

**А.В.ЕФИМОВСКИЙ**, соискатель, НТУ «ХПИ»  
**Ю.В. ВЛАДИМИРОВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»  
**Е.С. КОБЕЦ**, магистр, НТУ «ХПИ»

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ В РЕЖИМЕ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрен вопрос дополнительных потерь в синхронных двигателях обусловленных генерацией реактивной мощности при разных режимах работы и параметрах сети питания. В сводной таблице приведены области дополнительных потерь для разных моделей двигателей.

Розглянуто питання додаткових втрат в синхронних двигунах обумовлених генерацією реактивної потужності при різних режимах роботи і параметрах мережі живлення. У звідній таблиці приведені області додаткових втрат для різних моделей двигунів.

The question of additional losses is considered in synchronous engines conditioned by the generation of reactive-power at different office hours and parameters of feed-in network. In a summary table areas over of additional losses are brought for the different models of engines

**Постановка проблемы.** Одним из основных вопросов при рассмотрении использования синхронных двигателей (СД) для компенсации реактивной мощности (КРМ) является наличие дополнительных потерь активной мощности  $\Delta P$ , которые идут на выработку реактивной мощности (РМ). В общем случае эти потери являются функцией трёх величин [1]:

$$\Delta P = f(\alpha, \beta, U), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент загрузки СД по реактивной мощности,  $\beta$  – коэффициент загрузки СД по активной мощности и  $U$  – напряжение питания СД. Если коэффициент  $\beta$  и напряжение сети  $U$  являются величинами известными для конкретного предприятия, то коэффициент загрузки по реактивной мощности можно изменить посредством изменения тока возбуждения двигателя. Минимальный коэффициент  $\alpha$  выбирается исходя из условий статической и динамической устойчивости СД [2]. Как правило, при минимально возможном токе возбуждения (режим недовозбуждения) СД сам является потребителем РМ, т.е. ведёт себя как активно-индуктивная нагрузка. Это редкий и в большинстве случаев не востребуемый режим его работы. Поэтому при избытке РМ в узле нагрузки, СД выгодней переводить в режим работы с  $\cos\varphi=1$ , в котором потери в СД будут минимальны [3].

Располагаемая (максимальная) РМ генерируемая СД, определяется тепловым режимом СД с учётом форсировки возбуждения при

кратковременных снижениях напряжения [4]. На тепловой режим работы СД также влияют конструктивные особенности двигателя, материал изоляции обмоток, коэффициент загрузки по активной мощности  $\beta$  и напряжение сети. Поэтому для каждой модели СД максимальный коэффициент загрузки по РМ  $\alpha_m$  определяется опытным путём.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Во ВНИИЭ ещё в 1967 году была проведена работа по определению возможности генерирования РМ СД и предложена методика определения относительной величины располагаемой реактивной мощности  $\alpha_m$  и дополнительных потерь  $\Delta P$ . В литературе [4] приведена таблица усреднённых значений коэффициента  $\alpha_m$  для двигателей серий СДН, СТД, и СДЗ при различных коэффициентах  $\beta$  и напряжениях питания. Также представлена формула для определения дополнительных потерь, которая также приводится в других источниках [1, 5]:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{СДном}^2} \quad (2)$$

где  $D_1, D_2$  – коэффициенты, зависящие от мощности и КПД СД, имеющие размерность кВт. Для каждой марки двигателя они индивидуальны и являются справочными величинами. Хотелось бы отметить, что в литературе [6] представлена дополненная формула (2), которая выглядит следующим образом:

$$\Delta P = D_1 \cdot \frac{Q_{СД}}{Q_{СДном}} + D_2 \cdot \frac{Q_{СД}^2}{Q_{СДном}^2} + D_3 \quad (3)$$

где  $D_3$  – коэффициент учитывающий потери в самой системе возбуждения СД. Величина этого коэффициента составляет 5-25 % от суммы  $D_1$  и  $D_2$ . Так как сейчас большинство СД снабжены тиристорной системой возбуждения, которая имеет наиболее низкое потребление энергии, то при расчётах в данной статье коэффициент  $D_3$  был исключен.

**Цель статьи.** Для оценки эффективности использования синхронных двигателей в качестве источников реактивной мощности определить диапазон величин располагаемой реактивной мощности для разных типов синхронных двигателей при различных условиях их работы и параметрах питающей сети с учётом дополнительных потерь в них, обусловленных генерацией реактивной мощности.

**Основные материалы исследований.** На основании данных в литературе [1, 4] были произведены расчёты располагаемой реактивной мощности и дополнительных потерь  $\Delta P$  при различных коэффициентах загрузки  $\beta$  и напряжениях питания для двигателей серий СДН, СТД и СДЗ. Для оценки эффективности использования СД в качестве КРМ были определены удельные потери активной мощности на выработку реактивной имеющие размерность кВт/квар.

Все СД выпускаемые промышленностью можно разбить на три класса:

- двигатели напряжением 6, 10 кВ с частотами вращения от 100 до 1000 об/мин и номинальной мощностью от 400 до 10000 кВт (серия СДН).

- турбодвигатели напряжением 6, 10 кВ с частотой вращения 3000 об/мин и номинальной мощностью от 630 до 12500 кВт (серия СТД).

- двигатели напряжением 380 В с частотами вращения от 375 до 1000 об/мин номинальной мощностью от 160 до 400 кВт (серия СДЗ).

Двигатели напряжением 6 и 10 кВ серии СДН являются самым распространённым типом СД. Расчёты показали, для всех скоростей вращения можно однозначно утверждать, что чем мощнее двигатель, тем меньше относительные удельные потери  $P_{уд}$  (кВт/квар). Для примера на графике (рис. 1) приведены зависимости дополнительных удельных потерь двигателей напряжением питания 6 кВ и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту при номинальном напряжении питания.

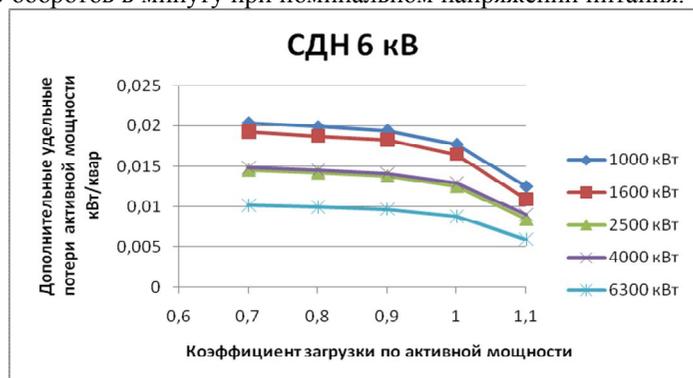


Рис. 1 – Зависимость дополнительных удельных потерь двигателей напряжением питания 6 кВ и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту при номинальном напряжении питания

Также из рисунка 1 можно сделать вывод, что при коэффициентах загрузки от 0,7 до 0,9 дополнительные удельные потери изменяются незначительно. Для двигателей со скоростью вращения ниже 1000 оборотов в минуту характер диаграммы остаётся такой же (рис. 2).

На рисунке 2 приведены зависимости дополнительных удельных потерь для двигателей номинальной мощностью 2500 кВт с разными скоростями вращения и номинальным напряжением питания, при этом из графика видно, чем меньше скорость вращения, тем выше дополнительные удельные потери активной мощности на выработку реактивной.

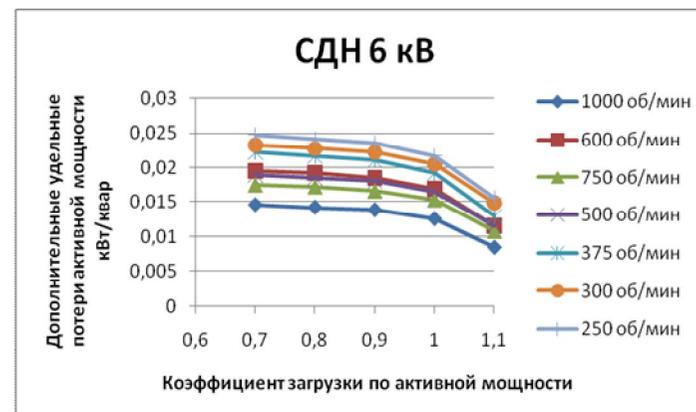


Рис. 2 – Зависимость дополнительных удельных потерь для двигателей номинальной мощностью 2500 кВт с разными скоростями вращения и номинальным напряжением питания

Так как вопросы компенсации реактивной мощности тесно взаимосвязаны с уровнем напряжения в сети, то представляет интерес рассмотреть, как изменяется располагаемая реактивная мощность и дополнительные удельные потери активной энергии при различных значениях питающего напряжения. В качестве примера на рисунках 3 и 4 представлены такие зависимости для двигателя СДН - 15-64-6 мощностью 2500 кВт и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту.

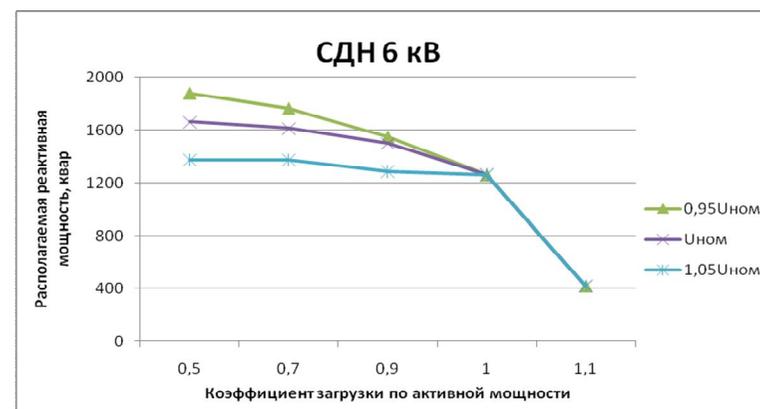


Рис. 3 – Зависимость располагаемой реактивной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СДН 6 кВ

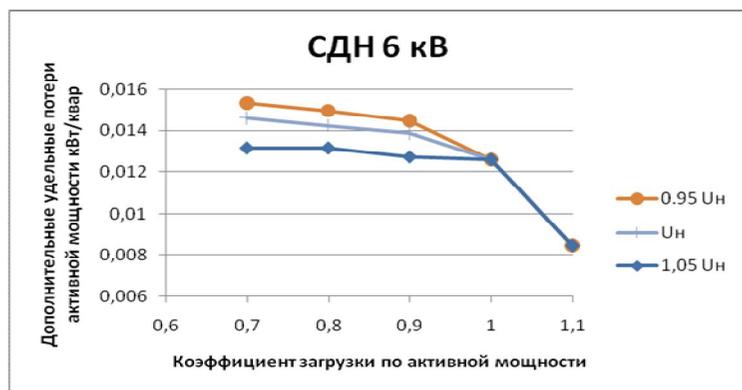


Рис. 4 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СДН 6 кВ

Как видно из диаграмм (рис. 3, 4), при снижении напряжения питания повышается располагаемая РМ СД, но при этом увеличиваются дополнительные удельные потери активной мощности.

При рассмотрении второй большой группы СД – турбодвигателей серии СТД напряжением 6, 10 кВ, исследования показали, что закономерности в части генерации реактивной мощности аналогичны двигателям серии СДН. Это подтверждается приведенными в качестве примера на рисунках 5 и 6 графиками зависимости удельных потерь активной мощности для двигателя СТД-2500-2 мощностью 2500 кВт.

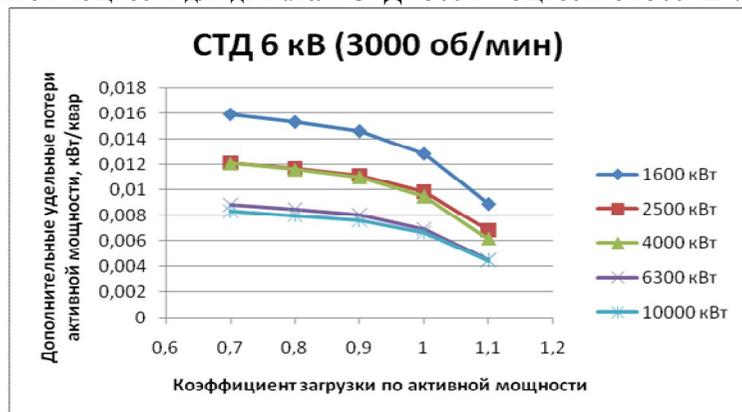


Рис. 5 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности для двигателя СТД 6 кВ

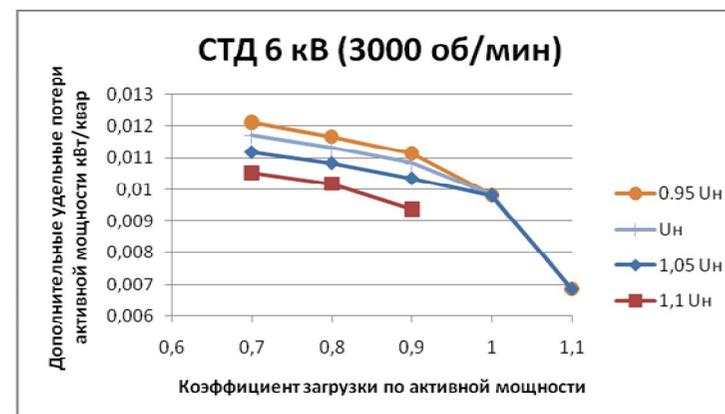


Рис. 6 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности при различных значениях питающего напряжения для двигателя СТД 6 кВ

Последняя самая немногочисленная группа - это двигатели напряжением 380 В. Как правило, их не используют в целях КРМ. В литературе [3, 7] даются рекомендации, что выгоднее переводить такие двигатели в режим работы с  $\cos\mu=1$ , т.е. минимизировать потери в самом СД. Из рисунка 7 видно, что действительно уровень удельных дополнительных потерь высок по сравнению с высоковольтными СД.

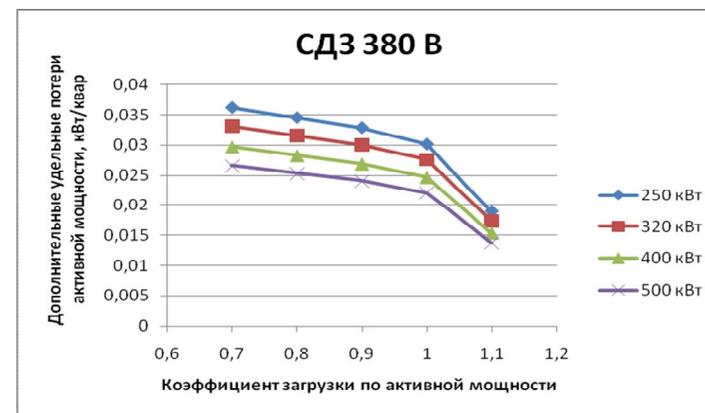


Рис. 7 – Зависимость дополнительных удельных потерь активной мощности и коэффициента загрузки по активной мощности для двигателя СДЗ 380 В

В таблице 1 представлены сводные данные по СД при номинальном напряжении питания.

Таблица 1 – Сводные данные по синхронным двигателям

Серия СД	Мощность СД, кВт	Скорость вращения, об/мин	Уровень удельных дополнительных потерь активной мощности при коэф. загрузки 0,7...1 и напряжениях питания 0,9Uн...Un, кВт/квар
СДН 6 (10) кВ	1000, 1600	250, 300	0,03-0,04
		375, 500	0,02-0,033
		600, 750	0,018-0,028
		1000	0,016-0,021
	2500, 4000	250, 300	0,016-0,025
		375, 500	0,013-0,023
		600, 750	0,012-0,02
		1000	0,012-0,015
	6300	500	0,011-0,015
		600, 750	0,01-0,011
1000		0,009-0,011	
СТД 6 (10) кВ	1000, 1600	3000	0,012-0,016
	2500, 4000	3000	0,01-0,012
	6300, 10000	3000	0,006-0,009

Проведенные исследования показывают, что хотя в ряде случаев удельные потери в СД, обусловленные генерацией РМ и соизмеримы с потерями в конденсаторных установках КРМ (см. табл. 1), однако при решении вопроса о целесообразности использования конкретного СД в качестве КРМ необходимо учитывать полные потери в СД, состоящие из механических, магнитных, электрических потерь и дополнительных потерь вызванных генерацией РМ.

Следует отметить также, что хотя величина удельных дополнительных потерь, обусловленных генерацией РМ, может изменяться в широких пределах в зависимости от типа двигателя, коэффициента загрузки по активной мощности, скорости вращения, напряжения питания, фактический диапазон этих изменений ограничен условиями эксплуатации конкретного СД. В частности, коэффициент загрузки СД по активной мощности для большинства случаев эксплуатации выбирается в диапазоне 0,7 – 0,8 и может быть изменен только на стадии проектирования электропривода, как и скорость вращения СД для конкретных условий эксплуатации. Располагаемая

(генерируемая) же РМ будет определяться необходимостью компенсации РМ конкретной нагрузки объекта электроснабжения.

**Выводы:** 1. Чем больше номинальная мощность и скорость вращения СД, тем ниже дополнительные удельные потери, при этом у двигателей мощностью 10000 и 12000 кВт величина удельных потерь приближается к уровню конденсаторных установок, поэтому использование СД серии СТД в качестве КРМ имеет приоритет.

2. В отличие от конденсаторных установок при снижении напряжения питания располагаемая реактивная мощность СД увеличивается при практически пропорциональном увеличении дополнительных удельных потерь активной мощности в СД.

3. Двигатели на напряжение 380 В в силу высокого уровня дополнительных активных потерь не привлекательны для целей компенсации реактивной мощности. Их выгоднее использовать в режиме с  $\cos\phi=1$ , при котором потери в них минимальны.

**Список литературы:** 1. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М. : Энергия, 1975. 2. Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами / Д.П. Петелин. – М. : Энергия, 1968 г. 3. Ипатенко Н. Р. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство  $\cos\mu=1$  / Н. Р. Ипатенко. Брянск, 1974. 4. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Том I. Электроснабжение / под ред. А. А. Фёдорова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. 5. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.: ил. 6. Абрамович Б. Н., Круглый А. А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей / Б. Н. Абрамович, А. А. Круглый. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. – 128 с. 7. Чиликин М. Г. Синхронные приводы / М. Г. Чиликин. – М. : Энергия, 1967. – 80 с.

Поступила в редколлегию 30.05.2011