

**Захарченко П.И., канд. техн. наук, ОАО "ПЭМЗ им. К.Маркса",
Карась С.В., докт. техн. наук, проф., ДонНТУ
Чекавский Г.С., канд. техн. наук, ДонНТУ**

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СПОСОБА ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПИТАНИИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОТЯЖЕННОЙ ЛИНИИ

Постановка проблемы. Случаи питания мощных асинхронных двигателей (АД) ответственных механизмов от удаленных источников питания (ИП) посредством протяженных питающих линий (ППЛ) весьма часты на предприятиях добывающей, лесоперерабатывающей и ряда других отраслей промышленности. Это может приводить к нарушению устойчивости асинхронных электроприводов (ЭП) механизмов в различных режимах работы (прежде всего, в режиме пуска) из-за повышенного падения напряжения в ППЛ. Указанная проблема имеет особую актуальность при питании удаленных низковольтных ЭП, когда механическая часть ЭП характеризуется большими маховыми массами или обуславливает значительную величину момента холостого хода. Снижение устойчивости работы ЭП ответственных механизмов влечет за собой снижение производительности работы всего предприятия в целом.

Известно, что негативным фактором, обуславливающим наличие указанной проблемы, является наличие значительных реактивных токов, потребляемых из сети приводным АД. Известно также, что одним из эффективных путей снижения потребляемых реактивных токов является использование емкостной компенсации, как поперечной (параллельной), так и продольной (последовательной).

Для повышения эффективности использования емкостной компенсации необходимо разработать методику определения параметров используемых при этом компенсирующих устройств (КУ) и выбора предпочтительного способа компенсации. В качестве источников реактивной мощности (РМ) целесообразно использовать секционированные батареи статических конденсаторов ввиду их существенных преимуществ перед другими источниками РМ.

Анализ исследований и публикаций. Известны случаи эффективного использования последовательной и параллельной емкостной компенсации для регулирования эквивалентного реактивного сопротивления высоковольтных линий электропередач [1] и для местного регулирования напряжения [2], а также в ряде устройств по обеспечению устойчивых пусков АД [3]. В то же время в большинстве из публикаций в указанной области, как правило, целью исследований ставится снижение перетоков РМ с учетом специальных условий электроснабжения конкретного объекта.

Это не дает возможности выполнить общий анализ изменения характеристик отдельного электротехнического комплекса, содержащего ППЛ и асинхронный ЭП, с учетом изменения режимов его работы, при индивидуальной емкостной компенсации потребляемой РМ. На основе такого анализа можно разработать рекомендации по выбору предпочтительного способа компенсации и методику выбора параметров КУ с позиции снижения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах приводного АД.

Указанные вопросы в современной научно-технической литературе освещены недостаточно, поэтому освещение основных этапов проектирования ЭП с компенсацией потребляемых РТ является целью настоящей статьи.

Задачи исследований. Объектом исследований является асинхронный ЭП с компенсацией влияния ППЛ (рисунок 1). Напряжение U_1 условного ИП, в

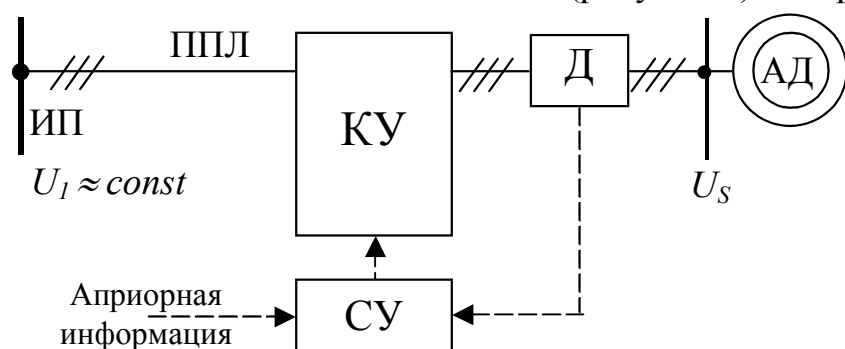


Рисунок 1. Функциональная схема ЭП с компенсацией влияния ППЛ

качестве которого может рассматриваться место параллельного включения других мощных АД (например, участковый распределительный трансформатор), посредством ППЛ передается на зажимы АД. С целью приближения уровня напряжения U_s на зажимах АД к на-

пряжению U_1 ИП в разных режимах работы ЭП используется индивидуальная ступенчатая емкостная компенсация РМ, являющаяся наиболее эффективной в условиях предприятий указанных отраслей ввиду наличия только отдельных мощных ответственных механизмов, производительность работы которых не обеспечивается существующими условиями питания. Функционирование соответствующего КУ обеспечивается за счет использования системы управления (СУ), использующей, помимо априорной информации (о режимах работы ЭП), также сигнал датчика Д измеряемой величины, в функции которой обеспечивается переключения секций КУ.

Анализ существующих условий питания ответственных механизмов на предприятиях различных отраслей промышленности показал, что алгоритм выбора параметров КУ, предназначенного для снижения влияния ППЛ до требуемого уровня, должен содержать следующие этапы [4]:

1. Определение параметров АД;
2. Определение параметров режима работы АД;
3. Определение параметров ППЛ;
4. Оценка допустимого отклонения напряжения;
5. Определение влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД;
6. Выбор предпочтительного способа компенсации;
7. Определение параметров КУ;
8. Разработка требований в системе управления коммутацией КУ.

Основные результаты исследований, выполняемых на этапах 1 – 7, изложено в [5], поэтому для полноты представления об алгоритме выбора КУ в данной статье раскроем суть исследований, используемых на этапах 6 – 8.

Учитывая, что заключительные этапы предлагаемого алгоритма должны выполняться с учетом технико-экономической эффективности (ТЭЭ) от внедрения ЭП с компенсацией, сформулируем следующие задачи исследований:

1. Обосновать критерии выбора предпочтительного способа компенсации потребляемых реактивных токов с позиции ТЭЭ.
2. Разработать рекомендации по функционированию СУ, обеспечивающей компенсацию реактивных токов, потребляемых ЭП.

Основные результаты исследований. В общем случае в качестве возможных способов емкостной компенсации могут рассматриваться [5] поперечная, продольная и (в исключительных случаях) смешанная (сочетание способов компенсации). Предварительная оценка предпочтительности использования разных способов компенсации может быть выполнена на основе данных (таблица 1), отражающих наличие (+) или отсутствие (–) требований к существующим условиям работы ЭП.

Таблица 1 – Возможные способы емкостной компенсации

Способ компенсации		Возможность установки КУ в непосредственной близости к зажимам АД	Высокая чувствительность механизма к колебаниям момента АД в нач. период пуска	Необходимость снижения влияния ППЛ и (или) повышения $\cos\varphi$ в устан. режимах
Продольная на период пуска		–	+	–
Поперечная	на период пуска	+	–	–
	ступенчатая	+	–	+
Смешанная		+	+	+

На основе данных, приведенных в таблице 1, могут быть выявлены альтернативные способы компенсации, характеризующиеся самой возможностью реализации того или иного варианта ЭП с компенсацией. Нецелесообразность использования в низковольтных сетях продольной компенсации в установившихся режимах была установлена в результате анализа статических характеристик ЭП с продольной компенсацией [5]. Это исключило возможность использования такого ЭП в качестве одного из альтернативных типов ЭП с компенсацией влияния ППЛ (таблица 1).

Оценка ТЭЭ каждого из альтернативных вариантов асинхронных ЭП с индивидуальной компенсацией потребляемых реактивных токов должна быть выполнена на основе следующих факторов:

- затраты на реструктуризацию предприятия, связанную с внедрением ЭП с компенсацией;

- степень усложнения электрической схемы питания механизма (надежность, затраты на обслуживание);
- прибыль от повышения производительности работы механизма и снижения числа и длительности простоев;
- прибыль за счет улучшения энергетических характеристик ЭП (снижение потерь мощности);
- прибыль за счет снижения перетоков РМ в ППЛ (улучшение режима напряжения соседних электроприемников);
- прибыль от уменьшения заявляемой предприятием активной и реактивной мощности (за счет ее компенсации в длительных режимах);
- прибыль за счет скидок за генерацию РМ в сеть системы.

Очевидно, что разработка методики выбора параметров КУ с учетом всех перечисленных факторов ТЭЭ без привязки к конкретному объекту исследований является весьма трудноразрешимой задачей. Поэтому более целесообразным, на наш взгляд, является косвенная оценка технико-экономической эффективности путем, помимо использования данных таблицы 1, определения предпочтительного варианта ЭП с компенсацией на основе следующих факторов:

- техническая эффективность (меньшая требуемая фазная емкость КУ для достижения требуемых характеристик ЭП в разных режимах работы, и, прежде всего, в режиме пуска, характеризующемся наибольшим потреблением РМ);
- степень улучшения энергетических характеристик ЭП в установившихся режимах.

Для иллюстрации справедливости первого тезиса приведем графики зависимости фазной емкости КУ от параметров ППЛ [5], необходимые для достижения не более, чем 10%-ного снижения напряжения на зажимах АД по сравнению с напряжением ИП (рисунок 2)¹.

Так, для обеспечения снижения влияния ППЛ в режиме пуска АД продольная компенсация более эффективна при существенном преобладании в сопротивлении ППЛ активной составляющей ($X_V/R_V < 1/3$), а поперечная – в прочих случаях. Тем не менее, при достаточно малых сопротивлениях ППЛ возможно эффективное использование поперечной компенсации и в случае преобладания активной составляющей, и наоборот.

Второй тезис не применим для ЭП с компенсацией, используемой на период пуска, поскольку задачи улучшения энергетических характеристик ЭП при этом не ставится (таблица 1), поэтому может быть использован только для оценки доходов от использования ЭП со ступенчатой поперечной или смешанной компенсацией по соответствующим количественным зависимостям [5]. Предпочтительность же последних типов ЭП на основании данного фактора определена быть не может, поскольку ЭП будут обладать идентичными энерге-

¹ Зависимости представлены в относительных единицах для двигателя ВАО2-280-L8 (110 кВт, 660 В, 124 А). Значения базисных величин: сопротивление 3,065 Ом, угол – 1 рад, емкость – 1040 мкФ.

тическими характеристиками в установившихся режимах. Общее число секций КУ (ступеней компенсации) в обоих случаях соответствует количеству штатных установившихся режимов работы, характеризующихся частотой вращения (скольжением) АД.

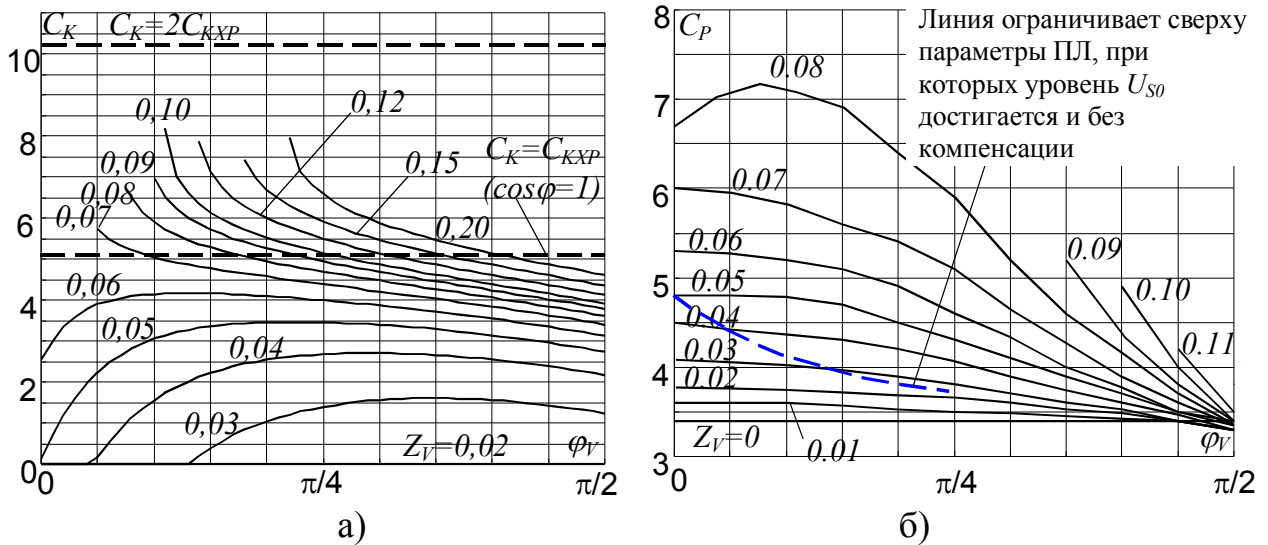


Рисунок 2. Уровни поперечной компенсации для обеспечения уровня $U_{S0}=0.9U_{SH}$ напряжения АД при пуске в функции параметров ППЛ: а – при поперечной компенсации; б – при продольной компенсации (при гарантированном исключении самовозбуждения АД).

Таким образом, становится очевидным, что задача выбора предпочтительного способа компенсации взаимосвязана с задачей определения требуемых параметров КУ.

Для общего случая фазное емкостное сопротивление параллельного КУ, соответствующее полной компенсации потребляемой РМ ($\cos\varphi=1$) в режиме работы, характеризующемся определенным значением скольжения s , достаточно точно можно определить по формуле:

$$X_K = \frac{1}{\omega_S C_{KX}} \approx \frac{Z_X^2 + Z_Y^2 + 2X_V Z_Y}{X_V + Z_Y}, \quad (1)$$

где $Z_X = R_1 + \frac{X_m^2 R_2/s}{(R_2/s)^2 + (X_m + X_2)^2}$, $Z_Y = X_1 + X_m \frac{(R_2/s)^2 + X_2(X_m + X_2)}{(R_2/s)^2 + (X_m + X_2)^2}$,

R_1, R_2, X_1, X_2, X_m – электромагнитные параметры АД;

X_V – индуктивность ППЛ;

ω_S – угловая частота напряжения сети.

C_{KX} – фазная емкость параллельного КУ.

Соотношение параметров ЭТК в аналогичном случае ($\cos\varphi=1$) при использовании продольной компенсации:

$$\frac{\omega_S C_{PX} R_{sh}^2}{\omega_S^2 C_{PX}^2 R_{sh}^2 + 1} = X_V + Z_Y. \quad (2)$$

где C_{PX} – фазная емкость последовательного КУ;

R_{sh} – величина шунтирующего сопротивления.

Графические (рисунок 2) и аналитические зависимости (1), (2) можно использовать как при определении параметров КУ, так и для оценки предпочтительности использования разных вариантов компенсации с позиции их технической эффективности.

С учетом изложенного в ДонНТУ разработано программное обеспечение, позволяющее эффективно выполнить выбор предпочтительного способа компенсации и определить необходимые параметры КУ, которые обеспечат требуемое улучшение условий питания и повышение устойчивости работы ЭП.

Принципиальные схемы КУ, реализующих последовательный и параллельный способы компенсации, представлены на рисунках 3, 4. На схемах обозначены: К – коммутационные аппараты; ТР – токоограничивающий реактор; КБ – батареи статических конденсаторов; РР – разрядные сопротивления; РШ – шунтирующий резистор.

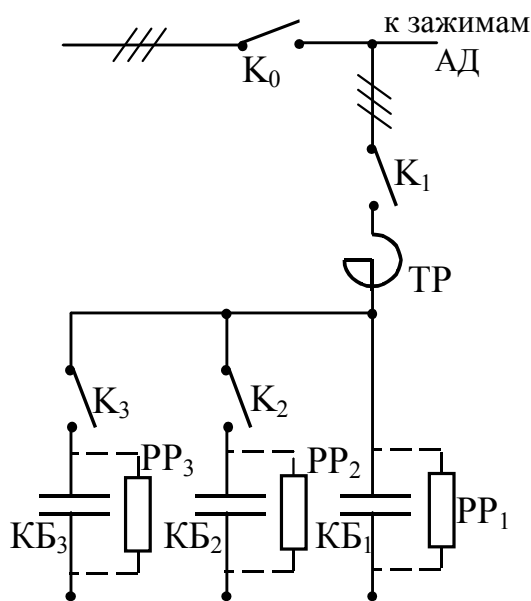


Рисунок 3. Упрощенная принципиальная схема параллельного КУ

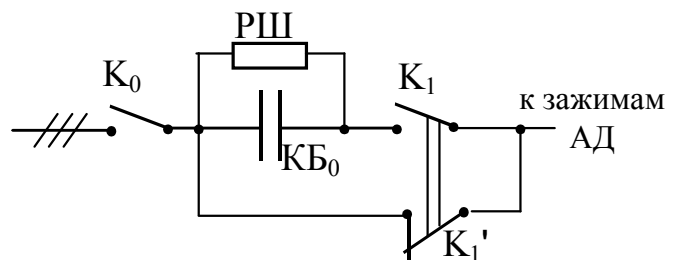


Рисунок 4. Упрощенная принципиальная схема последовательного КУ

Требования к СУ коммутацией КУ определяются способом компенсации, величинами уровней компенсации и особенностями протекания переходных процессов в ЭП [5]. При условии исключения недопустимых уровней и колебаний электромагнитных величин переключения в КУ при изменении режима работы ЭП должны выполняться в функции тока АД.

Обобщая сказанное, можно предложить следующие алгоритмы функционирования ЭП с компенсацией, функциональная схема которого представлена на рисунке 1.

Алгоритм управления ЭП со ступенчатой поперечной компенсацией (КУ по схеме рисунка 3):

Исходное состояние ЭП: ротор АД неподвижен, ключи K_0 , K_2 , K_3 находятся в разомкнутом состоянии. Состояние ключа K_1 может быть любым из двух крайних (замкнут, разомкнут), при реализации глухоподключенной секции K_1 может отсутствовать при замене его автоматическим выключателем.

При использовании трехступенчатой компенсации влияния ППЛ значения ступеней компенсации должны соответствовать уровням компенсации, необходимым для получения оптимальных уровней напряжения на зажимах АД в режимах короткого замыкания (пуска), нагрузки и идеального ХХ (используется в режиме частичной загрузки).

При пуске АД замыкается ключ K_0 , ток статора АД быстро увеличивается до пускового значения. С выдержкой времени, равной примерно 10 – 30 мс, одновременно замыкаются ключи K_1 , K_2 , K_3 , чем осуществляется подключение пусковой ступени компенсации.

При снижении тока АД до уровня, соответствующего 1,5 – 2,0-кратному значению номинального тока АД размыканием ключа K_3 осуществляется вывод секции $КБ_3$, имеющей максимальную РМ, чем реализуется переход к ступени компенсации, соответствующей установившемуся режиму нагрузки. После выведения секция $КБ_3$ замыкается на разрядное сопротивление $РР_3$.

Ступень компенсации, имеющая минимальную РМ, целесообразно использовать при относительно продолжительном снижении нагрузки, для этого при соответствующем снижении тока АД размыканием ключа K_2 должна выводиться секция $КБ_2$.

При необходимости торможения ЭП отключается ключ K_0 . При достаточно малой мощности секции $КБ_1$ (равной либо меньше величины РМ, потребляемой в режиме идеального ХХ [5]) она может не выводиться и может быть подключена глухо, при этом резистор $РР_1$ исключается (разряд $КБ_1$ в этом случае осуществляется через сопротивления трехфазной обмотки статора АД). В противном случае должен быть предварительно разомкнут ключ K_1 .

При реализации поперечной компенсации только на период пуска АД секции $КБ_2$ и $КБ_3$ отсутствуют (соответственно отсутствуют ключи K_2 и K_3), а мощность секции $КБ_1$ должна быть выбрана исходя из необходимости обеспечения требуемого уровня напряжения в режиме пуска. Введение указанной ступени компенсации должно производиться с выдержкой времени, равной 10 – 30 мс.

Алгоритм управления ЭП с продольной компенсацией (КУ по схеме рисунка 4) следующий:

Исходное состояние ЭП: ротор АД неподвижен, ключ K_0 разомкнут, ключ K_1 замкнут (сопряженный K_1' разомкнут).

При пуске АД замыкается ключ K_0 , чем в то же время осуществляется подключение последовательного КУ, фазная емкость батареи конденсаторов $КБ_0$ и величина активного сопротивления РШ которого выбраны с целью обеспечения требуемой величины напряжения в период пуска при одновременном гарантированном исключении самовозбуждения АД (см. раздел 2). Ток статора АД увеличивается до пускового значения.

При снижении тока АД до 1,5 – 2,0-кратного значения номинального тока ключ K_1 размыкается (замыкается K_1'), таким образом, осуществляется выведение последовательного КУ. Разрядка $КБ_0$ после отключения последовательного КУ осуществляется через сопротивление РШ, выполняющего в данном случае роль разрядного.

При реализации смешанной компенсации КУ строится по схеме, комбинирующей схемы рисунков 3, 4, с сохранением всех изложенных особенностей управления.

Заключение.

Предложен алгоритм выбора емкостного КУ для совершенствования характеристик асинхронного ЭП при его питании посредством ППЛ, обеспечивающий рациональное решение задачи повышения устойчивости работы механизма. Установлено, что определение предпочтительного способа компенсации реактивных токов, потребляемых ЭП в разных режимах работы, должна выполняться как с учетом особенностей схемы электроснабжения ЭП, так и с учетом большей ТЭЭ использования компенсации потребляемых реактивных токов. Косвенно ТЭЭ использования компенсации может быть определена с позиции меньшей требуемой фазной емкости КУ, предназначенной для повышения напряжения на зажимах АД до заданного значения в период пуска.

Предложен алгоритм управления ЭП с компенсацией при условии исключения недопустимых уровней и колебаний электромагнитных величин, обусловленных функционированием КУ.

Дальнейшие исследования могут быть сконцентрированы на совершенствовании предложенного алгоритма выбора предпочтительного варианта ЭП с компенсацией потребляемой РМ при меньшем уровне абстрагирования от реальных технологических объектов. Перспективными в этом отношении являются, в частности, задачи, связанные с разработкой более точных математических моделей ЭП, а также с определением влияния характера нагрузки АД на эффективность использования компенсации.

Список литературы.

1. Кочкин В.И. Управляемые статические устройства компенсации реактивной мощности для линий электропередачи // *Электричество*. – 2000. – № 9. – С. 13 – 19.
2. Коротецкий Ю.Л., Воробьев Ю.В. Улучшение пусковых характеристик асинхронного электропривода с помощью многофункциональных устройств регулирования // *Проблемы автоматизированного электропривода: Теория и практика*. Вісник ХДПУ. Зб. наук. праць. – Темат. вип. 61. – Харків: ХДПУ. – 1999. – С. 187 – 189.
3. Гандин Б.Д., Гревнин Г.Р., Лазаревский Н.А. Пуск асинхронных двигателей. – Л.: Судостроение, 1980. – 192 с., ил.
4. Карась С.В., Чекавский Г.С. Выбор параметров асинхронного электропривода с компенсацией потребляемой реактивной мощности // *Збірник тез доповідей II міжнародної НТК "Керування режимами роботи об'єктів електричних систем - 2002"*. – Донецьк, ДонНТУ, 12 – 14 вересня 2002 р. – С. 47 – 48.
5. Чекавский Г.С. Совершенствование характеристик электротехнического комплекса "протяженная питающая линия – асинхронный электропривод" / *Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.09.03*. – Донецк: ДонНТУ, 2003.