

УДК 621.313:333

РАСЧЕТ УЩЕРБА ОТ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Н.Г. Королевич,

зав. каф. экономики и организации предприятий АПК БГАТУ, канд. экон. наук, доцент

Г.И. Янукович,

профессор каф. электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук, профессор

Е.А. Тюнина,

ст. преподаватель каф. электроснабжения БГАТУ

В статье приведена методика расчета ущерба в асинхронных электродвигателях от отклонения напряжения. Показано влияние данных отклонений напряжения на величину ущерба в асинхронном электродвигателе.

Ключевые слова: электроэнергия, ущерб, отклонение напряжения, электродвигатели.

The article presents methods of damage calculations in induction motors from voltage deviations. The effect of these voltage deviations on the damage value in the induction motor is shown.

Keywords: electricity, damage, voltage deviation, electric motor.

Введение

Одним из показателей качества электрической энергии является отклонение напряжения от номинального значения. Ранее существовавший ГОСТ 13109-97 допускал отклонение напряжения у потребителей в пределах $\pm 5\%$. Вновь принятый ГОСТ 32144-2013, который вступил в действие с 1 апреля 2016 года, допускает отклонение напряжения в пределах $\pm 10\%$ [1].

Основная часть

Каждый асинхронный электродвигатель проектируется и изготавливается для работы в определенном режиме, который называется номинальным. Количественные значения параметров машины в номинальном режиме называются номинальными параметрами. Наиболее важными из них являются: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальный режим работы, номинальный КПД, номинальная частота вращения, номинальная частота тока и другие [2].

Работа асинхронного электродвигателя в ненормальных режимах имеет свои особенности. В частности, при снижении напряжения питания происходят следующие взаимосвязанные процессы:

- уменьшается намагничивающий ток и магнитные потери двигателя;
- значительно уменьшается электромагнитный момент пропорционально изменению напряжения во второй степени;
- при неизменном моменте сопротивления на валу снижается частота вращения ротора, и уменьшаются механические потери в двигателе, а скольжение возрастает;

– вследствие увеличения частоты перемагничивания ротора возрастает ЭДС, наводимая в его обмотке вращающимся с синхронной частотой магнитным полем, что приводит к увеличению тока ротора и электрических потерь в роторе;

– увеличение тока ротора приводит к увеличению его магнитного поля, которое оказывает размагничивающее действие и уменьшает наводимую в обмотке статора ЭДС, возрастает ток статора и электрические потери его обмотки.

При небольшом увеличении напряжения (до 10 % от номинального) протекают аналогичные физические процессы противоположной направленности. При более значительном увеличении напряжения происходит насыщение магнитной системы двигателя. Значительно увеличивается намагничивающий ток. Ток статора начинает расти. Угол увеличивается, $\cos \varphi$ уменьшается. Потери в стали и в обмотках увеличиваются, следовательно КПД уменьшается. Частота вращения увеличивается.

Все вышеперечисленные процессы приводят к экономическому ущербу при отклонениях напряжения на зажимах электродвигателя от номинального. У асинхронных двигателей составляющие ущерба связываются с дополнительными потерями активной мощности, дополнительным потреблением реактивной мощности, сокращением срока службы изоляции, снижением производительности механизмов. Значение ущерба также зависит от коэффициента загрузки двигателя [3]. При средних значениях коэффициента загрузки двигателя ($k_3=0,7 - 0,8$) дополнительные потери активной мощности будут иметь положительное значение, как при положительных, так и отрицательных отклонениях напряжения [3].

Это происходит потому, что при больших нагрузках двигателя основное значение имеют нагрузочные потери. При повышенном напряжении они уменьшаются в большей степени, чем увеличиваются потери холостого хода. Поэтому при повышении напряжения общие потери в машине при такой нагрузке уменьшаются. При малых нагрузках двигателя ($k_3 = 0,5$ и ниже) большее значение приобретают потери холостого хода [3]. При снижении напряжения они снижаются в большей степени, чем возрастают нагрузочные потери. Поэтому при снижении напряжения снижаются и общие потери в машине. При средних коэффициентах загрузки соотношение потерь холостого хода и нагрузочных потерь такое, что при повышении напряжения или его понижении, потери в машине возрастают [3].

На основании анализа литературных источников [2, 4] ущерб в асинхронных электродвигателях можно определить как:

$$Y_{дв} = Y_{ад} + Y_{рд} + Y_{св} + Y_{сз}, \quad (1)$$

где $Y_{ад}$ – ущерб от изменения потерь активной мощности двигателя, руб.;

$Y_{рд}$ – ущерб от изменения потребления реактивной мощности, руб.;

$Y_{св}$ – ущерб от изменения скорости вращения двигателя, что связано с изменением производительности технологического оборудования, руб. Дополнительные потери активной мощности, вызванные отклонениями напряжения [3]:

$$\delta P = \Delta P_U - \Delta P, \quad (2)$$

где ΔP – потери активной мощности при напряжении, равном номинальному, кВт.

ΔP_U – потери активной мощности при напряжении, отличном от номинального, кВт;

Зависимость потерь активной мощности от напряжения с достаточной для практики точностью можно выразить формулой [3]:

$$\Delta P_U \approx \Delta P_0 k_n^2 + \frac{\Delta P_{нн}}{k_n^2} k_3^2, \quad (3)$$

где ΔP_0 – активные потери холостого хода электродвигателя, кВт;

$\Delta P_{нн}$ – номинальные нагрузочные потери двигателя, кВт;

$$k_n = \frac{U}{U_n} - \text{коэффициент изменения напряжения};$$

U – напряжение на зажимах двигателя, отличное от номинального, кВ;

U_n – номинальное напряжение на зажимах двигателя, кВ;

k_3 – коэффициент загрузки двигателя. При расчетах можно принять усредненное значение, равное 0,75.

Потери активной мощности при номинальном напряжении определяются по известной формуле [3]:

$$\Delta P = P_{ном} \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном} (1 - \alpha)}, \quad (4)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$\eta_{ном}$ – коэффициент полезной мощности электродвигателя (к.п.д.);

α – коэффициент, равный отношению постоянных потерь мощности к переменным. Для асинхронных электродвигателей общего назначения

$$\alpha = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_k} = 0,5-0,7.$$

Потери холостого хода электродвигателя определяются по формуле [3]:

$$\Delta P_x = \sqrt{3} U_0 I_0 \cos \varphi_0, \quad (5)$$

где $U_0, I_0, \cos \varphi_0$ – параметры двигателя в режиме холостого хода, кВ, кА.

Ущерб от изменения потребления активной мощности двигателем определяется по формуле [4]:

$$Y_{ад} = C_1 \cdot \delta P \cdot T, \quad (6)$$

где C_1 – тариф на электроэнергию, руб/(кВ·ч);

δP – дополнительные потери активной мощности, кВт;

T – время работы электродвигателя, ч.

Потребление реактивной мощности двигателем определяется аналогично, как для активной мощности [4]:

$$\Delta Q = \Delta Q_0 k_n^2 + \frac{\Delta Q_{нн}}{k_n^2} k_3^2, \quad (7)$$

где ΔQ_0 – реактивные потери холостого хода электродвигателя, квар;

$\Delta Q_{нн}$ – дополнительная реактивная мощность рассеивания, квар.

Дополнительное потребление реактивной мощности, вызванное отклонениями напряжения, можно определить [4]:

$$\delta Q = \Delta Q_U - \Delta Q, \quad (8)$$

где ΔQ – потребление реактивной мощности электродвигателем при напряжении, равном номинальному, квар;

ΔQ_U – потребление реактивной мощности электродвигателем при напряжении, отличном от номинального, квар.

На практике установлено, что для электродвигателей, мощностью от 2 до 100 кВт, изменение напряжения на 1 % вызывает изменение потребляемой реактивной мощности на 3 % [3].

Ущерб от изменения потребляемой реактивной мощности асинхронного электродвигателя определяется по формуле [3]:

$$Y_{рд} = \delta Q \cdot Z_{ук}, \quad (9)$$

где $Z_{ук}$ – удельные затраты реактивной мощности конденсаторов, руб/квар.

Удельные затраты на компенсацию реактивной мощности можно определить по формуле [5]:

$$Z_{ук} = EK_{ук} + \Delta P_{ук} c_1 T, \quad (10)$$

где $E = 0,22$ – суммарный коэффициент отчислений от капитальных затрат для конденсаторов;

$K_{ук} = 30$ руб/квар – капитальные затраты на компенсацию реактивной мощности;

$\Delta P_{ук} = 0,004$ кВт/квар – потери активной мощности на компенсацию реактивной мощности.

Если двигатель работает при пониженном напряжении продолжительное время, происходит ускоренный износ изоляции из-за ее перегрева. А это приводит к снижению срока службы двигателя. Приблизительно срок службы изоляции T можно определить по формуле [6]:

$$T = \frac{T_{ном}}{R}, \quad (11)$$

где $T_{ном}$ – срок службы изоляции двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке, ч;

R – коэффициент, зависящий от значения и знака отклонения напряжения, а также от коэффициента загрузки двигателя [6].

Так как изменение срока службы двигателей при отклонениях напряжения, не превышающих $\pm 10\%$ от номинального, незначительно, то ущерб от сокращения срока службы не учитываем.

При изменении частоты вращения в самом двигателе незначительно изменяются только механические потери, но при работе двигателя в нерегулируемых электроприводах, может возникать дополнительный технологический ущерб, связанный с изменением производительности механизмов [7]

$$Y_{св} = 2Y_{уд} W s_{ном} \delta U, \quad (12)$$

где $Y_{уд}$ – удельный ущерб от отклонения напряжения, руб/(кВт·ч) [6];

W – энергия, потребляемая двигателем, кВт·ч;

$s_{ном}$ – номинальное скольжение электродвигателя, %;

δU – отклонение напряжения от номинального, кВ.

По вышеприведенной методике определим ущерб от отклонения напряжения для электродвигателя мощностью 2,2 кВт ($\eta = 83,0\%$, $\cos\phi = 0,87$, номинальное скольжение $s_{ном} = 5\%$) и электродвигателя мощностью 7,5 кВт ($\eta_{ном} = 87,5\%$, $\cos\phi = 0,88$, номинальное скольжение $s_{ном} = 3,5\%$). Предположим, что двигатели установлены в животноводческом комплексе по производству молока. Продолжительность работы составляет – 800 часов в год. По ранее произведенным расчетам [8] $Y_{уд} = 6,7$ руб/кВт·ч, тариф на электроэнергию $C_1 = 0,2$ руб/кВт·ч. Результаты расчета ущерба от отклонения напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ущерб при работе электродвигателей мощностью 2,2 кВт и 7,5 кВт на напряжении, отличном от номинального, в пределах $\pm 10\%$

$\delta U, \%$	-10	-5	+5	+10
$Y_{дв}, \text{руб/год}$	-117,30	-59,18	60,06	120,72
$Y_{дв}, \text{руб/год}$	-280,14	-141,17	144,20	289,57

Как показал расчет, с ростом мощности электродвигателя растут величины составляющих потерь электроэнергии. При этом ущерб от изменения потребления активной мощности увеличивается, как при положи-

тельных, так и отрицательных отклонениях напряжения. Ущерб от изменения потребления реактивной мощности увеличивается с ростом ее потребления и уменьшается со снижением ее потребления.

Заключение

1. При отклонении напряжения от номинального в асинхронных электродвигателях возникает ущерб от изменения потребления активной и реактивной мощности, от изменения срока службы изоляции и изменения частоты вращения. При работе в нерегулируемых электроприводах может возникать дополнительный технологический ущерб, связанный с изменением производительности механизмов.

2. С ростом мощности электродвигателя растут дополнительные потери энергии и величина дополнительного реактивного потребления, как следствие, возрастает ущерб от отклонения напряжения. Так, для двигателя мощностью 7,5 кВт при напряжении выше номинального на 10% общий ущерб составил 289,57 руб., в то время как для двигателя мощностью 2,2 кВт он был 120,72 руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144-2013. – М.: Стандартинформ, 2014.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика»/ А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург: Питер, 2010. – 350 с.
3. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
4. Перова, М.Б. Управление качеством сельского электроснабжения / М.Б. Перова, В.М. Санько; под ред. В.А. Воробьева. – Вологда: Легия, 1999. – 214 с.
5. Радкевич, В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пос. / В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова. – Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 589 с.
6. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – М.: Энергосервис, 2000. – 88 с.
7. Зельцбург, Л.М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л.М. Зельцбург. – М.: Высшая школа, 1973. – 272 с.
8. Королевич, Н.Г. Теоретические основы качества электроснабжения сельскохозяйственного производства и методология его повышения / Н.Г. Королевич, Г.И. Янукович. – Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 142 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.11.2019