

# Технико-экономические аспекты компенсации реактивной мощности

В.И.Бабич, к.т.н.

Энерготехническая компания «Джоуль»

Подавляющее большинство потребителей в промышленности, как, впрочем, и в быту, имеют активно-индуктивный характер, при котором в трансформаторах, кабелях и прочих элементах электросети протекает дополнительный реактивный ток, не совершающий полезной работы. Это относится к электродвигателям, индукционным и дуговым печам, люминесцентным лампам, источникам питания электронных устройств и т.д. Реактивный ток порождает множество негативных факторов, приводящих к дополнительным затратам на эксплуатацию электросетей и потребителей. В этой статье сделана попытка выявить основные из этих факторов и дать им количественную оценку, которая позволит подтвердить или опровергнуть эффективность применения конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности в практических ситуациях.

На Рис. 1 изображена эквивалентная схема подключения группы потребителей, имеющих индуктивную составляющую нагрузки, к трансформатору посредством отдельного фидера. Все потребители представлены параллельным соединением активного сопротивления  $R_H$  и индуктивности  $L_H$  в прямоугольнике «Нагрузка». Все остальные резистивные элементы цепи (активное сопротивление обмотки трансформатора, кабеля, коммутационной аппаратуры, переходные контактные сопротивления и пр.) представлены сопротивлением потерь  $R_{\Pi}$ .

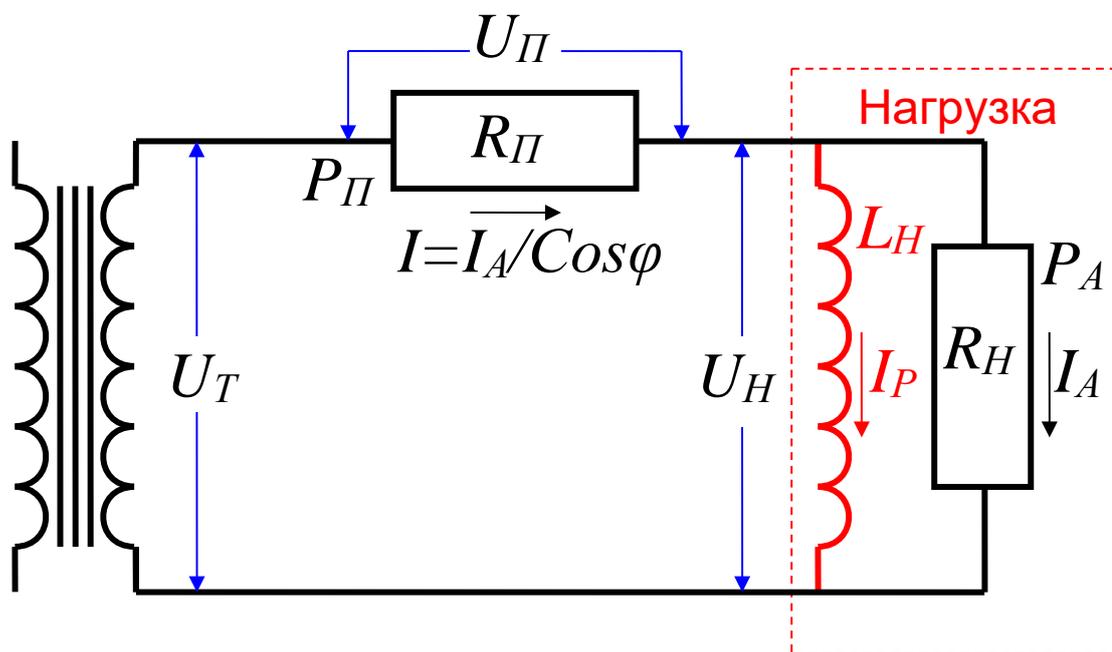


Рис. 1 Схема замещения цепи в случае присоединения к электросети нагрузки активно-индуктивного характера.

Рассмотрим некоторые технические факторы, обусловленные присутствием реактивной мощности и оказывающие негативное влияние на эффективность использования электроэнергии, и оценим экономический ущерб от каждого из этих факторов, который можно избежать с помощью применения конденсаторных установок. Сравнение этого ущерба со стоимостью конденсаторной установки и будет являться критерием её эффективности.

## Источники экономии при использовании УКРМ

### 1. Снижение потерь активной энергии в электросети

При наличии реактивной (индуктивной) нагрузки суммарный ток по всем проводникам электрической цепи возрастает:

$$I = I_A / \cos\varphi ,$$

где  $I$  – суммарный ток,  $I_A$  – активный ток нагрузки. Поскольку потери энергии на нагрев проводников в сети пропорциональны квадрату протекающего по ней тока, то величина потерь при наличии индуктивной нагрузки подчиняется такой зависимости:

$$P_{\Pi} = P_{ПА} / \cos^2\varphi ,$$

где  $P_{\Pi}$  – мощность потерь при наличии реактивной нагрузки, а  $P_{ПА}$  – мощность потерь при её отсутствии, т.е. при  $\cos\varphi = 1$ . Тогда снижение потерь в результате полной компенсации реактивной мощности составит

$$\Delta P_{\Pi} = P_{\Pi} - P_{ПА} = P_{ПА} (\cos^2\varphi - 1) .$$

Выразим потери мощности в электросети через активную мощность

$$P_{ПА} = K_{\Pi} P_A ,$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент потерь, составляющий обычно 2-4%. Тогда снижение потерь при компенсации реактивной мощности составит

$$\Delta P_{\Pi} = K_{\Pi} P_A (\cos^2\varphi - 1) .$$

Приведём пример. Возьмём среднее значение коэффициента потерь  $K_{\Pi}=3\%$ . Примем также средний  $\cos\varphi=0,7$  для нагрузки, состоящей из асинхронных двигателей небольшой мощности (насосная станция). Пусть суммарная мощность насосной составляет  $P_A=200$  кВт. Тогда  $\Delta P_{\Pi}=6,24$  кВт или 3,12% от активной мощности нагрузки. При круглосуточной работе двигателей годовая экономия составит 53 913 кВт.ч., или 215 652 рублей при тарифе 4 руб./кВт.ч<sup>1</sup>.

Для полной компенсации реактивной мощности на нагрузке 200 кВт с начальным  $\cos\varphi = 0,7$  понадобится конденсаторная установка мощностью 204 квар. Цена ближайшей по характеристикам УКРМ 04/3-225/25 из типового ряда ЭТК «Джоуль» равна 141 900 рублей. Таким образом, УКРМ окупится примерно за 8 месяцев за счёт снижения потерь мощности на нагрев проводников электросети.

### 2. Снижение напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Возвращаясь к эквивалентной схеме на Рис. 1, можно отметить ещё один негативный фактор, вызываемый реактивной нагрузкой. Увеличение тока в сети вызывает дополнительные потери потенциала в кабеле  $U_{\Pi}$  и, как следствие, падение напряжения на нагрузке  $U_H$ . Для сохранения номинального напряжения  $U_H$  приходится увеличивать выходное напряжение трансформатора  $U_T$ , что приводит к росту потерь в железе трансформатора (так называемых потерь холостого хода). Кроме того, если к трансформатору в непосредственной близости от него подключены другие потребители, они вынуждены работать при повышенном напряжении  $U_T$ , а это приводит к дополнительным потерям электроэнергии на питание этих потребителей.

Расчёт потерь из-за увеличения выходного напряжения трансформатора нетрудно провести для каждой конкретной схемы сети. Такие расчёты показывают, что в некоторых случаях

---

1 Для гарантии обоснованности экономических выводов здесь и далее в расчётах принимаем заведомо низкий тариф для промышленных предприятий большинства регионов РФ в 2020 году.

потери могут составить несколько процентов, т.е. величину, сопоставимую с рассмотренными выше потерями на нагрев проводников реактивными токами.

### **3. *Снижение износа элементов электросети и потребителей за счёт уменьшения реактивного тока и напряжения трансформатора***

Оба фактора, рассмотренные в пп 1 и 2 чреватые не только ростом платы за электроэнергию, но и другими расходами, которые нередко могут перекрыть эту плату в несколько раз. Поскольку реактивный ток вызывает нагрев кабеля и трансформатора, рабочий ресурс этих элементов сокращается. Известно, что повышение температуры трансформатора на 10°C сокращает его ресурс вдвое. То же самое происходит и с кабелями, выключателями и прочими элементами электросети.

Кроме того, работа потребителей на повышенном напряжении (см. п.2) приводит к преждевременному выходу из строя этих потребителей. Как следствие – частая замена ламп, ремонт электродвигателей, нагревательных приборов и т.д.

Рост эксплуатационных расходов подобного рода не сразу связывают с наличием реактивной мощности, но при детальном анализе причин выхода из строя того или иного оборудования такая связь очевидно обнаруживается.

### **4. *Снижение капитальных затрат на дополнительную мощность потребителей***

В случае расширения производства очень часто возникает вопрос увеличения мощности потребителей электроэнергии, который влечёт за собой необходимость наращивания мощности трансформаторных подстанций и электросетей. Альтернативным решением может стать компенсация реактивной мощности.

Предположим, что две вышеупомянутых насосных станции, мощностью по 200 кВт, запитаны от трансформатора мощностью 630 кВА. Полная мощность каждой насосной составит  $200/0,7=286$  кВА. Необходимо ввести в строй ещё одну насосную, т.е. довести суммарную мощность до 600 кВт. Если не компенсировать реактивную мощность, то полная мощность нагрузки трансформатора достигнет 858 кВА, что превышает максимальную мощность трансформатора.

При отсутствии КРМ потребуется замена трансформатора 630 кВА на 1000 кВА, которую можно оценить следующим образом:

- цена трансформатора ТМ1000 – 510 тыс. руб.
- стоимость монтажных работ с испытаниями – 610 тыс. руб.
- цена б.у. трансформатора ТМ630 – 250 тыс. руб.

Итоговая стоимость замены трансформатора – 870 тыс. руб.

В расчёте не учтены дополнительные затраты, которые могут потребоваться при замене трансформатора, например:

- замена оборудования подстанции;
- замена кабельных сетей;
- строительные работы;
- согласование увеличения мощности присоединения и т.п.

В случае оснащения каждой насосной станции установкой компенсации реактивной мощности необходимость замены трансформатора отпадает, а затраты на приобретение трёх УКРМ составят всего 425 700 рублей, что в 2 раза меньше.

## 5. Снижение платы за реактивную мощность

Самым очевидным стимулом внедрения конденсаторных установок является прямая плата за несоответствие требованиям к потребляемой реактивной мощности. К сожалению, в настоящее время в России нет единых правил экономического регулирования в этой области.

Во всех промышленно развитых странах этот вопрос решён путём государственного регулирования тарифов на электроэнергию, механизм реализации которого может быть различным, например, отдельный тариф за квар (практика бывшего СССР), штраф за несоблюдение требуемого  $\cos\varphi$  или надбавка к цене активной мощности, дифференцированная по величине  $\cos\varphi$ . Таблица ниже иллюстрирует такую надбавку, принятую в Чехии, которая является государством с одним из наиболее удачных механизмов экономического стимулирования компенсации реактивной мощности.

$\cos\varphi$	Увеличение тарифа %	$\cos\varphi$	Увеличение тарифа %	$\cos\varphi$	Увеличение тарифа %
0,95	-	0,79	21,32	0,63	53,47
0,94	1,12	0,78	22,94	0,62	56,03
0,93	2,26	0,77	24,61	0,61	58,67
0,92	3,43	0,76	26,32	0,60	61,40
0,91	4,63	0,75	28,07	0,59	64,23
0,90	5,85	0,74	29,87	0,58	67,15
0,89	7,10	0,73	31,72	0,57	70,18
0,88	8,37	0,72	33,63	0,56	73,31
0,87	9,68	0,71	35,58	0,55	76,56
0,86	11,02	<b>0,70</b>	<b>37,59</b>	0,54	79,92
0,85	12,38	0,69	39,66	0,53	83,42
0,84	13,79	0,68	41,80	0,52	87,05
0,83	15,22	0,67	43,99	0,51	90,82
0,82	16,69	0,66	46,25	0,50	94,70
0,81	18,19	0,65	48,58	Ниже 0,50	100
0,80	19,74	0,64	50,99		

Вернёмся к насосной станции суммарной мощностью 200 кВт. Стоимость потреблённой ею электроэнергии за год при цене 4 руб. за кВт.ч составит 7 008 000 руб. При исходном  $\cos\varphi=0,7$  и отсутствии компенсации за электроэнергию придётся дополнительно заплатить 37,59% или 2 634 300 руб. Очевидно, при таких тарифах в целесообразности внедрения УКРМ сомневаться не приходится. Срок окупаемости установки 225 квар стоимостью 141 900 рублей составит 20 дней!

Итак, простейший анализ типовых ситуаций доказывает экономическую выгоду применения конденсаторных установок для борьбы с отрицательными факторами присутствия реактивной нагрузки на промышленных предприятиях.

Москва — 2020 г.