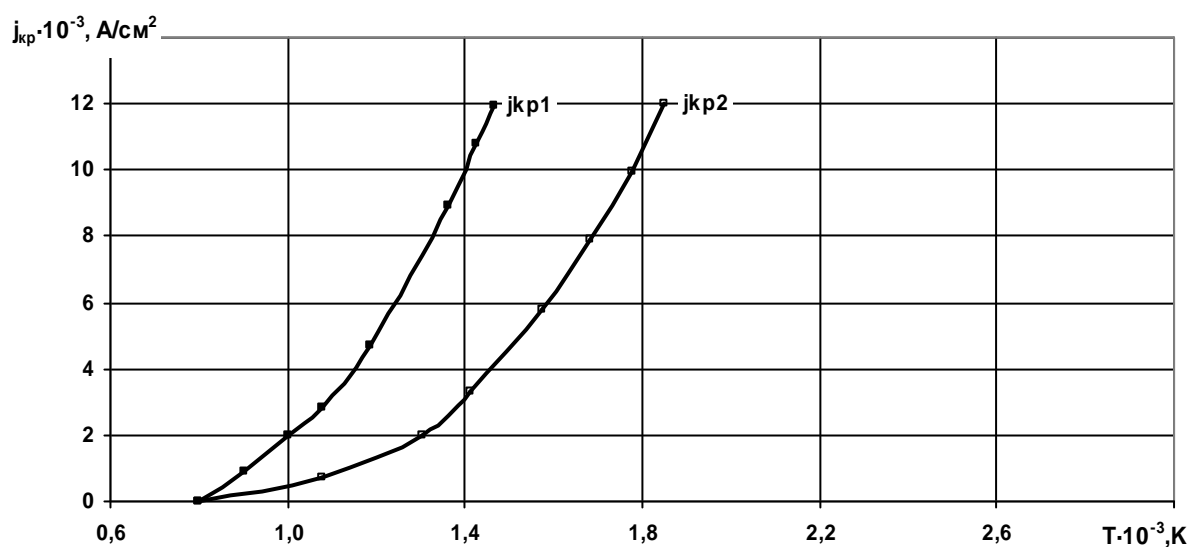


Рис 3.18 - Зависимости критических токов  $j_{kp1}$  и  $j_{kp2}$  от температуры для торированного вольфрама [69]

Сложность процессов формирования областей привязки в настоящее время не дает возможности выполнить количественные расчеты динамики формирования. Нам представляется, как и в [72], целесообразным с целью

повышения однозначности в трактовке экспериментальных данных и выполнения расчетов на их основе, для характеристики термического режима пользоваться понятием средней по рабочей поверхности электрода температурой поверхности. Исходя из этого, средняя плотность тока определяется делением полного тока на площадь рабочей поверхности.

На рис.3.19 приведены значения  $j_{кр1}$  для торированного вольфрама при различных значениях начальной температуры. Значения  $j_{кр2}$  определялись по моменту времени, соответствующего полному исчезновению флуктуации магнитного поля в прикатодной области. Результаты, получаемые на торированном вольфраме, достаточно стабильны. Анализ значительного статистического материала дал возможность в [69] определить зависимости критических значений тока, соответствующих переходу к режиму с распределенным пятном. Абсолютное значение температур, соответствующих критическим токам, зависит от начальной температуры.

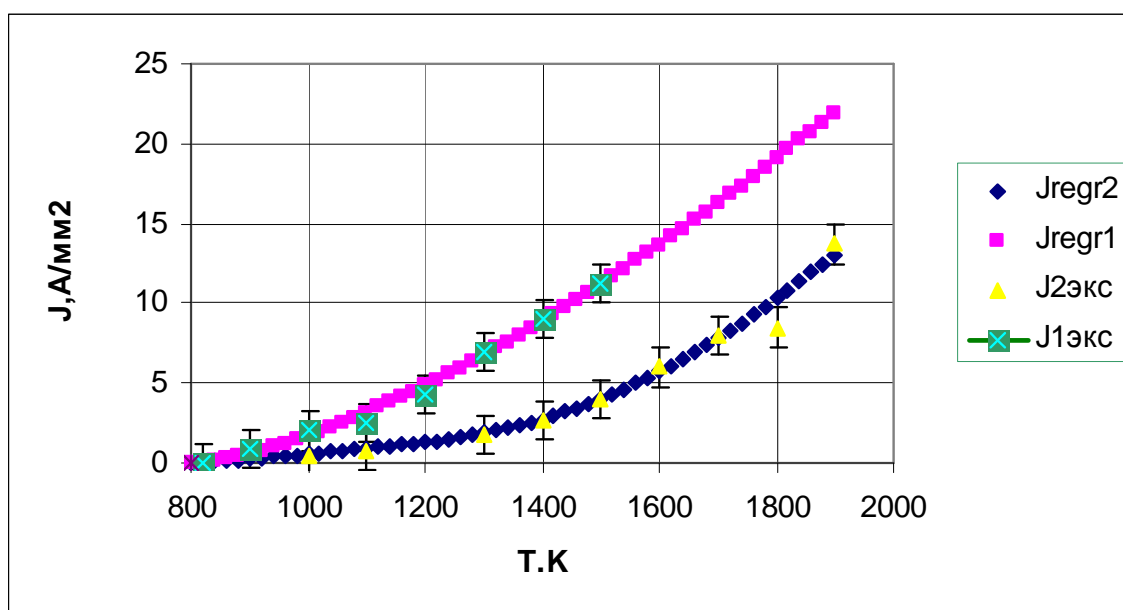


Рис. 3.19 - Значения  $j_{кр1}$  для торированного вольфрама при различных значениях начальной температуры.

Наличие семейств кривых критических токов существенно усложняет методику расчета эрозионных процессов на протяжении импульса разрядного тока, однако, в нашем случае близость формы тока ступени к прямоугольной несколько упрощает методику расчета.

Данные о значении  $j_{кр3}$  были получены на основании исследования динамики эрозионных процессов по моменту резкого увеличения скорости эрозии. Эти данные нами использованы для анализа эрозионных процессов на протяжении цикла разрядного тока с целью недопустимости его реализации.

### **3.5. Исследование эрозионных характеристик электродов**

При исследовании эрозионных процессов мы исходили из следующей концепции.

1. Скорость эрозии изменяется в широких пределах. Это обусловлено изменением режима растекания тока по поверхности электрода.

2. Эмиссия катода, при прочих равных условиях, определяется средней температурой его поверхности. Взаимный переход режимов растекания тока определяется для данного типа катодов соотношением средней плотности тока по его поверхности и мгновенным значением средней по его поверхности температуры.

3. На протяжении одного цикла возможна реализация всех режимов растекания тока (с учетом взаимопереходов от одного режима к другому). Соотношение длительностей работы катода в каждом из режимов (или, в конечном счете, количество электричества, перенесенное за один цикл в каждом из режимов) будет определять скорость эрозии в течение импульса.

Наиболее точные значения удельной эрозии экспериментально определены для режима быстро перемещающихся пятен, т.к. этот режим наиболее легко реализуется в чистом виде.

Удельная скорость эрозии в режиме быстро перемещающихся пятен изменяется не более чем в два раза, различие от условий эксперимента ее значений находится в пределах статистического разброса и точности измерения количества эродированного вещества. Было принято значение удельной скорости эрозии для торированного вольфрама в режиме быстро перемещающихся пятен  $\gamma = 2 \cdot 10^{-9}$  г/Кл.

В отличие от  $\gamma_1$  определение удельной скорости эрозии в режиме медленно перемещающихся пятен  $\gamma_2$  вызвало большие экспериментальные затруднения. Значение зависит от средней температуры рабочей поверхности катода и может изменяться при этом на порядок величины. Абсолютные значения удельной скорости эрозии, по крайней мере, на два порядка превышают ее значение в режиме быстро перемещающихся пятен.

Данные получены для катодов из торированного вольфрама при измерении скорости эрозии методом взвешивания и путем измерения оптической плотности налета на поверхность оболочки лампы. На основании этих данных нами были приняты значения удельной скорости эрозии, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Значения удельной скорости эрозии

Материал электрода	$\gamma_1 \cdot 10^9$ , г/Кл	$\gamma_2 \cdot 10^7$ , г/Кл				$\gamma_3 \cdot 10^8$ , г/Кл
		Температура поверхности катода, К				
		1000	1500	2000	2500	
Торированный вольфрам	2	8	5	2, 6	0, 8	8

Сравнивая абсолютные значения удельных эрозий  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , можно сделать вывод, что если на протяжении цикла разрядного тока реализуются режимы как быстроперемещающихся, так и медленно перемещающихся пятен, величину эрозии, обусловленную первым режимом, практически можно не учитывать в расчете средней скорости эрозии.

В режиме диффузной привязки скорость эрозии существенно уменьшается по сравнению с режимом медленно перемещающихся пятен. В чистом режиме на протяжении цикла ступенчатого режима разрядного тока диффузная привязка реализуется только при достаточно высоких значениях температуры. Однако при значительных температурах может наблюдаться существенное повышение средней удельной эрозии.

Приведенные данные для торированного вольфрама являются исходными качественными анализа динамики эрозии на протяжении цикла разрядного тока и средней за цикл удельной эрозии.

Для расчета удельной эрозии, усредненной за цикл, необходимо произвести расчет массы эродированного материала электрода. Для этого прежде всего необходимо рассчитать термический режим катода, т.е. определить начальную температуру и ее изменение на протяжении ступени разрядного тока.

Так как в настоящей работе ставилась задача исследования аномальных режимов серийных ламп, то можно считать, что термический режим электродов при номинальной мощности соответствует режиму распределенного пятна. Только при таком режиме для обеспечения номинальной долговечности скорость эрозии электродов не превышает допустимую. Поэтому целесообразно при анализе аномального режима скорость эрозии оценивать по отношению к номинальному режиму. При этом данные по скорости эрозии могут быть приняты из работы [73]. Такой подход позволяет определить влияние аномального режима на

долговечность по отношению к номинальной. Это избавляет от необходимости иметь точные данные по эрозионным характеристикам электродов. При достаточно хорошо отработанной конструкции лампы в номинальном режиме температура катода должна быть минимальной, но достаточной для обеспечения режима распределенного пятна.

Анализ работы оболочки в различных режимах проводили в работах [89, 90] и нами в [91]. В лампах высокого и сверхвысокого давления при увеличении вкладываемой в разряд энергии наблюдается интенсивное испарение материала оболочки. По одной из теорий именно повышение давления в лампе за счет испарения оболочки приводит к ее разрушению. Из этих соображений можно принять критерием длительности работы оболочки лампы отсутствие интенсивного испарения материала оболочки. Поэтому аномальный режим ограничен снизу режимами, в которых температура катода становится достаточной для термоэмиссии, а сверху – режимами, при которых начинает преобладать деградация оболочки за счет напыления продуктов эрозии электродов.

Сравнительный анализ работы электродов и оболочки показывает, что в реальных осветительных приборах предельный режим ограничивается эрозией электродов, повышение которой приводит к одновременному сокращению срока службы оболочки.

Повышение эффективности работы осветительного комплекса можно достичь в первую очередь путем повышения качества электроэнергии. Лампы высокой интенсивности являются нелинейными потребителями, массовое использование которых наряду со средствами компьютерной техники, аудио-видеотехникой, современными электробытовыми приборами приводит к значительным искажениям синусоидальности кривых напряжений и, как следствие, к обострению проблемы качества электроэнергии в электрических сетях.

Таким образом, анализ современного состояния и перспектив развития осветительных комплексов показывает необходимость внедрения таких первоочередных мероприятий:

1. При освещении необходимо иметь единое комплексное композиционное решение, основанное на одной художественной идее, которая будет объединять все элементы освещения, и стремиться к обеспечению максимальных удобств в создании комфорта жизни.

2. Разработка комплексных проектов освещения центральных и многонаселенных районов, включающих наружное, архитектурное, рекламно-информационное освещение, позволит эффективно использовать генерируемые всеми излучателями световые потоки, создать комфортную световую среду, обеспечить дизайн и необходимый уровень зрительных восприятий. Разрабатывать проект освещения следует строго на функциональной основе, планомерно распределяя уровень освещенности, месторасположение отдельных установок и другие параметры всех элементов освещения мегаполиса, не увлекаясь светотехническими эффектами в ущерб общей композиции и конкретным функциональным задачам.

3. При эксплуатации осветительных установок имеет место отклонение световых параметров от нормируемых. Рациональное использование светового потока источников света, особенно в наружном освещении может обеспечить повышение эффективности до 20%. Это может быть достигнуто за счет точности воспроизведения необходимых кривых силы света световых приборов и их юстировки в процессе монтажа и эксплуатации.

4. Разработка стоимостной оценки значений параметров и характеристик осветительных установок и учет ее во взаиморасчетах поставщика и потребителя световой энергии будет способствовать разумному подходу к техническим требованиям на осветительные установки, а поставщика обеспечивать строгое соответствие им в

процессе эксплуатации осветительных установок и наиболее эффективно использовать современные приборы, устройства и средства управления в освещении. При таком подходе и поставщик, и потребитель световой энергии будут заинтересованы в оптимальных режимах работы систем освещения и минимальных энергозатратах.

5. Необходима разработка методик и устройств для измерения параметров осветительных установок при их паспортизации, вводе в эксплуатацию и контроля в процессе наработки. Современное состояние фотометрии позволяет на основе цифровых технологий создать приемлемую в полевых условиях технологию измерения любых характеристик осветительных установок.

6. Замена неизолированных воздушных алюминиевых проводов на самонесущие изолированные провода (СИП) позволит снизить потери в сети до 2,5 процентов и затраты на электроэнергию.

7. Повышение точности воспроизведения необходимых параметров освещения позволит снизить затраты на создание заданных условий работы зрительного анализатора и повысить срок службы источников света и других элементов осветительных установок в 1,5-2 раза.

8. Для решения проблемы низкого качества электрической энергии в современных осветительных комплексах оптимальным является использование унифицированных симметрично-компенсирующих устройств, позволяющих устранить несимметрию напряжений (токов) и скомпенсировать реактивную мощность в четырехпроводных сетях при наличии в них нелинейных искажений и изменений нагрузки по случайному закону.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 2005. - 261 с.
2. Гриб О.Г. и др. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 272 с.
3. Шаров Ю.В. и др. Управление качеством электроэнергии. – М.:Изд. дом МЭИ, 2006. – 320 с.
4. Пилипчук Р.В., Яремчук Р.Ю. Проблема энергосбережения в освітлювальних установках// Світлолюкс.– 2003. - №2. - С. 10-13.
5. ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”.
6. Сапрыка А.В. Основные направления развития наружного освещения г. Харькова// Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.- техн. сб. Вып. 79 - К.: Техніка, 2007. - С.275-279.
7. Гриб О.Г., Сапрыка А.В., Бородин Д.В., Жданов Р.В. Анализ качества электрической энергии в сетях общего пользования 0,4 кВ// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. научн.-техн. журнал. Вып.1(9) – Харків.: ХНАМГ, 2007.-С.53-60.
8. Сапрыка О.В., Кравченко Ю.П. Споживачі електроенергії. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 74с.
9. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Інф.-аналіт. бюлетень «Відомості Міністерства палива та енергетики України» Спеціальний випуск – К. 2006. 113с.
10. Лазуренко А.П., Лисичкина Д.С., Черкашина Г.И. Новый подход к классификации потребителей электрической энергии// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. научн.-техн. журнал. Вып.1 – Харків.: ХНАМГ, 2008.-С.76-80.
11. Блажко. Ю.М. Електропостачання міст. Навч. посібник.– К.: НМКВО, 1992. - 256с.

12. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Знак, 2006. - 972 с.
13. Кожушко Г.М. О необходимости разработки государственной политики по экономии электроэнергии на освещение// Світлолюкс.– 2003. - №2. - С. 14-15.
14. Варфоломеев Л.П. Применение достижений электроники в современной светотехнике// Светотехника.– 2007. - №3. - С. 4-11.
15. Сапрыка А.В. Исследование эксплуатационных характеристик современных энергосберегающих осветительных установок// Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.-техн. сб. Вып. 84 – К: «Техніка», 2008. С.265-270 .
16. Сапрыка А.В. Экспериментальные исследования качества электрической энергии в осветительных сетях г. Харькова// Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.-техн. сб. Вып. 74 – К: «Техніка», 2007. С.365-368.
17. Гриб О.Г., Овчинников С.С, Сапрыка А.В., Бородин Д.В., Кандауров А.И. Исследование электропотребления с учетом качества электрической энергии в сетях коммунального предприятия «Харьковгорлифт»// Світлотехніка та електроенергетика: Міжн. науч.-техн. журнал. № 3-4. Харків, ХНАМГ, 2007. С.21-25.
18. Сапрыка А.В. Анализ влияния низкого качества электрической энергии на технические показатели осветительных систем// Вестник Приазовського державного технічного університета - Вип. 18-2008. Маріуполь, 2008 р. С. 110-113.
19. Семенов В.Т., Гриб О.Г., Овчинников С.С, Сапрыка А.В., Татьков В.П. Современная концепция развития наружного и архитектурного освещения мегаполисов Украины// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. науч.-техн. журнал. № 1 - Харків, ХНАМГ, 2008. С. 4-11.
20. Шахпарунянц Г.Р. Основные направления развития российской светотехники// Светотехника.– 2006. - №6. - С. 11-15.

21. Каталог продукции 2008. [www.amira.ru](http://www.amira.ru)
22. Суднова В.В. Качество электрической энергии. <http://www.test-electro.ru/publ.php>
23. Гриб О.Г., Нестеров М.Н., Сапрыка А.В. и др. Современные приборы учета электрической энергии: Уч. пособие. - Белгород. БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2008. – 138с.
24. Бородин Д.В. Средства измерительной техники для измерения показателей качества электрической энергии// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. науч.-техн. журнал. № 1 – Харків: ХНАМГ, 2008. С.30-35.
25. НПП «Энерготехника» – [www.entp.ru](http://www.entp.ru).
26. ООО НТЦ «ГОСАН» – [gosan.ru](http://gosan.ru).
27. ООО «ЭРИС» – [www.eriskip.ru](http://www.eriskip.ru).
28. Корпорация «Fluke» – [www.fluke.ru](http://www.fluke.ru)
29. Корпорация «SATEC» – [www.satec.co.il](http://www.satec.co.il).
30. Корпорация «Power Measurement» – [www.pwrm.com](http://www.pwrm.com).
31. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии. Энергосбережение – 2004 - №1.
32. Жаркин А.Ф., Козлов А.В., Палачев С.А., Дробот Ю.Г. Анализ энергоэффективности энергозберегающих компактных люминесцентных ламп// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. научн.-техн. журнал. №1 – Харків:ХНАМГ, 2007.-С.4-9.
33. Гриб О.Г., Сапрыка А.В., Овчинников С.С., Тарянный М.М. Режимы работы осветительных установок и качество электроэнергии// Труды 4 Международной науч.-практ. конф. «Город и экологическая реконструкция жилищно-коммунального комплекса XXI века». – М. -2006. – С. 49-51.
34. Адриан В. Возрастные изменения пропускания хрусталиком глаза излучений натриевых и металлогалогенных ламп высокого давления// Светотехника. – М. 2006. №2. С 15-16.

35. Сапрыка А.В. Анализ современного состояния системы наружного освещения г. Полтавы// Весник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Вип. 31-2008. Харків, 2008 - С. 145-148.
36. Емельянов Н.И., Шаборкин В.Г., Черткова И.И. Об отклонениях напряжения в осветительных сетях городов// Электричество. 1987. №5. – С.55.
37. Нестеров М.Н., Виноградов А.А., Сапрыка А.В., Сапрыка В.А. Анализ электропотребления с учетом качества электрической энергии в сетях переменного тока 0,4 кВ г. Белгорода// Світлотехніка та електроенергетика. Міжн. научн.-техн. журнал. № 3 – Харків.: ХНАМГ, 2008.-С.49-56.
38. Копытов Ю.В., Чуланов Б.А. Экономия электроэнергии в промышленности. – М. : Энергоатомиздат, 1982. - 108 с.
39. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.
40. Бородин Д.В., Гриб О.Г., Сапрыка А.В. Проблемы качества электроэнергии в сетях 330-750 кВ ГП НЭК «УКРЭНЕРГО»// Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”. Випуск 8(140). - Донецьк: ДонНТУ. - 2008. - С. 179-182.
41. Гриб О.Г., Довгалюк О.Н., Калюжный Д.Н. Оценка качества электроэнергии в городских электрических сетях// Труды Всеукраинской науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы энерго-, ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве». – Алушта. -2005. – С. 154-155.
42. Громадский Ю.С., Гриб О.Г., Бородин Д.В., Калюжный Д.Н., Довгалюк О.Н. Снижение потерь электрической энергии, обусловленной её качеством, в системах электроснабжения. ПРОМЕЛЕКТРО// 2006 №2, стр. 42.
43. Отчет НИР «Исследование качества электрической энергии в сетях наружного освещения г. Харькова» гос. рег. номер 107U00695.

44. Гольденблат Б.И. О влиянии качества электроэнергии на эффективность осветительных установок// Светотехника. – 1989. - №2. - С.11-12.
45. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света -2-е изд. Перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1991г. - 720 с.
46. Поляков В.Д. Источники питания разрядных ламп. - М.: МЭИ, 2002. - 55 с.
47. Кожушко Г.М., Иванов В.М., Лебедин Ю.Ф. Измерение электрических параметров газоразрядных ламп, работающих с электронными ВГПРА// Тез. 2 Международной светотехнической конференции, Суздаль. 1995. -С.85.
48. Уймаус Д. Газоразрядные лампы. - М.: Энергия, 1977 - 343с.
49. Ртутные лампы высокого давления. Под ред. И.М. Весельницкого, Г.Н. Рохлина. - М.: Энергия, 1971 - 328с.
50. Иванов А.П. Электрические источники света. - М.: Госэнергоиздат, 1955. - 120 с.
51. Маршак И.С. Современные высокоинтенсивные источники света. - М.: ВИНТИ, 1976 - 87с. - / Итоги науки и техники. Сер. Светотехника и инфракрасная техника ВИНТИ; Т.4.
52. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. Учебное пособие для вузов. - М.: Энергия, 1972. - 360 с.
53. Рохлин Г.Н. Работа натриевых ламп высокого давления в пульсирующем режиме // Светотехника – 2001. - №3. - С.2-8.
54. Саприка О.В., Овчинников С.С., Гриб О.Г. Вплив навантажувальних режимів розрядних ламп типу НЛВТ на якість електричної енергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Вип. 37. Т 1. - Харків, 2005. С. 51-54.
55. Кожушко Г.М. Вплив деяких факторів на експлуатаційну надійність натрієвих ламп високого тиску// Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.- техн. сб. Вып. 53 - К.: Техніка, 2003. - С.211-218.

56. Кожушко Г. М., Кислиця С. Г. Шляхи підвищення світлотехнічних характеристик натрієвих ламп // Світлолюкс. - 2004. - №1.- С. 36-38.
57. Намитоков К.К, Электроэрозионные явления. - М.: Энергия, 1978. - 456 с.
58. Каслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. - 487с.
59. Ковалев В.Н., Ляпин А.А., Чурсин М.М. О распылении сильноточного вольфрамового катода// Теплофизика высоких температур. - 1978. - 15. - №2. - С. 418-419.
60. Замесова Г.З., Карелен Б.А., Амосов В.М. Электродные материалы на основе вольфрама для газоразрядных источников света // Электронная техника. - 1971. - Вып. 53. - С.6-11.
61. Намитоков К.К. и др. Композиционные электродные материалы для вакуумных коммутационных аппаратов и высокоинтенсивных источников света// I всесоюзная конференция по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве. - Ташкент, 1980. - С.127-129.
62. Раховский В.И. К вопросу о механизме эмиссии катода дугового разряда// ЖТФ. - 1965. - т. 35. - №12. - С. 2228-2231.
63. Решенов С.П. Катодные процессы в дуговом разряде, разработка методов расчета и конструирование электродов газоразрядных источников излучения. - Дис.... д-ра техн. наук. - М.: МЭИ. - 1984. - 366 с.
64. Намитоков К.К., Пахомов П.Л., Харин С.Н. Излучение газоразрядной плазмы. - Алма-Ата.: Наука, 1984. – 299 с.
65. Баранова В.И., Леонов Г.С., Решенов С.П. Модель катодных процессов в дуговых лампах высокого давления// Светотехника. - 1987. - №8. - С. 9-12.
66. Замесова Г.З., Карелен Б.А., Амосов В.М. Электродные материалы на основе вольфрама для газоразрядных источников света // Электронная техника. - 1971. - Вып. 53. - С.6-11.

67. Намитоков К.К. и др. Композиционные электродные материалы для вакуумных коммутационных аппаратов и высокоинтенсивных источников света// I всесоюзная конференция по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве. - Ташкент, 1980. - С.127-129.
68. Овчинников С.С. Эрозионная стойкость электродных материалов в импульсных источниках излучения// Лазерная техника и оптоэлектроника. - 1985. - Вып. 4 (35). - С.80-85.
69. Овчинников С.С. и др. Зависимость скорости эрозии катодов от формы импульсного разрядного тока. - Деп. Укр НИИТИ, № 2152Ук - 86, 1987.
70. Рабинович Г.И. Скорость испарения тория из катодов ксеноновых ламп СВД.- М.1980-28с.- Рукопись дел в ИНФОРМЭЛЕКТРО, №303Д80
71. Овчинников С.С.,. Методика измерения критических плотностей тока в газоразрядных лампах // XXIII научно-техническая конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХИИКСа. - Харьков, 1989. - С. 67.
72. Овчинников С.С. Методы оценки эрозионной стойкости электродных материалов в высокоинтенсивных источниках света // XXIII научно-техническая конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХИИКСа. - Харьков, 1989. - С. 68.
73. Овчинников С.С., Полищук В.Н., Сапрыка А.В. Расчет удельной эрозии электродов нестационарных источников излучения // Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.- техн. сб. Вып. 47 - К.: Техніка, 2003. - С.254-258.
74. Овчинников С.С. и др. Флуктуации магнитного поля в прикатодной области импульсных ламп. - Деп. Укр НИИТИ, № 3042 - В47.
75. Гукетлев Ю.Х. и др. Расчет термического режима работы катодов для оценки качества импульсных источников высокоинтенсивного света // Электронная техника, Сер.8.-1979. - Вып.5 (75). - С.70.
76. Намитоков К.К. и др. Исследование эрозионных характеристик катодов в условиях импульсного дугового разряда // VIII Всесоюзная

конференция по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск, 1980. - С.176.

77. Гукетлев Ю.Х. и др. Измерение тепловых потерь трубчатых источников света // Светотехника. - 1979. - №5. - С.1.

78. Швец О.М., Овчинников С.С. и др.. Возбуждение волн в плазме в области нижнего гибридного резонанса // ЖТФ. - 1969. - т. 39 - Вып. 4. - С. 610.

79. Исследование физических процессов на электродах и в приэлектродной плазме. Разработка справочных данных по эрозионной стойкости электродных материалов в ИВИС. ч.I. Отчет о НИР / Руководитель Намитоков К.К. - №ГР80055081, инв №0283.0068538. - Харьков, 1982.

80. Волженцев В.А., Корнилов В.А., Сапрыка А.В. Голографический интерферометр с узким опорным пучком для исследования приэлектродной плазмы// Программа и аннотации докладов XXIII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХИИКС. - Харьков: ХИИКС, 1988. - С.73.

81. Исследование процессов на электродах приборов ВИС, расчеты оптимальных конфигураций электродов и методы прогнозирования их эрозионной стойкости: Отчет о НИР (промежуточный). Руководитель Намитоков К.К. - №ГР740500, инв.№6540547. - Харьков, 1975 - 213 с.

82. Намитоков К.К. и др. Методика экспериментального исследования характерных процессов в разряде импульсных источников света. // Электронная техника, сер. 8. - 1980. - №2.

83. Намитоков К.К. и др. Исследование излучения прикатодной области нестационарного дугового разряда. // VI Всесоюзная конференция. Динамика излучающего газа. - М., 1980. - С.280.

84. Кубышкин В.В., Кирсанов В.П., Шумский И.О. О температурной зависимости скорости разрушения катодов в импульсных разрядах / Электронная техника, сер 2 - 1966. - №2. - С. 55-59.

85. Полищук В.Н. Термический режим электродов ламп типа ДНаТ. // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. науч.- техн. сб. Вып. 13 - К.: Техніка, 1998. - С. 91-93.

86. Овчинников С.С., Сапрыка А.В. Предельные нагрузки разрядных ламп при работе в ступенчатом режиме // XXXII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ. - Харьков: ХНАГХ, 2004. - С.30-31.

87. Никитченко Т.Ю., Сапрыка А.В., Холодова Е.Е. Исследование динамики спада интенсивности свечения разрядных ламп при резких изменениях мощности питания // XXVII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. – Харьков, 1994. - С.18-19.

88. Сапрыка А.В. Исследование эффективности разрядных ламп в ступенчатом режиме. // Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 55 - К.: Техніка, 2004. - С. 118-124.

89. Кобзарь А.И., Овчаров А.Т. Фотоиндуцированные явления в задачах диагностики состояния оболочек и совершенствования эксплуатационных характеристик импульсных ламп// Обзоры по электронной технике, сер. 11. - М.: ЦНИИ «Электроника», 1989. - Вып. 5 (1448). - 57 с.

90. Овчаров А.Т. Фотоиндуцированное окрашивание оболочек импульсных ламп // Светотехника. – 1988. - №5. - С.13.

91. Овчинников С.С., Рябец И.И., Сапрыка А.В. Голографический контроль механических напряжений оболочек высокоинтенсивных источников света наружного освещения// Коммунальное хозяйство городов: Межвед. науч.-техн. сб. Вып. 3 - К.: Техніка, 1994.- с.72-75.

*Научное издание*

**Сапрыка Александр Викторович**

**Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с  
учетом качества электрической энергии**

*Монография*

План 2009, поз. 1

Подп. к печати 15.01.09	Формат 60×80 1/16	Бумага офисная
Печать на ризографе.	Усл. печ. л. 6.0	Уч.–изд. л. 6,5
Зак. №	Тираж 300 экз.	

61002, Харьков, ХНАГХ, ул. Революции, 12

Сектор оперативной полиграфии при ЦНИТ ХНАГХ