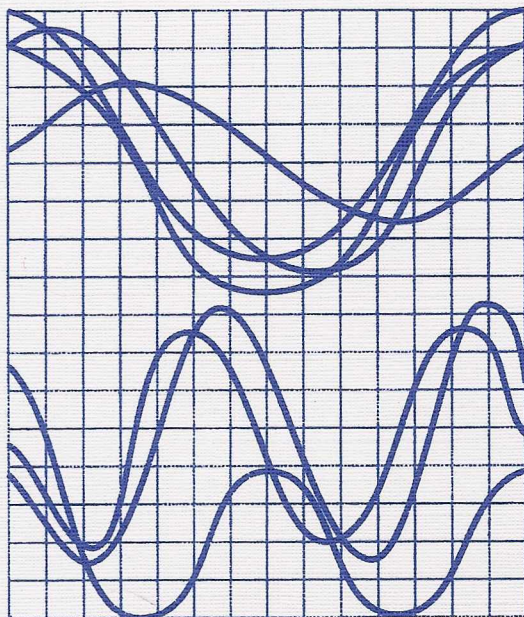


В. Є. ШЕШТЕРЕНКО



**ОПТИМІЗАЦІЯ
СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ**

2001

В.Є.ШЕСТЕРЕНКО

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Київ 2001

Літературний та технічний редактор Пінчук І.М.
Дизайн обкладинки та верстка Кононський В.В.
Надруковано ЧП "Глана", Київ, 2001.

Розглянуті питання комплексного підходу до проблеми підвищення якості електроенергії, компенсації реактивної потужності, негативного впливу вищих гармонік напруги на системи електроспоживання, додаткових втрат енергії та збільшення похибки лічильників енергії при несинусоїдальності напруги, системного підходу до роботи компенсуючих пристроїв, принципів імпульсного регулювання напруги, розширення функціональних можливостей тиристорних пристроїв, принципи роботи сплавів з ефектом "пам'яті форми" в установках по оптимізації систем електроспоживання.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників, що займаються експлуатацією та проектуванням електроенергетичних систем промислових підприємств, та студентів електроенергетичних спеціальностей університетів та коледжів.

Передмова.....	6
1. Аналіз показників якості електроенергії.....	7
1.1. Відхилення напруги.....	7
1.2. Коливання напруги.....	12
1.3. Відхилення частоти.....	14
1.4. Несинусоїдальність напруги.....	14
1.4.1. Математичні основи гармонічного аналізу.....	15
1.4.2. Джерела вищих гармонік.....	17
1.4.3. Розрахунок рівнів вищих гармонік.....	20
1.5. Несиметрія напруг.....	23
1.6. Провал напруги.....	27
1.7. Тимчасова перенапруга.....	28
1.8. Імпульс напруги.....	28
2. Напівпровідниковий перетворювач як джерело вищих гармонік.....	38
2.1. Трифазний мостовий перетворювач.....	39
2.2. Однофазний регульований перетворювач.....	47
2.3. Неканонічні гармоніки в спектрі перетворювачів.....	50
2.4. Гармонічний аналіз напруги перетворювача по методу комутаційних функцій.....	52
2.5. Несиметричний перетворювач.....	54
2.6. Математична модель трифазного мостового перетворювача струму.....	55
2.7.Інверторний режим перетворювача.....	56
2.8. Частотний перетворювач струму.....	57
2.9. Гармонічний аналіз напруги перетворювача з ШІМ.....	58
2.9.1. Математична модель перетворювача частоти.....	60
2.9.2. Математична модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....	61
2.9.3. Тиристорні перетворювачі в системах електропостачання промислових підприємств.....	62
2.10. Дослідження вентильних перетворювачів за допомогою методу різницевого рівняння.....	64
3. Негативний вплив вищих гармонік на системи електропостачання.....	73
3.1. Додаткові втрати енергії в елементах системи електропостачання при наявності вищих гармонік.....	75
3.2. Вплив несиметрії та несинусоїдальності струмів і напруг на додаткові втрати потужності.....	78
4. Застосування фільтрів вищих гармонік.....	80
4.1. Розрахунок фільтрів.....	80
4.2. Широкополосні фільтри.....	81
4.3. Розрахунок фільтра, настроєного на одну частоту.....	82
4.4. Конденсатор фільтра.....	82
4.5.Індуктивність фільтра.....	83
4.6. Проектування симетруючих пристроїв.....	84
4.7. Визначення параметрів симетруючого пристрою.....	85
4.8. Визначення параметрів фільтросиметруючого пристрою.....	86

5. Компенсація реактивної потужності.....	89
5.1. Негативна дія потоків реактивної потужності на систему електропостачання.....	89
5.2. Визначення економічного еквівалента реактивної потужності.....	90
5.3. Раціоналізація режимів роботи електроприймачів для зниження споживання реактивної потужності.....	90
5.4. Компенсація реактивних навантажень за допомогою спеціальних джерел реактивної потужності.....	91
5.5. Конденсатор як джерело реактивної потужності.....	92
5.6. Конденсаторні установки.....	93
5.7. Захист конденсаторної установки.....	94
5.8. Розміщення конденсаторних установок у мережі підприємства.....	95
5.9. Розрахунок джерел реактивної потужності крупного підприємства.....	97
5.10. Визначення потужності компенсуючих пристроїв у відповідності з нормативними документами.....	101
5.11. Визначення кількості трансформаторів на ТП за умовами оптимальної компенсації реактивної потужності.....	102
5.12. Розрахунок потужності компенсуючих пристроїв.....	103
5.12.1. Реактивна потужність синхронних двигунів.....	104
5.13. Визначення потужності батарей конденсаторів у мережах напругою понад 1000 В.....	105
5.14. Індивідуальний метод компенсації.....	107
5.15. Недоліки методики.....	108
5.16. Оптимальний розподіл конденсаторних установок в мережі двох напруг.....	109
5.17. Оптимальне розміщення конденсаторних установок в радіальній мережі.....	111
5.18. Оптимальне розміщення конденсаторних установок в магістральній мережі.....	112
5.19. Розподіл потужності батарей конденсаторів у цеховій мережі напругою до 1000 В.....	113
5.20. Очікувана реактивна потужність синхронних двигунів при наявності несинусоїдальності та несиметрії напруги.....	114
5.21. Компенсація реактивної потужності при наявності вищих гармонік.....	117
5.22. Компенсація реактивної потужності в електричній мережі з несиметричними навантаженнями.....	118
6. Аналіз методів регулювання компенсуючих пристроїв.....	124
6.1. Діапазон використання нерегульованих ДРП.....	124
6.2. Дискретне регулювання потужності ДРП.....	125
6.3. Плавне регулювання потужності ДРП.....	127
6.4. Непряме регулювання потужності ДРП.....	128
6.5. Комбіноване регулювання потужності ДРП.....	130
6.6. Дворівневий спосіб регулювання потужності системи комплексної компенсації реактивного навантаження.....	130
6.7. Регулятори реактивної потужності.....	134
7. Принципи імпульсного регулювання напруги.....	138
7.1. Аналіз основних методів імпульсного регулювання напруги, струму, потужності.....	138
7.2. Основні параметри АІМ.....	140
7.3. Порівняльний аналіз основних видів регулювання при АІМ.....	141

7.4. Оптимальне значення несучої частоти регулятора.....	142
7.5. Граничний варіант АІМ.....	146
7.6. Особливості робочого процесу в регуляторі АІМ.....	150
7.7. Аналіз імпульсного навантаження напівпровідникових приладів.....	154
7.8. Математична модель імпульсного регулятора.....	158
7.9. Математична модель трифазного регулятора.....	161
7.10. Розширення функціональних можливостей тиристорного регулятора.....	162
7.10.1. Регулятор напруги як джерело реактивної потужності.....	162
7.10.2. Регулятор напруги як генератор сигналів телекерування.....	165
7.10.3. Тиристорний регулятор як активний фільтр.....	167
7.11. Рівень радіозавад при роботі імпульсного регулятора.....	173
8. Оптимізація систем електропостачання за допомогою пристроїв на базі сплавів з ефектом пам'яті форми.....	182
8.1. Характеристики сплавів з ефектом пам'яті форми.....	182
8.2. Термоприводи на базі ЕПФ.....	184
8.3. Термокомпенсатор як елемент повітряних ліній електропередачі.....	187
8.3.1. Принципи компенсації теплового подовження провода ЛЕП.....	187
8.3.2. Багатофункціональний термокомпенсатор стріли провисання проводів ЛЕП.....	193
8.3.3. Термопристрій для скидання голольоду з проводів ЛЕП.....	193
8.3.4. Термокомпенсатор з перпендикулярним розміщенням робочих елементів.....	194
8.3.5. Термокомпенсатор з кріпленням до гірлянди ізоляторів.....	194
8.3.6. Комбінований термокомпенсатор.....	195
8.3.7. Термокомпенсатор із значним ходом.....	195
8.3.8. Термокомпенсатор для ЛЕП із розщепленням фаз.....	195
8.3.9. Термокомпенсатор, закріплений на ізоляторі.....	196
8.3.10. Пристрій для встановлення термокомпенсатора на проводах ЛЕП.....	196
8.4. Термосигналізатор аварійних температур апаратних зажимів.....	197
8.5. Термосигналізатор аварійних температур елементів ЛЕП.....	198
8.6. Силова контактна система з автоматичною стабілізацією перехідного опору.....	199
8.7. Перспективи застосування матеріалів з ЕПФ.....	200
Список літератури.....	212

Передмова

Поданий в книзі матеріал — це спроба висвітлити деякі питання оптимізації систем електроспоживання промислових підприємств з сучасних позицій та дати додаткові матеріали на допомогу фахівцям, що займаються питаннями оптимізації в практичній діяльності.

Системний підхід до розгляду різних технічних задач показав на сьогодні свою перевагу. Безперервність та взаємозв'язок процесів виробництва, передачі і споживання електроенергії, відсутність одного рішення, виявлення цілої області прийнятних рішень вимагає створення системи, яка б могла адаптувати споживачів електроенергії до нестабільних умов розвитку енергосистеми з мінімальними витратами.

В книзі приділено значну увагу комплексному підходу до підвищення якості напруги. Проаналізовано вплив перетворювачів струму на режими роботи електричних мереж підприємств, подані результати досліджень негативного впливу несинусоїдальності напруги на роботу електроприймачів, лічильників енергії. Запропоновані методики мінімізації рівня вищих гармонік, системного підходу до компенсації реактивної потужності та оптимального перерозподілу її потоку.

Суттєва увага приділена принципам імпульсного регулювання струму, потужності, напруги. Виконано аналіз методів модуляції імпульсів з метою оптимізації параметрів напруги. Запропоновано схему трифазного імпульсного регулятора на одному магнітопроводі з трьома стержнями. Розглянуто принципи розширення функціональних можливостей тиристорних пристроїв при наявності мікропроцесорного керування ними та застосування їх як активних фільтрів вищих гармонік.

Показано, що надійність електропостачання може бути підвищена з допомогою цілого комплексу установок, виготовлених із застосуванням матеріалів з ефектом "пам'яті форми". Найпростіші з них — це термосигналізатори аварійних температур елементів ЛЕП та підстанцій та силові контакти з автоматичною стабілізацією перехідного опору.

Книга аналізує математичне забезпечення вказаних проблем, а також різні аспекти практичного вирішення їх.

Автор усвідомлює, що в зв'язку з недостатньою розробкою теоретичних аспектів системних вирішень, книга не по всіх розділах вдалася однаково і має, очевидно, деякі недоліки. Автор буде вдячний читачам за побажання та зауваження.

1. Аналіз показників якості електроенергії

1.1. Відхилення напруги

Показники якості електроенергії нормуються міждержавним стандартом ГОСТ 13109 – 97, який був введений в Україні 01. 01. 2000 р. Для характеристики якості напруги вводяться кілька показників, одним з найважливіших є відхилення напруги (за стандартом 13109 – 97 називається усталене відхилення напруги).

Відхилення напруги визначається як різниця між фактичним і номінальним значеннями напруги даної мережі :

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100\%$$

Відхилення напруги – це повільна плавна зміна напруги, зумовлена зміною навантаження.

Норми показників якості електроенергії (ПЯЕ) поділяються на нормально допустимі та гранично допустимі. Нормальні значення мають витримуватися з ймовірністю 0,95 , тобто протягом 95% часу доби ПЯЕ не повинні виходити за межі стандарту. Протягом решти часу (5%) норми можуть бути вищими.

Нормально допустиме та гранично допустиме значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електроенергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та вище дорівнює відповідно ± 5 та $\pm 10\%$ номінальної напруги електричної мережі.

У післяаварійних режимах ПЯЕ не повинні виходити за межі гранично допустимих значень.

Відхилення напруги 5% допускається для промислових споживачів у Великобританії та Італії.

Більшість електроприймачів може працювати і за інших значень відхилення напруги, але при цьому спостерігатимуться відчутні народногосподарські збитки.

Збитки, зумовлені низькою якістю напруги, мають дві складові : електромагнітну та технологічну.

Електромагнітна складова визначається зростанням втрат енергії та зменшенням терміну служби електрообладнання.

Технологічна складова збитків зумовлена впливом якості напруги на продуктивність технологічних установок та на собівартість продукції. Технологічні збитки складають до 90...92% всіх збитків і вміщені в собівартість продукції. Енергетики замовчують це питання, технологи, як правило, не знають причини технологічних збитків.

При відхиленнях напруги на зажимах асинхронних двигунів змінюється швидкість ротора, реактивна потужність та втрати активної потужності (рис. 1.1, 1.2., 1.3.).

Величина додаткової реактивної потужності δQ в порівнянні з $Q_{НОМ}$, що споживається АД при $U_{НОМ}$, приблизно дорівнює (рис. 1.3., 1.4.)

$$\delta Q = \left[K(5(\delta U)^2 + 3,5\delta U) + (K-1) \frac{(\delta U)^2 + 2\delta U}{(1+\delta U)^2} K_3^2 \right] Q_{НОМ}$$

де: δU - відхилення напруги, $K = \frac{Q_{0\text{НОМ}}}{Q_{\text{НОМ}}}$,

$$K_p = \frac{\delta P}{\Delta P_{\text{НОМ}}} - \text{додаткові втрати в АД.}$$

При тривалій роботі з пониженою напругою термін служби двигуна зменшується. Відносно старіння ізоляції

$$R = \frac{T_{\text{НОМ}}}{T},$$

де: $T_{\text{НОМ}}$ - термін служби ізоляції при $U_{\text{НОМ}}$ та $K_3 = K_{3\text{НОМ}}$,

$T_{\delta U K_3}$ - термін служби ізоляції при відхиленнях δU від $U_{\text{НОМ}}$ та при $K_3 \neq K_{3\text{НОМ}}$.

$$R = \begin{cases} (47(\delta U)^2 - 7,55\delta U + 1)K_3^2 & \text{при } -0,2 \leq \delta U < 0 \\ K_3^2 & +0,2 \leq \delta U \leq 0, \end{cases}$$

K - коефіцієнт, що дорівнює відношенню реактивної потужності, що витрачається на намагнічування сталі при $U_{\text{НОМ}}$ до сумарної реактивної потужності, що споживається двигуном при $K_3 = 1$ та $U_{\text{НОМ}}$.

Активна потужність, що споживається асинхронним двигуном

$$P_{\text{АД}} = K_3 P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{НОМ}}(1 + K_p)$$

$$K_p = (11,84K_3^3 - 18,25K_3^2 + 3,9K_3)(\delta U)^3 + (-2,67K_3^3 + 9,5K_3^2 - 3,08K_3 + 1)(\delta U)^2 + (-2,35K_3^3 + 1,55K_3^2 - 0,81K_3 + 0,85)\delta U,$$

при $K_3 = 1$

$$K_p = -2,51(\delta U)^3 + 4,75(\delta U)^2 - 0,75\delta U.$$

Додаткові питомі витрати при експлуатації асинхронних двигунів

$$3 = 3_e(\delta P + \delta P) + \frac{0,253}{8760} \frac{3_{KV}}{\delta Q} \delta Q - \gamma \delta P_{\text{н}},$$

де: 3 - вартість 1 кВт·год.

δP - додаткові втрати в двигуні,

δP_n - додаткове споживання енергії двигуном, внаслідок зміни швидкості обертання ротора.

$$\delta_n = \frac{n - n_{НОМ}}{n_{СИНХР}} \cdot 100\% ,$$

де: n - швидкість обертання при напрузі U та $K_3 \neq 1$;

$n_{НОМ}$ - швидкість обертання при $U = U_{НОМ}$, $K_3 \neq 1$;

$n_{СИНХР}$ - синхронна швидкість .

Відхилення напруги негативно впливають на роботу синхронних двигунів (рис. 1.5., 1.6., 1.7.).

Найжорсткіші вимоги до якості напруги ставлять освітлювальні електроприймачі. Зміна основних параметрів ламп при відхиленнях напруги на їхніх затискачах, що не перевищують $\pm 10\%$, з достатнім ступенем точності описуються рівняннями

$$\frac{F}{F_{НОМ}} = \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^n ; \quad \frac{P}{P_{НОМ}} = \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^m ; \quad \frac{T}{T_{НОМ}} = \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^l ,$$

де $F, F_{НОМ}, P, P_{НОМ}, T, T_{НОМ}$ - дійсні та номінальні значення відповідно світлового потоку, споживаної потужності та терміну служби ламп ;

$U, U_{НОМ}$ - дійсне і номінальне значення напруги на затискачах ламп ; n, m, l - показники які залежать від типу лампи. Для ламп розжарювання $n=3,61$,

$m=1,58$, $l=14$. Для люмінесцентних ламп $n=1,5$, $m=2,75$, $l=3,72$. Для

ламп типу ДРЛ $n=3$, $m=1,78$, $l=3,72$ (рис. 1.8., 1.9., 1.10.).

Найкритичнішим параметром зміни напруги є термін служби ламп. Підвищення напруги на затискачах ламп розжарювання на 6% викликає зниження терміну служби на 50%. Для люмінесцентних ламп ця залежність відображена слабше. Проте, як підвищення, так і зниження напруги на їхніх затискачах небажане. У першому випадку відбувається інтенсивне розпилення оксидної речовини з електродів і перегрів ПРА, у другому - зміна тиску пари ртуті у колбі, що призводить до зниження терміну служби та нестійкого запалювання. Враховуючи, що вартість люмінесцентних ламп у 10 разів вища за вартість ламп розжарювання, навіть зниження терміну служби їх на 20 - 30% при підвищенні напруги на 10% викликає значні народногосподарські збитки (рис. 1.10.).

Зниження напруги у ламп розжарювання на 1% викликає зменшення світлового потоку на 2,7%, у люмінесцентних ламп - на 1,25%. Зменшення світлового потоку, у свою чергу, призводить до погіршення санітарно-гігієнічних умов для працюючих і до зниження продуктивності праці. Наприклад, підвищення освітленості вдвічі сприяло підвищенню

продуктивності праці в механічних цехах на 12%, у шовкопрядильних - на 21%, тобто додаткові затрати на поліпшення освітленості з верхом окуповуються, і "дорого коштує погане освітлення".

Продуктивність праці

$$P = \left(1 - \frac{\lg B_{\min}}{\lg B_p} \right) z_0$$

де: $B_{\min}$ - мінімальна освітленість за вимогами охорони праці,

B_p - реальна освітленість.

Чутливість виробництва до освітленості

$$z_0 = \frac{\tau_p - \tau_M}{\tau_M}$$

де τ_p, τ_M - сумарні тривалості операцій при відповідних умовах освітленості.

У виробничих цехах з безперервним циклом при відхиленні напруги на 7...11% потреба в лампах зростає в три рази.

Технологічні збитки визначаються по характеристикам конкретних машин. Чутливі до відхилень напруги автоматизовані виробництва, і на-соси та інші. При зниженні напруги на 7% технологічний процес подовжується на 40...60%.

Відхилення напруги призводять до зміни продуктивності насосів.

Економічні характеристики насосів моделює рівняння.

$$Z = c\delta U + k(\delta U)^2$$

де: $c = -8,7 \cdot 10^{-3}$ грн / кВт · г ;

$k = -34,5 \cdot 10^{-3}$ грн / кВт · г.

Відхилення напруги впливають на характеристики перетворювачів енергії. При підвищенні напруги збільшується кут регулювання, що призводить до зменшення коефіцієнта потужності перетворювача.

Суттєво чутливі до відхилень напруги термічні установки та електропечі. Зниження напруги призводить до збільшення тривалості технологічних циклів. Продуктивність печей знижується, підвищуються витрати електроенергії, збільшується собівартість продукції. При відхиленнях 10% з'являється брак.

Реактивна потужність конденсаторних батарей пропорційна квадрату напруги, тому зниження напруги у мережі викликає різке зменшення виданої конденсаторами реактивної потужності і, як наслідок, підвищення споживаної реактивної потужності із зовнішньої мережі й додаткове збільшення втрат напруги. Вказані явища призводять до лавиноподібного зниження напруги й до масового вимкнення двигунів. При цьому спостерігаються такі види народногосподарських збитків: брак продукції, скорочення терміну служби обладнання і застосування понаднормових робіт для довипуску продукції.

Величину збитків при поганій якості напруги можна визначити за виразом

$$Y = \int_0^{+V_{MAX}^I} f(V)\varphi(V)dV + \int_0^{-V_{MAX}^{II}} f(V)\varphi(V)dV$$

де: $+V_{MAX}^I, -V_{MAX}^{II}$ - максимальні значення відхилення від $U_{НОМ}$

V - дійсне значення напруги (позначення для економічних розрахунків);

$f(V)$ - економічна характеристика споживача;

$\varphi(V)$ - густина ймовірності з'явлення відхилення напруги.

Проте, охарактеризувати якість напруги, а також збитки при погіршенні її, тільки за величиною відхилень недостатньо. Точнішою є оцінка за середнім відхиленням $V_{сер}$ за розрахунковий проміжок часу T :

$$V_{сер} = \frac{100}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} V dt$$

Широко використовується оцінка за середньоквадратичним відхиленням, введеним Айєра:

$$(V_{ск})^2 = \frac{1000}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} (V)^2 dt$$

Народногосподарські збитки від неякісної напруги

$$Y = \sum_{C=1}^n d \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} (V)^2 P(t) dt$$

де $P(t)$ - миттєве значення активної потужності; d - коефіцієнт, що враховує вид навантаження.

Якщо використати середнє значення активної потужності, то

$$Y = \sum_{C=1}^n d P_{cp} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} (V)^2 P(t) dt$$

Підінтегральний вираз є одним з основних показників при визначенні економічності роботи мережі й зустрічається під назвою "неоднаковість" напруги.

Втрати потужності у системах електропостачання підприємств залежать від відхилень напруги й визначається за виразом

$$\Delta P = \beta^2 \Delta P_{нав.НОМ} \left(\frac{100}{100 + V} \right)^2 + P_{x.НОМ} \left(\frac{100}{100 + V} \right)^2$$

де $\Delta P_{\text{нап НОМ}}$, $\Delta P_{\text{с.НОМ}}$ - втрати відповідно навантажувальні та холостого ходу при номінальній напрузі; V - відхилення напруги, % (позначення для економічних розрахунків).

1.2. Коливання напруги

Коливання напруги характеризуються трьома величинами: розмахом зміни напруги, частотою зміни напруги й інтервалом часу між змінами напруги, що йдуть один за одним.

Розмах зміни напруги - це різниця між екстремумами, що йдуть один за одним, обвідної діючих значень. Якщо обвідна має горизонтальні ділянки, розмах зміни напруги визначається як різниця між сусідніми горизонтальними ділянками

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{\sqrt{2}U_{\text{НОМ}}} 100\%$$

Частота повторювань змін напруги при періодичних коливаннях

$$F = \frac{m}{T}$$

де m - кількість змін напруги за час T

Допустимий розмах визначається за кривими, які побудовані для двох випадків. Якщо огинаюча коливань має форму меандра (рис.1.11.), розмах коливань визначають по кривій 1 (рис.1.12.) в точках загального приєднання до електричних мереж. Для споживачів з лампами розжарювання в приміщеннях із значною зоровою напругою - по кривій 2 (рис.1.12.).

Гранично допустиме значення суми усталеного відхилення напруги та розмаху коливань напруги в точках приєднання до електричної мережі напругою 0,38 кВ дорівнює $\pm 10\%$ номінальної напруги.

До розмахів зміни напруги відносять одиничні зміни напруг будь-якої форми з частотою повторення понад два рази за хвилину (1/60 Гц) і розмахи з частотою повторення від двох разів за хвилину до одного разу за годину, що мають середню швидкість зміни напруги понад 0.1 %/с. для ламп розжарювання і 0.2 %/с. для решти електроприймачів.

Умовою допустимості сукупності розмахів зміни напруги, кожний з яких не перевищує значень, що визначаються згідно з рис. , є

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_{gi} \leq T$$

де Δt_{gi} - мінімальний допустимий інтервал часу між розмахами амплітуди δU_i , що визначається за нижньою шкалою рис. 1.12.;

T - загальний час спостереження розмахів.

Для характеристики коливань напруги стандарт 13109 - 97 вводить поняття дози флікера - інтегральна характеристика коливань напруги, що викликають у людини роздратування миготінням світла, яке накопичується за встановлений період часу (рис.1.13.).

Гранично допустиме значення для короткочасної дози флікера P_{Σ} при коливаннях напруги з формою, що відрізняються від меандра, дорівнює 1,38, а для тривалої дози флікера P_L при тих же коливаннях напруги дорівнює 1,0. Короткочасну дозу флікера визначають на інтервалі часу 10 хв. Тривалу дозу флікера – за 2 год.

Гранично допустиме значення для короткочасної дози флікера в точках загального приєднання споживачів, що мають лампи розжарювання в приміщеннях із значною зоровою напругою при коливаннях з формою, що відрізняються від меандра, дорівнює 1,0, для тривалої дози флікера в цих же точках 0,74.

Дозу флікера визначають з допомогою спеціального прилада – флікерметра. За інтервал часу (10 хв) вимірюють рівні флікера, що відповідають інтегральній вірогідності 0,1; 0,7; 1,0; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 17,0; 30,0; 50,0; 80,0.

Для будь-якої силової мережі напругою 660...380 В коливання напруги мають бути не нижчими 85% від $U_{ном.}$ У протилежному разі може трапитися вимкнення магнітних пускачів, контакторів, реле. Коливання напруги можуть викликати хитання синхронних двигунів і вихід їх із синхронізму.

Коливання напруги призводять до зміни моменту на валу двигуна і скорочують їх термін служби. Порушується технологічний процес на виробництвах, де потрібна стабільна частота обертання двигунів / ткацьких машин /. Коливання напруги викликають миготіння ламп, що спричинює зниження продуктивності праці внаслідок стомлюваності очей, особливо на складанні точних механізмів, у креслярських роботах і т.ін (рис.1.13.).

Ступінь впливу коливань напруги на зір залежить від швидкості змін напруги та абсолютного значення цих змін (розмах коливань). Око людини сприймає коливання диференційовано, це видно з амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

При коливаннях нечітко сприймаються деталі предметів, графічні зображення, що впливає на продуктивність праці.

Коливання ламп розжарювання сприймаються в більшій мірі, ніж в люмінесцентних ламп.

При розмахах вище 15% можливе відключення пускачів, порушується робота люмінесцентних ламп, виходять з ладу конденсатори та вентилі перетворювальних агрегатів.

Руйнуються магнітопроводи індукційних нагрівачів, порушується робота систем автоматичного управління синхронних двигунів (СД).

При живленні печей з тиристорним регулюванням відбувається нестійкий режим роботи автоматичного регулювання.

Зміни напруги викликають коливання електромагнітного моменту генераторів ТЕЦ, це негативно позначається на економічних показниках станції в цілому, нестійко працює автоматичне регулювання збудження генераторів, помилково спрацьовує форсування збудження.

Коливання напруги призводять до вібрації двигунів, насосів, трубопроводної арматури. Знижується міцність металу, скорочується термін його служби.

При коливаннях з частотою 1Гц, термін служби трубопроводів, внаслідок пульсацій напору насосів, скорочується на 5...7%.

Коливання напруги призводять до значних соціальних збитків, зумовлених дією мигання ламп, нестійкою роботою телевізорів на значні групи людей.