

УДК 620.9.004.18

## ОПТИМИЗАЦИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ

**Н.В. ТОКОЧАКОВА, Ю.Н. КОЛЕСНИК**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Режим напряжения как показатель качества электрической энергии**

Качество электроэнергии может оказывать существенное влияние на условия и технико-экономические показатели работы промышленных предприятий, на производительность труда и, в конечном счете, на качество и количество выпускаемой промышленной продукции. Весьма важное значение, придаваемое в настоящее время качеству электроэнергии, привело к появлению «Временных указаний по регулированию напряжения в электрических сетях», утвержденного в 1999 г. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения», материалов Всесоюзного совещания по вопросам регулирования напряжения в электрических сетях и др.

Качество напряжения или режим напряжения в электрической сети характеризуется совокупностью значений напряжения в характерных ее пунктах и, в частности, определяется величиной отклонения напряжения:

$$V_i = \frac{U_i - U_n}{U_n} 100 \%,$$

где  $U_i$  – напряжение в узле  $i$  сети;

$U_n$  – номинальное напряжение сети.

При значительном отклонении напряжения у ЭП во многих случаях имеет место нарушение условий их нормальной работы (вместе с механизмами). В результате снижается качество и появляется брак продукции, происходит сокращение срока службы электротехнического оборудования и т. д.

На основе накопленного опыта в ГОСТ установлены допустимые пределы отклонения напряжения. В этих пределах ненормальных явлений обычно не наблюдается, хотя это и требует дополнительной тщательной проверки. На них в основном ориентируется электротехническая промышленность.

В ГОСТ 13109-97 указано, что на зажимах электроприемников допускаются отклонения напряжения в пределах 5 % от номинального в нормальном режиме и в пределах 10 % – в аварийном.

### **Влияние режима напряжения на работу электроприемников**

#### *Асинхронные двигатели.*

При номинальном напряжении на зажимах асинхронного двигателя он, работая с полной нагрузкой, потребляет из сети активную и реактивную мощность. В случае изменения напряжения сети активная мощность на валу двигателя остается практически постоянной, изменяются лишь потери активной мощности в двигателе [1].

Анализ зависимостей изменения величины дополнительных потерь для различных типов двигателей от напряжения на их зажимах показал, что наиболее существенное влияние имеет значение коэффициента загрузки двигателя.

Установлено, что общим для всех рассмотренных двигателей является увеличение потребляемой реактивной мощности при увеличении подведенного напряжения (рис. 1).

Кроме того, удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки.

Для приближенных расчетов можно принимать, что для наиболее распространенных трехфазных двигателей серии 4А мощностью 20-100 кВт повышение напряжения на 1 % приводит к росту реактивной мощности приблизительно на 3 %. Для двигателей меньшей номинальной мощности соответствующее увеличение потребляемой реактивной мощности достигает 5-7 %.

При изменении напряжения на зажимах двигателя изменяется его скольжение, а следовательно, и скорость вращения (рис. 2).

При снижении напряжения скорость вращения двигателей заметно снижается, особенно для двигателей меньшей мощности. Наоборот, повышение напряжения приводит к увеличению скорости двигателей. При работе двигателей с малыми коэффициентами загрузки влияние изменения напряжения на скорость двигателей практически очень мало.

При оценке влияния изменения напряжения на экономичность работы асинхронных двигателей следует учитывать стоимость дополнительных потерь электроэнергии, вызванных отклонением напряжения, увеличение реактивной мощности, потребляемой двигателем, а также изменение экономических показателей, связанных с влиянием изменения скорости вращения на производительность соответствующих механизмов.

В настоящее время отсутствует единая методика оценки экономичности работы асинхронных двигателей. Некоторые специалисты вообще отрицают целесообразность и возможность практического выполнения подобных расчетов, мотивируя это тем, что изменение активной и реактивной мощности, потребляемой двигателем при относительно небольших отклонениях от номинального напряжения, мало, а влияние изменений скорости двигателей на производительность механизмов в этих условиях практически вообще отсутствует и не может быть даже замечено.

В то же время имеются данные о том, что правильная оценка влияния изменений напряжения на экономичность работы асинхронных двигателей в ряде случаев позволяет получить существенный эффект.

Если влияние скорости вращения двигателя на производительность механизмов имеет место, то напряжение на зажимах двигателей должно поддерживаться не ниже

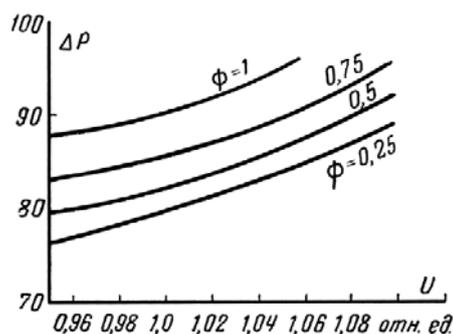


Рис. 1. Зависимость  $Q = f(m)$

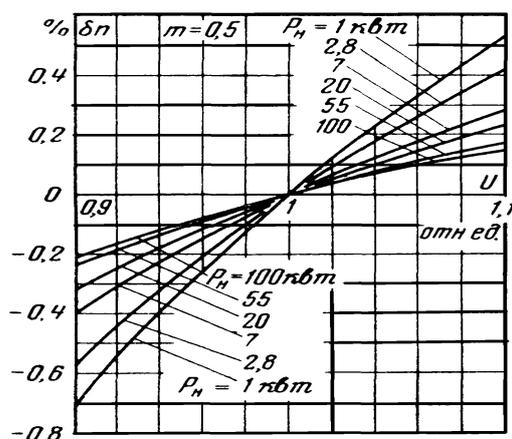


Рис. 2. Зависимость  $d_n = f(U)$

номинального при малых коэффициентах загрузки, и в пределах наибольшего допустимого значения при больших коэффициентах загрузки (близких к номинальной).

При отсутствии влияния скорости вращения двигателя на производительность механизмов целесообразно поддерживать напряжение на зажимах двигателей не выше номинального при больших коэффициентах загрузки и ниже номинального при малых коэффициентах загрузки.

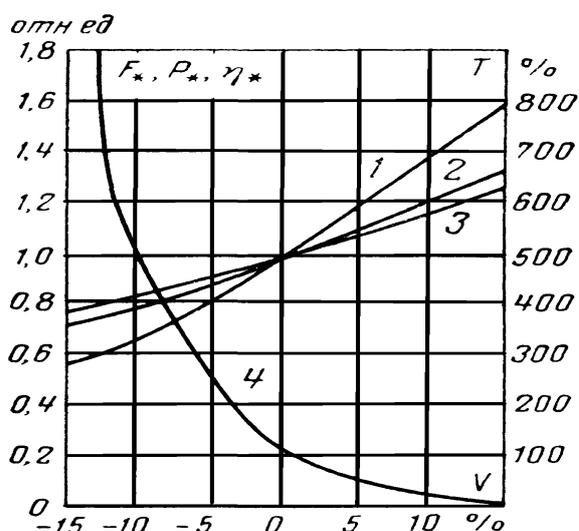
Экономические характеристики могут быть построены как для отдельных ЭП, так и для узлов распределительной сети или для узлов нагрузки электрических систем.

#### Осветительные электроприемники.

Рассмотрим влияние отклонения напряжения на работу осветительных ЭП.

Лампы накаливания характеризуются следующими основными параметрами: потребляемой мощностью, световым потоком и средним номинальным сроком службы.

Эти показатели в значительной мере зависят от величины напряжения на зажимах ламп (рис. 3).



При повышении напряжения увеличиваются световой поток и мощность лампы, но резко снижается срок службы. В случае снижения напряжения резко уменьшается световой поток, а следовательно, и освещенность рабочей поверхности. При относительно небольших изменениях напряжения (в пределах  $\pm 10\%$  от  $U_n$ ) зависимость потребляемой мощности от напряжения может быть выражена аналитически [1] следующим приближенным выражением:

Рис. 3. Характеристики светильников: 1 – световой поток; 2 – световая отдача; 3 – мощность; 4 – срок службы, %

$$P = (U / U_n)^{1,6} \approx 1 + 1,5 \cdot U$$

Из газоразрядных ламп для освещения в промышленных предприятиях применяют в основном люминесцентные лампы и лампы типа ДРЛ. При пониженном напряжении люминесцентные лампы или не загораются совсем, или их горение сопровождается интенсивным распылением оксидного вещества с катодов ламп. Это приводит к миганиям и резкому сокращению срока службы лампы. При повышении напряжения нарушается тепловой баланс, увеличивается давление ртутных паров, что снижает экономичность работы лампы и срок ее службы.

#### Электротермические установки.

На предприятиях различных отраслей промышленности значительное распространение имеют электротермические установки, служащие для нагрева изделий, расплавления, их закалки и т. п.

Работа печей при наличии отклонений от номинального напряжения затрудняется, может иметь место снижение их производительности, а в ряде случаев и расстройство технологического процесса. Это может привести к значительному экономическому ущербу.

Наблюдения за качеством напряжения в цехе горячей вулканизации одной из обувных фабрик показали, что для нормального ведения технологического процесса необходимо поддерживать определенную температуру на поверхности вулканизаци-

онного оборудования. Снижение напряжения на 1 % от номинального значения вызывает изменения требуемой температуры нагрева и задержку выпуска продукции. Фактически отклонения от номинального напряжения были относительно невелики: среднеквадратичное отклонение за характерный месяц составило около 2,9 % номинального напряжения. Однако расчеты показали, что при таком режиме напряжения можно было бы ожидать недоотпуск продукции примерно в 330 тыс. пар обуви за год. Для предотвращения этого ущерба на фабрике были применены специальные устройства для местного регулирования напряжения: оборудована автоматическая станция терморегулирования, при помощи которой изменялось количество секций электронагревателей, понижающие трансформаторы у прессов были снабжены четырьмя ступенями изменения вторичного напряжения.

По данным главного энергетика одного из ферросплавных заводов производительность электроплавильной печи мощностью 10000 кВА за сутки при работе с напряжением 37 кВ составляла 44 т силикохрома. Для той же печи при напряжении около 34-35 кВ (снижение напряжения на 5-9 %) производительность уменьшалась до 38,8 т, т. е. примерно на 12 %.

#### Регулирование напряжения в цеховых сетях предприятий.

Для изменения режима напряжения в цеховых электрических сетях напряжением до 1 кВ наиболее эффективным средством является варьирование коэффициента трансформации цехового трансформатора с помощью устройства ПБВ. Поскольку для изменения коэффициента трансформации трансформатора с ПБВ требуется отключать его от сети, то регулирование напряжения таким способом осуществляется редко. Практически такие переключения осуществляются не чаще 2 раз в год (сезонное регулирование).

В [2] изложены результаты экспериментов по оценке влияния уровня напряжения в цеховых электрических сетях на удельные расходы электроэнергии промышленных предприятий как основного показателя эффективности использования электроэнергии в производстве. Было установлено, что значение напряжения является одним из факторов, определяющим величину удельного расхода электроэнергии.

Проведенные эксперименты позволили сделать общий вывод относительно характеристик электродвигателей малой мощности, заключающийся в том, что максимум КПД и коэффициента мощности при загрузке двигателей по активной мощности (0,6-0,75)  $P_{ном}$  наступает при напряжении на зажимах двигателей (0,93-0,97)  $U_{ном}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности определения и поддержания оптимального напряжения в цеховых электрических сетях и необходимости рассмотрения регулирования напряжения как одного из возможных путей экономии электрической энергии.

Эффективность регулирования напряжения в сетях предприятия с целью снижения уровня электропотребления покажем на примере Речицкого управления технологического транспорта (РУТТ). Регулирование напряжения в сетях цеховых потребителей электроэнергии является одним из возможных путей энергосбережения.

При обследовании РУТТ выяснилось, что напряжение в цеховых электрических сетях на стороне 0,4 кВ поддерживается на верхнем уровне ( $U_{ном}+5\%$ ), а иногда достигает и более высоких значений. Эти данные были получены экспериментальным путем в часы максимальных нагрузок энергосистемы. Устройство ПБВ трансформатора ТМФ-630-10/0,4 кВ автогаража № 1 находится в III положении.

В соответствии с методикой, изложенной в [3], был проведен оценочный расчет величины нерационального расхода электроэнергии при повышенном напряжении.

В данном случае расчет основывается на результатах измерения электропотребления за I квартал 1999 года по счетчикам активной энергии, установленным на КТП и ведущим учет по линиям, питающим группы потребителей.

Исходные данные для расчета мероприятия по снижению уровня питающего напряжения представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Исходные данные для расчета эффективности  
снижения уровня питающего напряжения**

Наименование цеха	Средняя мощность цеха, P <sub>p</sub> , кВт	Число часов работы, T, час	Число часов работы освещения T <sub>осв</sub> , час	Среднее напряжение потребителей U <sub>ср</sub> , В	Годовое электропотребление (без учета освещения), А, тыс. кВт·ч
Ремонтный бокс № 1	11,23	2040	765	405	22,9
Аккумуляторная	0,83	2040	765/1530	400	1,7
Тракторный гараж	18,87	2040	765/1530	405	38,5
Стройцех	0,74	2040	765	400	1,5
Ремонтный бокс тракторной техники	0,15	2040	765	395	0,3

Расчет снижения электропотребления для ремонтного бокса № 1 при уменьшении напряжения выполнен следующим образом [3]:

1. Силовая нагрузка.

Фактический линейный ток:

$$I_{л} = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_m} = \frac{11,23 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 405} = 16,02 \text{ А.}$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки:

$$R_{эк} = \frac{U_m}{I_{л}} = \frac{405}{16,02} = 25,28 \text{ Ом.}$$

Суммарный линейный ток при номинальном напряжении:

$$I_{л} = \frac{U_n}{R_{эк}} = \frac{380}{25,28} = 15,03 \text{ А.}$$

Суммарная расчетная мощность при номинальном напряжении:

$$P_{рн} = \sqrt{3} \cdot I_{л} \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot 15,03 \cdot 380 = 9,88 \text{ кВт.}$$

Изменение потребляемой мощности за счет снижения напряжения:

$$\Delta P = P_p - P_{рн} = 11,23 - 9,88 = 1,34 \text{ кВт.}$$

Годовая экономия электроэнергии при снижении напряжения до номинального:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot T = 1,34 \cdot 2040 = 2,74 \text{ тыс. кВт·ч.}$$

2. Осветительная нагрузка.

Потребляемая мощность

$$P = P_{p.осв} \cdot \left( \frac{0,95}{405/380} \right)^{1,6} = 9,67 \cdot \left( \frac{0,95}{1,07} \right)^{1,6} = 8,05 \text{ кВт.}$$

Снижение потребляемой мощности:

$$\Delta P = 9,67 - 8,05 = 1,63 \text{ кВт.}$$

Годовая экономия электроэнергии при снижении напряжения до номинального:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot T = 1,63 \cdot 765 \cdot 10^{-3} = 1,24 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч.}$$

Экономия по остальным цехам рассчитывается аналогично. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Эффективность регулирования напряжения цеховых трансформаторов в подразделениях РУТТ**

Наименование цеха	$\Delta P$ , кВт		$\Delta \mathcal{E}$ , тыс. кВт·ч		Экономия электроэнергии	
	Силовая нагрузка	Освещение	Силовая нагрузка	Освещение	Всего	% от годового
Ремонтный бокс № 1	1,34	1,63	2,74	1,24	3,98	0,53
Аккумуляторная	0,08	0,12	0,17	0,09	2,2	0,29
Наружное		1,27		1,94		
Тракторный гараж	2,26	0,46	4,61	0,35	9,08	1,2
Наружное		2,69		4,12		
Стройцех	0,07	0,30	0,15	0,23	0,38	0,05
Ремонтный бокс тракторной техники	0,01	0,56	0,02	0,43	0,45	0,06
Итого					16,09	2,13

Таким образом, суммарная годовая величина экономии электроэнергии при понижении уровня напряжения составит 16,09 тыс. кВт·ч или 2,13 % от общего электропотребления РУТТ.

**Выводы**

1. Характерной особенностью большинства промышленных потребителей электроэнергии является низкая загрузка технологического электрооборудования и, как следствие, завышенные уровни напряжения на их зажимах.

2. Одним из возможных путей экономии электроэнергии для неответственных потребителей, особенно в условиях спада производства, является оптимизация уровней напряжения в цеховых электрических сетях.

3. Приведенные аналитические выражения позволяют с достаточной точностью для оценочных расчетов определять энергетическую эффективность оптимизации уровней напряжения в цеховых электрических сетях.

**Литература**

1. Карпов Ф.Ф., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий /Под ред. Н.А. Мельникова. – М.: «Энергия», 1970.
2. Кудрин Б.И., Прокопчик В.В, Елисеев Г.А. О влиянии режима напряжения в цеховых электрических сетях на удельные расходы электроэнергии промышленных предприятий //Промышленная энергетика. – 1987. – № 2.
3. Ермолович В. В. По поводу статьи «О влиянии режима напряжения в цеховых электрических сетях на удельные расходы электроэнергии промышленных предприятий» //Промышленная энергетика. – 1987. – № 10.

*Получено 13.11.2001 г.*