

УДК 621.316.016.25

Р.В. Беляевский

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Наиболее распространенными электроприемниками на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели. Они составляют основную часть промышленной нагрузки, и на их долю приходится около 80 % всей потребляемой в промышленности электрической энергии [1]. При этом асинхронные двигатели являются также крупными потребителями реактивной мощности. Ими используется около 40 % реактивной мощности, потребляемой в промышленных электрических сетях. Именно режимы работы асинхронных двигателей зачастую оказывают существенное влияние на общую реактивную мощность, потребляемую промышленным предприятием, и, как следствие, на величину коэффициента реактивной мощности $tg\varphi$ промышленного предприятия, значение которого нормируется в [2] в зависимости от уровня номинального напряжения электрической сети. В связи с этим представляется целесообразным проанализировать потребление реактивной мощности асинхронными двигателями с тем, чтобы в дальнейшем выработать рекомендации по их рациональной эксплуатации, которые бы были направлены на естественное уменьшение реактивной мощности, потребляемой электродвигателями, и, в конечном итоге, на снижение величины $tg\varphi$ промышленного предприятия в целом.

В общем случае реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, складывается из двух составляющих: реактивной мощности намагничивания Q_0 , расходуемой на создание магнитного потока холостого хода, и реактивной мощности полей рассеяния Q_p и определяется по формуле:

$$Q_{АД} = Q_0 + Q_p = Q_0 + Q_{ном} k_3^2, \quad (1)$$

где $Q_{ном}$ – потери реактивной мощности в асинхронном двигателе на рассеяние при номинальной нагрузке, кВАр; $k_3 = P/P_{ном}$ – коэффициент загрузки асинхронного двигателя по активной мощности; P – активная мощность нагрузки асинхронного двигателя, кВт; $P_{ном}$ – номинальная мощность асинхронного двигателя, кВт.

Из формулы (1) следует, что реактивная мощность Q_0 не зависит от нагрузки, в то время как реактивная мощность Q_p изменяется пропорционально квадрату коэффициента загрузки асинхронного двигателя.

В [3] приводятся формулы для определения составляющих реактивной мощности Q_0 и Q_p , потребляемой асинхронным двигателем. На основании данных формул в результате ряда математических преобразований нами была получена формула для определения коэффициента реактивной

мощности асинхронного двигателя:

$$tg\varphi = \frac{\frac{I_0}{I_{ном}} R + \left(tg\varphi_{ном} - \frac{I_0}{I_{ном}} R \right) k_3^2}{\eta_{ном} k_3}; \quad (2)$$

$$R = \sqrt{1 + tg^2\varphi_{ном}}$$

где I_0 – ток холостого хода асинхронного двигателя, А; $I_{ном}$ – номинальный ток асинхронного двигателя, А; $tg\varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент реактивной мощности асинхронного двигателя; $\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя.

Из формулы (2) видно, что коэффициент реактивной мощности асинхронного двигателя зависит от величины его коэффициента загрузки. Поэтому в целях оценки влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление ими реактивной мощности были определены относительные значения тока холостого хода асинхронных двигателей, а затем в соответствии с формулой (2) значения их коэффициента реактивной мощности при различных значениях коэффициента загрузки k_3 в диапазоне от 0 до 1. Исходными данными для расчетов являлись каталожные данные электродвигателей, приведенные в [4, 5] и в каталогах заводов-изготовителей. Рассматривались асинхронные двигатели серий 4А и АИ основного исполнения номинальной мощностью 0,06–250 кВт с различной синхронной частотой вращения, получившие широкое распространение на промышленных предприятиях. По результатам расчетов для каждого из рассматриваемых электродвигателей были построены графики зависимости коэффициента реактивной мощности от коэффициента загрузки $tg\varphi = f(k_3)$.

Как показали расчеты, величина $tg\varphi$ асинхронных двигателей существенно зависит от относительного значения их тока холостого хода. В ходе анализа полученных результатов было установлено, что относительное значение тока холостого хода и величина $tg\varphi$ оказались примерно одинаковыми для групп асинхронных двигателей серии 4А с синхронной частотой вращения $n = 3000$ об/мин в диапазонах номинальных мощностей 0,09–0,25 кВт, 0,37–4 кВт, 5,5–45 кВт и 55–250 кВт и для асинхронных двигателей АИ с той же синхронной частотой вращения в диапазонах номинальных мощностей 0,09–0,25 кВт, 0,37–4 кВт, 5,5–45 кВт и 55–90 кВт. Это позволило аппроксимировать зависимости $tg\varphi = f(k_3)$ для дан-

ных групп асинхронных двигателей с использованием степенной аппроксимирующей функции. При этом коэффициент детерминации R^2 оказался близким к единице, что свидетельствует о высокой степени близости аппроксимации экспериментальных данных выбранной аппроксимирующей функцией. Аппроксимированные графики зависимости $tg\phi = f(k_3)$ для асинхронных двигателей серий 4А и АИ основного исполнения с синхронной частотой вращения $n = 3000$ об/мин приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Аналогичные расчеты были проведены для асинхронных двигателей серий 4А и АИ основного исполнения с синхронными частотами вращения $n = 1500; 1000; 750$ об/мин, и по результатам расчетов для данных электродвигателей также были построены аппроксимированные графики

зависимости $tg\phi = f(k_3)$.

Анализ графиков зависимости $tg\phi = f(k_3)$ показал, что загрузка асинхронных двигателей значительно влияет на потребление ими реактивной мощности. Данная зависимость проявляется в том, что с уменьшением коэффициента загрузки асинхронных двигателей значение их $tg\phi$, а, следовательно, и величина потребляемой ими реактивной мощности возрастают. При этом, как следует из графиков зависимости на рис. 1 и 2, существенное увеличение $tg\phi$ асинхронных двигателей наблюдается при загрузке их менее 40–45 % номинальной мощности. При уменьшении загрузки асинхронных двигателей менее 10 % номинальной мощности происходит резкое увеличение $tg\phi$ и реактивной мощности, потребляемой электродвигателями. При этом величина $tg\phi$ асинхронных

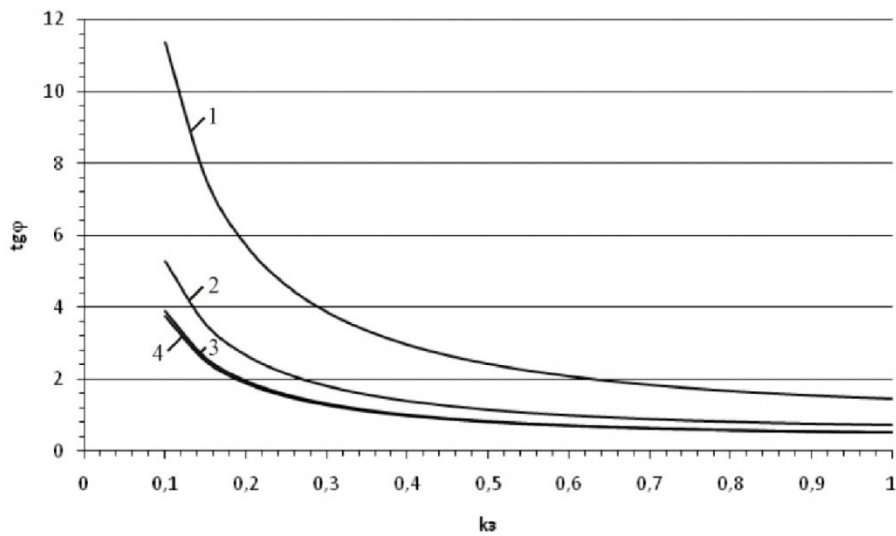


Рис. 1. Графики зависимости $tg\phi = f(k_3)$ для асинхронных двигателей серии 4А основного исполнения с синхронной частотой вращения $n = 3000$ об/мин: 1 – 0,09–0,25 кВт; 2 – 0,37–4 кВт; 3 – 5,5–45 кВт; 4 – 55–250 кВт

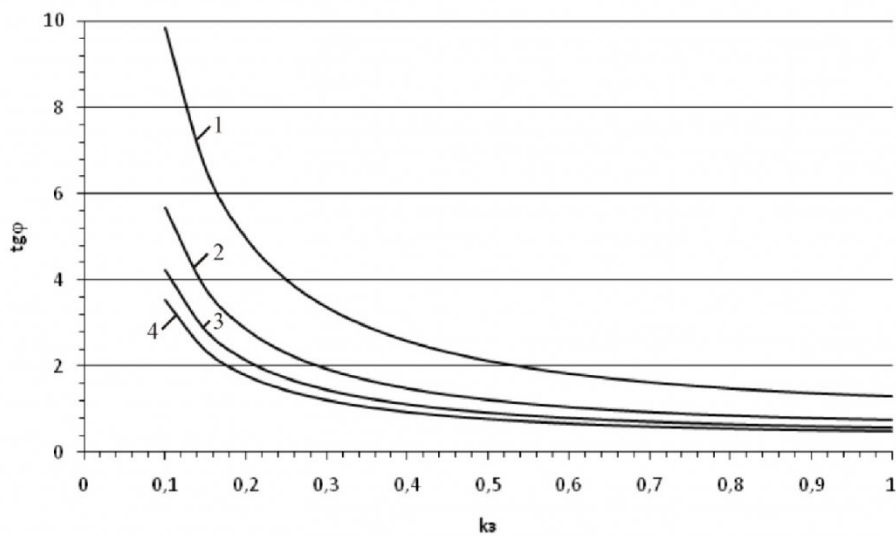


Рис. 2. Графики зависимости $tg\phi = f(k_3)$ для асинхронных двигателей серии АИ основного исполнения с синхронной частотой вращения $n = 3000$ об/мин: 1 – 0,09–0,25 кВт; 2 – 0,37–4 кВт; 3 – 5,5–45 кВт; 4 – 55–90 кВт

двигателей при малых нагрузках в несколько раз превышает нормируемое в [2] значение коэффициента реактивной мощности. На основании этого можно сделать вывод, что потребление реактивной мощности асинхронными двигателями зависит от их загрузки в значительно большей степени по сравнению с силовыми трансформаторами [6].

Из графиков рис. 1 и 2 нетрудно видеть, что значение коэффициента реактивной мощности асинхронных двигателей увеличивается также с уменьшением их номинальной мощности. Это обусловлено тем, что конструктивное исполнение асинхронных двигателей таково, что с уменьшением их номинальной мощности увеличивается относительная величина воздушного зазора и соответственно относительная величина потребляемой ими реактивной мощности.

Кроме того, сравнение графиков зависимости $tg\varphi = f(k_s)$ для асинхронных двигателей серий 4А и АИ позволило установить, что асинхронные двигатели серии 4А имеют более высокую величину коэффициента реактивной мощности по сравнению с асинхронными двигателями серии АИ (особенно это касается электродвигателей малой мощности). Это в значительной мере объясняется тем, что в асинхронных двигателях серии АИ при изготовлении магнитопроводов используется более качественная холоднокатаная электротехническая сталь. В результате этого снижаются потери в стали асинхронных двигателей, а вместе с тем и величина реактивной мощности намагничивания, потребляемой электродвигателями.

Таким образом, как показал анализ, коэффициент загрузки асинхронных двигателей оказывает значительное влияние на потребление ими реактивной мощности. Снижение коэффициента загрузки асинхронных двигателей приводит к увеличению их коэффициента реактивной мощности, что, в свою очередь, сказывается на увеличении $tg\varphi$ промышленного предприятия в целом. Следует отметить, что на сегодняшний день в условиях снижения объемов промышленного производства значительная доля реактивной мощности, потребляемой асинхронными двигателями на промышленных предприятиях, обусловлена их малой нагрузкой. Поэтому при проведении энергетических обследований (энергоаудита) промышленных предприятий, осуществляемых в соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» [7], необходимо проверять соответствие номинальной мощности асинхронных двигателей их мощности нагрузки. При систематической недогрузке асинхронных двигателей на промышленных предприятиях в первую очередь должны быть приняты меры по увеличению их загрузки путем рационализации технологического процесса и увеличения загрузки производственного оборудования.

Если после реализации данных мероприятий

номинальная мощность асинхронных двигателей остается существенно завышенной по отношению к их мощности нагрузки, то должна производиться замена малозагруженных асинхронных двигателей электродвигателями меньшей номинальной мощности. По опыту эксплуатации асинхронных двигателей считается, что если их средняя нагрузка составляет менее 45 % номинальной мощности, то замена асинхронных двигателей менее мощными является целесообразной. При нагрузке асинхронных двигателей более 70 % номинальной мощности можно считать, что замена в общем случае нецелесообразна. В том случае, если средняя нагрузка электродвигателей составляет 45–70 % номинальной мощности, то целесообразность их замены должна быть подтверждена технико-экономическим расчетом [3]. Анализ зависимости $tg\varphi = f(k_s)$ для асинхронных двигателей серий 4А и АИ подтверждает справедливость данных рекомендаций.

В случае невозможности замены малозагруженных асинхронных двигателей электродвигателями меньшей номинальной мощности целесообразным может оказаться снижение напряжения на их зажимах. Снижение напряжения, подводимого к обмоткам асинхронного двигателя, до определенного минимально допустимого значения приводит к уменьшению реактивной мощности, потребляемой электродвигателем, за счет уменьшения тока намагничивания. При этом одновременно снижаются потери активной мощности и, следовательно, увеличивается КПД электродвигателя. На практике известны следующие способы снижения напряжения у малозагруженных асинхронных двигателей: переключение статорной обмотки с треугольника на звезду; секционирование статорных обмоток; понижение напряжения в сетях, питающих асинхронные двигатели, путем переключения ответвлений цехового трансформатора.

К числу мероприятий, направленных на рационализацию работы асинхронных двигателей, можно также отнести ограничение длительности холостого хода. Если промежутки работы асинхронных двигателей на холостом ходу достаточно велики, то целесообразно на это время отключать электродвигатели от сети. Потребление активной и особенно реактивной мощности при этом значительно снижается.

Таким образом, проведение мероприятий по рационализации работы асинхронных двигателей на промышленных предприятиях должно быть направлено на естественное уменьшение величины потребляемой ими реактивной мощности, снижение $tg\varphi$ асинхронных двигателей и, тем самым, должно способствовать поддержанию нормируемых значений коэффициента реактивной мощности в промышленных электрических сетях и значительному повышению общей энергетической эффективности промпредприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников, А. И. Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях : Учебное пособие / А. И. Колесников, М. Н. Федоров, Ю. М. Варфоломеев. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 124 с.
2. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения) : утв. Приказом М-ва промышленности и энергетики Рос. Федерации № 49 от 22.02.2007 : введ. в действие с 20.04.2007.
3. Красник, В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электросетях предприятий. – М. : Энергия, 1975. – 112 с.
4. Справочник по электрическим машинам : В 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
5. Кацман, М. М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – М. : Академия, 2005. – 480 с.
6. Ефременко, В. М. Анализ влияния нагрузки силовых трансформаторов на потребление реактивной мощности / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2009. – № 6. – С. 46–48.
7. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Текст] : федер. закон : [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г. : одобр. Советом Федерации 18 ноября 2009 г.]. – (Актуальный закон).

□ Автор статьи:

Беляевский
Роман Владимирович
– ассистент каф. электроснабжения горных
и промышленных предприятий КузГТУ,
тел. 8 950 584 7672
E-mail: belaevsky@mail.ru

УДК 621.316.016.25

В.М. Ефременко, Р.В. Беляевский

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В настоящее время в связи с существенным снижением объемов промышленного производства на большинстве российских предприятий сложилась ситуация, при которой системы электроснабжения эксплуатируются не в номинальном режиме. При этом одной из основных проблем, которые имеют место в промышленных электрических сетях, на сегодняшний день является низкий уровень загрузки электрооборудования. Снижение уровня загрузки электрооборудования приводит к увеличению потерь электроэнергии в электрических сетях, к дополнительному непроизводительному расходу электрической энергии и, как следствие, к снижению энергетической эффективности технологических процессов и промышленного предприятия в целом.

В данных условиях на промышленных предприятиях значительно увеличилась доля потерь электроэнергии, обусловленная малой загрузкой силовых трансформаторов. При малых нагрузках потери электроэнергии в трансформаторах могут быть весьма существенными, так как при сниже-

нии коэффициента загрузки происходит увеличение потребляемой трансформаторами реактивной мощности намагничивания, которая расходуется ими на создание магнитного потока холостого хода. Влияние коэффициента загрузки силовых трансформаторов на потребление реактивной мощности подробно рассмотрено в [1, 2]. При этом установлено, что при снижении загрузки трансформаторов менее 30 % номинальной мощности наблюдается существенное повышение величины реактивной мощности, потребляемой силовыми трансформаторами. Это в свою очередь приводит к увеличению коэффициента реактивной мощности $tg\varphi$ промышленного предприятия, росту потерь электроэнергии в электрических сетях, увеличению затрат на электрическую энергию и др.

Для оценки влияния нагрузки силовых трансформаторов на потребление реактивной мощности и потери электроэнергии в электрических сетях был произведен анализ коэффициента загрузки силовых трансформаторов на одном из промыш-