

УДК 621.311.1:658.26

## Технико-экономическая оценка эффективности привлечения синхронных электродвигателей предприятий к генерации реактивной мощности

**А.Е. Веселов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич**

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН;  
Апатитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики*

**Аннотация.** Приводится методика расчета располагаемой реактивной мощности синхронных электродвигателей, дается оценка экономической целесообразности привлечения синхронных двигателей к генерации реактивной мощности. Рассмотрены результаты расчетов ожидаемых экономических эффектов при различных вариантах использования синхронных двигателей предприятий для компенсации реактивной мощности.

**Abstract.** Available reactive power calculation procedure of synchronous electric motors has been shown. Economic estimation of synchronous motors used for reactive power generation has been given. Calculation results of expected economic effects of different variants of enterprises' synchronous motors used for reactive power compensation have been considered.

### 1. Введение

Компенсация реактивной мощности нагрузки на крупных промышленных предприятиях приводит к разгрузке предвключенных питающих сетей от значительных перетоков реактивной мощности, что существенно снижает потери напряжения и улучшает качество электроэнергии в распределительных сетях. В качестве компенсирующих устройств целесообразно использовать конденсаторные батареи, которые являются наиболее экономичным источником реактивной мощности. Однако их применение на целом ряде предприятий Северо-западного региона России, таких, как комбинат "Североникель" (г. Мончегорск), является весьма проблематичным вследствие высокого содержания высших гармоник в питающем напряжении.

Целесообразно рассмотреть возможность использования компенсирующей способности синхронных электродвигателей, имеющихся на промышленных предприятиях, для генерации реактивной мощности в питающую электрическую сеть. В предлагаемой статье рассмотрена проблема привлечения крупных синхронных электродвигателей к решению проблемы компенсации реактивной мощности.

### 2. Располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей

В условиях работы с полной нагрузкой и при номинальном напряжении на зажимах синхронный двигатель (СД) характеризуется номинальными значениями активной мощности  $P_{СДн}$ , потерь активной мощности  $\Delta P_{СДн}$  и располагаемой реактивной мощностью  $Q_{СДн}$  (в режиме перевозбуждения), которую СД способны выдавать в сеть. Выпускаемые промышленностью СД рассчитаны, как минимум, на работу с "опережающим" значением коэффициента мощности  $\cos \varphi_{СДн} = 0,9$  ( $\operatorname{tg} \varphi_{СДн} = 0,484$ ), то есть, способны при номинальной активной нагрузке (коэффициент загрузки  $\beta = P_{СД} / P_{СДн} = 1,0$ ) генерировать в питающую сеть реактивную мощность:

$$Q_{СДн} = 0,484 \cdot P_{СД} / \eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия двигателя.

Применению СД для компенсации реактивной мощности (КРМ) посвящена обширная литература, в которой, в основном, исследовался вопрос об определении располагаемой реактивной мощности синхронного двигателя –  $Q_{СДрасп}$ , зависящей от типа и параметров СД, степени активной загрузки  $\beta$  и величины напряжения  $U$  на зажимах СД, которое, в общем случае, может быть больше или меньше номинального  $U_n$  (Сыромятников, 1963; Согомонян, 1967).

Значение коэффициента загрузки  $\beta$ , характеризующего относительную величину потребляемой СД активной мощности, может изменяться на практике от величины порядка 0,05 (режим, близкий к холостому ходу) до 1,1. Относительная величина реактивной мощности может измениться от (-0,6) – режим потребления реактивной мощности, до величины располагаемой реактивной мощности  $Q_{СДрасп}$  при рассматриваемых значениях  $\beta$  и напряжения  $U$  (Карпов, Солдаткина, 1970).

Отметим, что при ненормальной активной нагрузке СД ( $\beta < 1$ ) возможно даже некоторое увеличение выдачи реактивной мощности по сравнению со значением, рассчитанным по (1).

Упрощенная методика определения реактивной мощности, генерируемой СД, заключается в следующем: в "Указаниях по проектированию компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий" (Указания по проектированию..., 1986) оценены сочетания граничных значений таких параметров СД, как номинальная активная мощность и частота вращения, а также количество рабочих смен, характеризующих график нагрузки СД, при превышении которых целесообразно полностью использовать реактивную мощность СД, определяемую по формуле:

$$Q_{СДрасп} = \alpha_m \cdot S_{СДн} = \alpha_m \cdot \sqrt{P_{СДн}^2 + Q_{СДн}^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент допустимой нагрузки СД, зависящий от  $\beta$  (Указания по проектированию..., 1986),  $S_{СДн}$  – полная номинальная мощность синхронного двигателя.

От синхронных двигателей, не рекомендованных для привлечения к КРМ по экономическим соображениям, может быть, тем не менее, выдана реактивная мощность:

$$Q_{СД} = P_{СДн} \cdot \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi_{СДн} < Q_{СДн}. \quad (3)$$

Более точные результаты по оценке выдачи активной мощности от СД могут быть получены в случаях, когда известны его параметры из заводского формуляра. Строгая методика расчета базируется на соотношениях, вытекающих из уравнений Парка – Горева применительно к установившемуся режиму работы СД (Горев, 1950).

Расчетные формулы отличаются для неявнополюсных СД, имеющих одинаковые синхронные реактивные сопротивления по продольной  $X_d$  и поперечной  $X_q$  осям, и явнополюсных, для которых  $X_d$  не равно  $X_q$ . К первому типу относятся все СД, которые имеют одну пару полюсов на роторе ( $n = 3000$  об/мин). Ко второму типу относятся СД со скоростью вращения 1500 об/мин и менее.

Приведем расчетные формулы для оценки выдаваемой реактивной мощности синхронного двигателя. Из векторной диаграммы, соответствующей уравнениям Парка – Горева для синхронной машины, следуют нижеприведенные формулы для нахождения  $Q_{СДрасп}$ :

1) для неявнополюсных синхронных двигателей

$$\frac{Q'_{СДрасп}}{S_{СДн}} = -\frac{(U/U_H)^2}{X_d} + \sqrt{\frac{C \cdot (U/U_H)^2}{X_d^2} - \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_{СДн}}; \quad (4)$$

$$\frac{Q''_{СДрасп}}{S_{СДн}} = \sqrt{(U/U_H)^2 - \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_{СДн}}; \quad (5)$$

$$Q_{СДрасп} = \min \left\{ \begin{array}{l} Q'_{СДрасп} \\ Q''_{СДрасп} \end{array} \right., \quad (6)$$

где  $Q'_{СДрасп}$  – располагаемая мощность, рассчитанная из условия поддержания тока возбуждения СД на предельно допустимом уровне;  $Q''_{СДрасп}$  – располагаемая мощность, рассчитанная из условия поддержания тока статора СД на номинальном уровне;

$$C = 1 + 2 \cdot X_d \cdot \sin \varphi_{СДн} + X_d^2.$$

Формула (6) показывает, что в качестве располагаемой мощности СД следует принять наименьшее из значений, рассчитанных по (4) и (5).

2) для явнополюсных синхронных двигателей:

$$\frac{Q_{СДрасп}}{S_{СДн}} = \frac{-2 \cdot \left[ X_q + \frac{C \cdot (X_d - X_q)}{U/U_H} \right] + \sqrt{2 \cdot \left[ X_q + \frac{C \cdot (X_d - X_q)}{U/U_H} \right]^2 - 4 \cdot \left[ \frac{X_q^2 - (X_d - X_q)^2}{(U/U_H)^2} \right]}}{2 \cdot \frac{X_q^2 - (X_d - X_q)^2}{(U/U_H)^2}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(U/U_H)^2 - C^2 + X_q^2 \cdot \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_{СДн}}{(U/U_H)^2}}; \quad (7)$$

$$\frac{Q''_{СДрасп}}{S_{СДн}} = \sqrt{\left( \frac{U}{U_H} \right)^2 - \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_{СДн}}; \quad (8)$$

$$Q_{СДрасп} = \min \left\{ \begin{array}{l} Q_{СДрасп}^I, \\ Q_{СДрасп}^{II} \end{array} \right. , \quad (9)$$

где  $Q_{СДрасп}^I$  и  $Q_{СДрасп}^{II}$  рассчитаны для тех же условий работы, что и для неявнополусных синхронных двигателей;

$$C = \sqrt{1 + 2X_q \cdot \sin \varphi_H + X_q^2} + \sin \varphi_H (X_d - X_q).$$

В качестве рассматриваемой мощности здесь также следует принять наименьшее из значений  $Q_{СДрасп}$ , определенных по (7) и (8).

### 3. Критерий привлечения синхронных двигателей для генерации реактивной мощности

Основным критерием для выбора рационального режима возбуждения СД и, соответственно, решения вопроса об использовании его располагаемой реактивной мощности являются дополнительные активные потери на генерацию реактивной мощности  $\Delta P_Q$ , которые могут быть определены по следующей расчетной формуле:

$$\Delta P_Q = (D_1 \cdot Q_{СД} / Q_{СДн} + D_2 \cdot Q_{СД}^2 / Q_{СДн}^2), \text{ кВт}, \quad (10)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – расчетные величины, зависящие от параметров конкретного двигателя, кВт. В литературе имеются данные по значениям  $D_1$  и  $D_2$  только для ограниченного круга двигателей. Они приводятся, например, в (Карпов, Солдаткина, 1970; Справочник по электроснабжению..., 1986).

Формула (10) характеризует функциональную связь потерь с величиной реактивной мощности и ее квадратом, что отражает реальную зависимость активных потерь в статоре и роторе СД при приращении выдаваемой реактивной мощности.

Более наглядной является запись формулы (10) в виде удельных потерь в СД при выработке реактивной мощности:

$$\Delta P_Q / Q_{СД} [\text{кВт/кВАр}] = D_1 / Q_{СДн} + (D_2 / Q_{СДн}) \cdot (Q_{СД} / Q_{СДн}). \quad (11)$$

Как видно,  $\Delta P_Q / Q_{СД}$  изменяется в зависимости от величины относительной загрузки по реактивной мощности  $Q_{СД} / Q_{СДн}$ .

Следует помнить, что СД не является таким же экономичным источником реактивной мощности, как конденсаторная батарея, имеющая относительные потери активной мощности порядка 0,002 кВт/квар или 0,2 % и менее. Потери активной мощности на генерацию реактивной мощности синхронным двигателем  $\Delta P_Q / Q_{СД}$  существенно зависят от его номинальных параметров и числа оборотов. Так, например, для двигателей серии СДН напряжением 6 кВ потери при их номинальной нагрузке находятся в пределах (0,9-5,4)% (Справочник по электроснабжению..., 1986). Из приведенных в (Справочник по электроснабжению..., 1986) зависимостей для различных СД следует, что чем ниже номинальная мощность и число оборотов СД, тем выше потери  $\Delta P_Q$  в двигателе на генерацию реактивной мощности.

Так, для быстроходных мощных СД при  $Q_{СД} = Q_{СДн}$  характерны соотношения  $\Delta P_Q / Q_{СД} < 1,5$  %. Для явнополусных двигателей ( $n < 3000$  об/мин), в особенности малой мощности  $P_{СДн} < 1000$  кВт, характерно  $\Delta P_Q / Q_{СД} > 1,5$  %.

### 4. Техничко-экономическая оценка использования синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности

Рассмотрим применение вышеописанной методики для оценки целесообразности привлечения СД к решению проблемы КРМ на примере одного из промышленных предприятий Северо-запада России. Приведем общие сведения об имеющихся в системе электроснабжения предприятия высоковольтных СД, которые можно привлекать для выдачи в сеть реактивной мощности. Остановимся более подробно на вопросах использования располагаемой реактивной мощности этих СД.

Отметим, что в настоящее время в режиме выдачи в сеть реактивной мощности СД предприятия не работают ( $\cos \varphi = 1,0$ ).

Расчеты располагаемой реактивной мощности  $Q_{СДрасп}$  высоковольтных СД завода по методике, изложенной выше, дали следующие результаты. При суммарной установленной мощности СД порядка 44,8 МВт величина располагаемой реактивной мощности  $Q_{СДрасп}$  может достигать значения 17,4 Мвар. В расчетах коэффициент активной нагрузки СД был принят равным типовому усредненному значению  $\beta = 0,8$ , напряжение на зажимах СД принято равным номинальному  $U = U_n$ .

Однако использование компенсирующей способности СД предприятия связано с определенными издержками на оплату дополнительных потерь активной мощности в СД –  $\Delta P_{СД}$  при генерации ими реактивной мощности. Расчеты показали, что для большинства СД предприятия, имеющих малые номинальные мощности ( $P_n < 600$  кВт) и малооборотных ( $n < 1000$  об/мин), величина относительных

потерь активной мощности  $\Delta P_{СД}$  (по отношению к  $Q_{СДрасп}$ ) превышает значение 2 %.

Целесообразно рекомендовать для привлечения к генерации реактивной мощности достаточно мощные и высокооборотные синхронные двигатели предприятия. Их перечень приведен в таблице. Величина  $Q_{СДрасп}$  этих двигателей составляет порядка 6,8 Мвар при относительно малых потерях  $\Delta P_{СД} = 1,3$  %.

Таблица. Располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей 6 кВ

№ п/п	РТП*	Число и мощность СД, кВт	n, об/мин	$Q_{СДрасп}$ , квар	$D_1$ , кВт	$D_2$ , кВт	$\Delta P_{СД}$ , кВт	$\Delta P_{СД}$ , %
1	125	3×630	3000	731,8	2,02	3,25	11,1	1,5
2	56	2×3500	3000	2710,4	8,2	7,8	23,1	0,9
3	27	1×1000	375	387,2	6,73	4,92	8,53	2,2
4	27	3×200 0	375	2323,2	8,25	7,2	33,6	1,45
5	27	1×1600	375	619,5	7,32	6,74	10,2	1,64
Итого по предприятию				6,772 Мвар			86,5	1,27

\* – распределительная трансформаторная подстанция.

Приведем пояснения расчетов  $Q_{СДрасп}$  и  $\Delta P_{СД}$ , представленных в таблице, на примере СД-1000. Для него располагаемая реактивная мощность определена по формуле

$$Q_{СДрасп} = 1000 \cdot 0,8 \cdot 0,484 = 387,2 \text{ квар.}$$

При известных значениях  $D_1$  и  $D_2$  определяется величина дополнительных активных потерь:

$$\Delta P_{СД} = D_1 \cdot (Q_{СДрасп}/Q_{СДн}) + D_2 \cdot (Q_{СДрасп}/Q_{СДн})^2 = 6,73 \cdot 387,2/484 + 4,92 \cdot (387,2/484)^2 = 8,53 \text{ кВт}$$

и в относительных единицах:

$$\Delta P_{СД}/Q_{СДрасп} = 8,53 \cdot 387,2 \cdot 100 \% = 2,2 \%$$

Аналогично определялись и значения расчетных параметров других СД.

Следует отметить, что расчеты  $Q_{СДрасп}$ , выполненные по формулам (4-9), дают результаты, практически совпадающие с расчетами  $Q_{СДрасп}$  по формуле (3). Таким образом, суммарная величина  $Q_{СДрасп}$  рассматриваемых двигателей составляет порядка 6,7 Мвар при относительно малых потерях  $\Delta P_{СД} = 1,27$  %.

Итак, от высоковольтных синхронных двигателей предприятия теоретически может быть выдана реактивная мощность порядка 6,7 МВАр. При работе этих СД в режиме перевозбуждения только в часы максимума нагрузки энергосистемы (например, 4 часа в сутки) будет на 6,7 Мвар снижено максимальное потребление реактивной мощности, а потребление энергии от энергосистемы уменьшено на:

$$\Delta W_{Q\Sigma} = Q_{СД\Sigma} \cdot T_{вкл}^{сд} = 6,7 \cdot 4 \cdot 365 = 9,78 \text{ млн квар}\cdot\text{ч.},$$

где  $Q_{СД\Sigma}$  – располагаемая реактивная мощность привлекаемых к КРМ синхронных двигателей, Мвар;  $T_{вкл}^{сд}$  – годовое число часов включения синхронных двигателей, час.

Как известно, в 1994 г. в связи с вводом в действие новой "Инструкции о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию", утвержденной Комитетом РФ по политике цен и Минтопэнерго России 30.11.93 г. и "Правил применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии", утвержденных Главгосэнергонадзором 29.12.93 г., Энергонадзор направил всем предприятиям новое приложение от 01.07.94 г. к действующим договорам на пользование электроэнергией.

В соответствии с ним расчеты за потребление реактивной мощности и энергии производились ежемесячно в виде надбавок к тарифам на электрическую энергию в размере 8 % – за 1 квар максимальной реактивной нагрузки и 1 квар·ч реактивной энергии, потребляемой сверх экономических значений и 12 % – за генерацию реактивной энергии в сеть. За потребление реактивной мощности и энергии в пределах экономических значений, т.е. при  $Q < Q_{\Sigma}$  и  $W_Q < W_{Q\Sigma}$ , указанных в договоре, расчеты было предписано не производить.

Однако в течение последних лет и в настоящее время показатели потребления реактивной мощности и энергии предприятиям со стороны энергосистем не устанавливались, что, в свою очередь, привело к отсутствию должного внимания к проблеме КРМ в распределительных электрических сетях 0,4 кВ и 6-10 кВ промышленных предприятий.

В то же время в связи с ростом экономики регионов и увеличением потребляемых мощностей руководством энергосистем и их подразделений все более активно высказывается мнение о целесообразности возврата к прежней схеме достаточно "жестких" заданий предприятиям по потреблению реактивной мощности и энергии. Это, в свою очередь, должно заставить предприятие использовать в своих распределительных сетях все возможные технические средства компенсации реактивной мощности, в первую очередь, малозатратные. К их числу следует отнести использование компенсирующей способности имеющихся на предприятиях синхронных двигателей.

Проведем технико-экономическую оценку эффективности привлечения СД к КРМ для вышерассмотренного примера в случае наличия заданий со стороны энергосистем показателей потребления реактивной мощности  $Q_{\Sigma}$  и энергии  $W_{Q_{\Sigma}}$ .

При этом сразу же встает вопрос, не выгоднее ли заплатить энергосистеме за реактивную мощность и энергию, чем платить по более высокому тарифу за дополнительные активные потери в синхронных двигателях. Для ответа следует сопоставить годовые затраты на оплату активных потерь  $\Delta P_{СД}$  с годовым эффектом, заключающимся в уменьшении платы за реактивные составляющие мощности и энергии.

Годовые затраты на покрытие дополнительных активных потерь можно оценить по выражению:

$$Z^{cd}_{ном\Sigma} = b_p \cdot \Delta P_{СД} \cdot T^{cd}_{вкл},$$

где  $b_p$  – дополнительная ставка тарифа оплаты активной энергии, руб./кВт·ч;  $\Delta P_{СД}$  – величина активных потерь в синхронном двигателе, кВт.

Уменьшение годовых затрат на оплату потребляемой реактивной энергии из сети энергосистемы:

$$\Delta \Pi^{cd}_Q = b_Q \cdot \Delta W_{Q_{\Sigma}},$$

где  $b_Q$  – ставка тарифа оплаты реактивной энергии, руб./квар·ч.

Как показала практика, большинство предприятий в условиях "жестких" заданий по реактивным показателям будет работать с превышением договорных показателей в случае неприятия мер по компенсации реактивной мощности. Таким образом, можно принять, что  $b_Q = 0,08 \cdot b_p$ . Величина  $\Delta W_{Q_{\Sigma}}$  представляет собой значение реального превышения потребления реактивной энергии над заданным  $W_{Q_{\Sigma}}$ .

Приведем результаты расчетов экономических эффектов для различных вариантов использования компенсирующей способности предприятия. Из таблицы имеем:

- располагаемая минимальная реактивная мощность вышеуказанных СД:  $Q_{СДрасч} = 6,7$  Мвар;
- активные потери в этих синхронных двигателях:  $\Delta P_{СД} = 86,5$  кВт.

Если привлечь эти СД к генерации реактивной энергии 4 часа в сутки (как отмечалось выше), то они выработают:

$$\Delta W_Q = Q_{СДрасч} \cdot T^{cd}_{вкл} = 6,7 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 365 = 9,8 \text{ млн квар}\cdot\text{ч.}$$

При этом при существующих тарифах оплаты:

$$b_p = 0,1588 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч}; b_Q = 0,0127 \text{ руб./квар}\cdot\text{ч.}$$

(данные были получены в отделе главного энергетика завода), годовые затраты на покрытие дополнительных активных потерь составят:

$$Z^{cd}_{ном\Sigma} = b_p \cdot \Delta P_{СД} \cdot T_{вкл} = 0,1588 \cdot 86,5 \cdot 4 \cdot 365 = 20,05 \text{ тыс. руб.}$$

Уменьшение годовых затрат на оплату потребляемой реактивной энергии из сети энергосистемы:

$$\Delta \Pi^{cd}_Q = b_Q \cdot \Delta W_Q = 0,0127 \cdot 9,8 \cdot 10^6 = 124,46 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, выработка реактивной энергии от СД только в часы максимума энергосистемы (4 часа в сутки) позволит не только облегчить выполнение условий ДПЭ по экономическим значениям  $Q_{\Sigma}$  и  $W_{Q_{\Sigma}}$ , но и получить экономический эффект в размере:

$$\mathcal{E}_{год} = \Delta \Pi^{cd}_Q - Z^{cd}_{ном\Sigma} = 124,46 - 20,05 = 104,41 \text{ тыс. руб. в год.}$$

В случае, если часы максимума составляют 5 часов в сутки (как на рассматриваемом заводе с 8 до 10 утра и с 16<sup>30</sup> до 19<sup>30</sup> вечера), то, соответственно, имеем:

$$\begin{aligned} \Delta W_Q &= 6,7 \cdot 5 \cdot 365 = 12,23 \text{ млн квар}\cdot\text{ч}; \\ Z^{cd}_{ном\Sigma} &= 0,1588 \cdot 86,5 \cdot 5 \cdot 365 = 25,07 \text{ тыс. руб.}; \\ \Delta \Pi^{cd}_Q &= 0,0127 \cdot 12,23 \cdot 10^6 = 155,32 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = 155,32 - 25,07 = 130,25 \text{ тыс. руб.}$$

Привлекая эти синхронные двигатели к генерации реактивной энергии практически круглосуточно (не менее 8700 час в год), суммарная выработка  $\Delta W_Q$  составит:

$$\Delta W_Q = 6,7 \cdot 8700 = 58 \text{ млн квар}\cdot\text{ч.}$$

При этом имеем:

$$Z_{\text{ном}\Sigma}^{\text{сд}} = 0,1588 \cdot 86,5 \cdot 8700 = 119,5 \text{ тыс. руб.}; \Delta P^{\text{сд}}_Q = 0,0127 \cdot 58 \cdot 10^6 = 1,57 \text{ млн руб.}$$

Годовой экономический эффект составит величину:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = 1,57 - 0,119 = 1,45 \text{ млн руб. в год.}$$

Аналогичные расчеты могут быть приведены также для новых тарифов.

Привлечение СД к генерации реактивной мощности требует проведения относительно несложных организационно-технических мероприятий, включающих некоторые добавления в схемы регуляторов систем возбуждения СД. Необходима схема дистанционного изменения тока возбуждения СД, причем эти изменения могут проводиться персоналом вручную или автоматически при установке контактных часов для гарантированной выдачи  $Q_{\text{СД}}$  в часы максимума энергосистемы.

Полученные в данном разделе результаты об эффективности привлечения СД к КРМ несколько противоречат сложившимся ранее представлениям по этому вопросу.

Это обусловлено следующими обстоятельствами. В литературе и нормативно-технических документах Энергонадзора экономичность генерирования от СД реактивной мощности обосновывалась снижением результирующих активных потерь мощности как в самом СД, так и, главное, в питающей сети из-за ее разгрузки от реактивных токов. В теории КРМ затраты на оплату реактивной мощности и энергии не учитывались.

В рассмотренном подходе к определению эффективности СД учитывается, что ущербы в питающей сети из-за повышенных потерь уже косвенно отражены в тарифах оплаты энергии, а эффект для предприятия выражается величиной конкретного изменения оплаты электроэнергии после внедрения мероприятий по КРМ.

Отметим также, что рассматриваемый эффект во многом зависит от политики ценообразования, вернее от соотношения цен на активную и реактивную составляющие энергии. При существующей тенденции заметного увеличения платы за реактивную энергию, эффективность привлечения СД к генерации реактивной мощности значительно возрастает.

## 5. Заключение

Привлечение мощных синхронных электродвигателей для компенсации реактивной мощности позволит решить проблему разгрузки питающей сети промышленных предприятий и существенно улучшить качество электроэнергии. Это техническое мероприятие является малозатратным и связано с несложными усовершенствованиями в схеме регулирования возбуждения двигателей. Приведенные в статье результаты технико-экономических расчетов показали, что при использовании компенсирующей способности синхронных двигателей возможно получение существенных экономических эффектов.

## Литература

- Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М., Госэнергоиздат, 435 с., 1950.
- Карпов Ф.Ф., Солдаткина А.А. Регулирование напряжения в электрических сетях промышленных предприятий. М., Энергия, 224 с., 1970.
- Согомонян С.В. Располагаемая реактивная мощность синхронного двигателя при различных режимах его работы. Труды ВНИИЭ, вып. 30, с.45-47, 1967.
- Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2-х т. Т.1. Электрооборудование. Под общ. ред. А.А. Федорова. М., Энергоиздат, 568 с., 1986.
- Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М., Госэнергоиздат, 528 с., 1963.
- Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электросетях промышленных предприятий. М., Госэнергоиздат, 64 с., 1986.