

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ ПИТАЮЩЕЙ ЛИНИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

**Чекавский Г.С.,**

**Донецкий национальный технический университет, Украина**

На предприятиях строительной, деревоперерабатывающей, добывающей и других отраслей промышленности весьма часто имеют место случаи питания отдельных ответственных механизмов (угольные, добычные комбайны, забойные скребковые конвейеры, буровые установки, насосы станков нефтяных скважин, турбомеханизмы местного назначения угольных шахт, лесопильные рамы, штемпельные прессы и др.) посредством протяженной питающей линии (ПЛ), параметры которой обусловлены как недостаточной эффективностью используемой схемы питания, так и технологическими особенностями применения производственных комплексов (уровень питающего напряжения, установленная мощность и др.). Это зачастую влечет за собой значительное снижение напряжения на зажимах приводных асинхронных двигателей (АД), оказывая существенное влияние на их работу. Ситуация в этом случае усугубляется тем, что электромеханическая система может обладать значительной суммарной маховой массой, наличием значительных моментов сопротивления при пуске, диссипации, значительными пусковыми токами при низком коэффициенте мощности.

Одним из эффективных способов снижения влияния ПЛ на уровень напряжения на зажимах АД является уменьшение падения напряжения в ПЛ за счет использования ступенчатой компенсации потребляемого электроприводом (ЭП) реактивного тока [1] при параллельном или последовательном включении конденсаторных батарей. Путем оптимального выбора параметров соответствующих параллельных или последовательных компенсирующих устройств (КУ) можно обеспечить требуемую величину напряжения на зажимах АД, и, следовательно, приемлемую адаптацию ЭП к условиям питания от протяженной ПЛ.

Ограничением при выборе параметров КУ, помимо экономического фактора, являются также и динамические характеристики ЭП: при использовании компенсации влияния ПЛ должно быть исключено самовозбуждение АД, а переходный процесс (ПП) в ЭП должен обуславливать величины ударных (максимальных) переходных значений различных параметров в допустимых пределах.

В настоящей работе проводится анализ результатов исследования ПП в низковольтном асинхронном ЭП при указанной адаптации к условиям питания от протяженной ПЛ, что может быть использовано при определении допустимых параметров параллельного или последовательного КУ, а также проводится сравнительный анализ разных способов компенсации потребляемого реактивного тока с позиции обеспечения эффективности и допустимого качества ПП в ЭП, в частности, при коммутации конденсаторных батарей КУ. Исследования выполнены на примере АД типа ВАО2-280L-8, используемого, в частности в ЭП лесопильных рам 2P75 (А) [2].

Использовано математическое описание ЭП с компенсацией, составленное при использовании подхода к рассмотрению параметров ПЛ и с учетом допущений, изложенных в [2]. Система относительных единиц ориентирована на номинальные данные статора АД.

Математическое описание электрических контуров, связывающее питающее напряжение с током ПЛ, в комплексном виде для симметричного ЭП с поперечной компенсацией:

$$[N(p) + (R_V + L_V p)H(p)]\bar{i}_V = H(p)\bar{u}_1, \quad (1)$$

где  $N(p) = \sigma L_S L_R p^2 + (R_S L_R + L_S R_R - j\omega \sigma L_S L_R)p + R_S(R_R - j\omega L_R)$ ;

$H(p) = \sigma L_S L_R C_K p^3 + (R_S L_R + L_S R_R - j\omega \sigma L_S L_R)C_K p^2 + [R_S(R_R - j\omega L_R)C_K + L_R]p + R_R - j\omega L_R$ ;

для симметричного ЭП с продольной компенсацией:

$$(\alpha_R + p - j\omega)(T_u p + 1)\bar{\mathbf{u}}_1 = R_u G(p)\bar{\mathbf{i}}_V, \quad (2)$$

где  $G(p) = K^{-1}p^3 + [\alpha_R(L_V + L_S)C_P + R_{VPS}C_P + (1 - j\omega T_u)T_u^{-1}K^{-1}]p^2 +$

$+ [R_{VPS}C_P(\alpha_R - j\omega) + \alpha_R(L_V + L_S)R_u^{-1} + \beta_u + 1 - j\omega(L_V + \sigma L_S)R_u^{-1}]p + (\beta_u + 1)(\alpha_R - j\omega)$ .

В (1) и (2) обозначено:

$R_V = Z_V \cos \varphi_V$ ,  $L_V = Z_V \sin \varphi_V / \omega_S$  – продольные фазные параметры ПЛ;

$R_S$ ,  $R_R = f(\omega)$ ,  $L_m = f(U_S)$ ,  $L_S = L_m + L_{S\sigma}$ ,  $L_R = L_m + L_{R\sigma}(\omega)$  – параметры эквива-

лентной схемы замещения АД;

$C_K$  – параметр параллельного КУ (фазная емкость);

$C_P$ ,  $R_u$  – параметры последовательного КУ (фазная емкость и шунтирующее активное сопротивление);

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_S L_R)$ ;  $\beta_u = R_{VPS} / R_u$ ;  $K = [(L_V + \sigma L_S)C_P]^{-1}$ ;  $\alpha_R = R_R / L_R$ ;

$R_{VPS} = R_V + R_S$ ;  $\sigma_V = \frac{L_V + \sigma L_S}{L_V + L_S}$ ;  $\alpha_V = \frac{R_{VPS}}{L_V + \sigma L_S}$ ;  $T_u = R_u C_P$ .

$\omega$  – частота вращения ротора АД (ЧВР);

$p = d/dt$  – символ дифференцирования по времени.

**Статические характеристики** асинхронного ЭП определяются из выражений:

Напряжение на зажимах АД: в ЭП с поперечной компенсацией:

$$\bar{\mathbf{u}}_{Sy} = \frac{N(j\omega_S)}{N(j\omega_S) + (R_V + j\omega_S L_V)H(j\omega_S)} \bar{\mathbf{u}}_1, \quad (3)$$

в ЭП с продольной компенсацией:

$$\bar{\mathbf{u}}_{Sy} = \frac{j\omega_S(R_S + \alpha_R L_S) + R_S(\alpha_R - j\omega) - \omega_S \sigma L_S(\omega_S - \omega) - \frac{\alpha_R + j(\omega_S - \omega)}{C_P p + R_u^{-1}}}{(L_V + \sigma L_S)[- \omega_S^2 + j\omega_S(\alpha_V + \alpha_R / \sigma_V - j\omega) + \alpha_V(\alpha_R - j\omega)]} \bar{\mathbf{u}}_1. \quad (4)$$

Ток ПЛ: в ЭП с поперечной компенсацией:

$$\bar{\mathbf{i}}_{Vy} = \frac{H(j\omega_S)}{N(j\omega_S) + (R_V + j\omega_S L_V)H(j\omega_S)} \bar{\mathbf{u}}_1, \quad (5)$$

в ЭП с продольной компенсацией

$$\bar{\mathbf{i}}_{Vy} = \frac{[\alpha_R + j(\omega_S - \omega)](j\omega_S T_u + 1)}{R_u G(j\omega_S)} \bar{\mathbf{u}}_1. \quad (6)$$

Выражения (3) – (6), рассматриваемые как зависимости амплитуд электрических величин в функции ЧВР, дают полную информацию о снижении влияния ПЛ в различных режимах работы ЭП. Коэффициент мощности, измеренный в начале ПЛ, определен как аргумент комплексных выражений, соответствующих дробям в правой части (5) или (6).

На основании выражений (3), (4), рассматриваемых как зависимости напряжения на зажимах АД в функции параметров КУ при заданных фиксированных ЧВР и параметрах ПЛ, определяются параметры КУ, обеспечивающие требуемые уровни напряжения в различных квазиустановившихся режимах работы.

С учетом специфики рассматриваемых механизмов устойчивость и колебательность ПП можно определить без учета составляющих, обусловленных скоростью изменения ЧВР. Соответствующие динамические показатели определяются при условии постоянства ЧВР ( $\omega \approx const$ ) как корни соответствующих характеристических уравнений (ХУ): электропривод с поперечной компенсацией:

$$N(p) + (R_V + L_V p)H(p) = 0, \quad (7)$$

электропривод с продольной компенсацией:

$$G(p) = 0. \quad (8)$$

Действительные части корней  $p_i = -\alpha_i + j\omega_i$  уравнений (7) и (8) характеризуют интенсивность затухания, мнимые части – колебательность ПП. Используя (7), (8), можно показать, что все электромагнитные величины ЭП с компенсацией в переходных режимах имеют низкочастотные (частота которых не превышает частоту сети), определяемые в основном параметрами ПЛ и АД, и высокочастотные (частота которых примерно равна или превышает частоту сети, в зависимости от уровня компенсации), определяемые в основном параметрами КУ. При поперечной компенсации согласно (7) имеем две низкочастотные и две высокочастотные составляющие, при продольной компенсации согласно (8) – одну низкочастотную и две высокочастотные. Как правило, время затухания высокочастотных составляющих существенно меньше времени затухания низкочастотных свободных составляющих.

В ЭП с поперечной компенсацией при пуске и штатных переключениях все составляющие ПП при  $\alpha_R > 0$  носят затухающий характер, основные зависимости между корнями ХУ и параметрами ЭП были представлены в [2]. Минимальный коэффициент затухания, величина которого определяет длительность ПП и практически не зависит от параметров параллельного КУ, приближенно равен параметру  $\alpha_V$ .

В ЭП с продольной компенсацией один из корней может иметь положительную действительную часть, обуславливая возникновение в определенном диапазоне ЧВР отрицательного демпфирования [3]. Путем выбора соответствующего сопротивления шунтирующего активного сопротивления самовозбуждение исключается во всем диапазоне ЧВР от нулевой до подсинхронной, что означает гарантированное исключение самовозбуждения в указанном диапазоне ЧВР. Последнее имеет особенное значение для ЭП с большой маховой массой, обуславливающей медленный темп разгона.

Начальные значения амплитуд свободных составляющих тем выше, чем больше различие между соответствующими начальными значениями электрических величин и их установившимися значениями в послекоммутационный период, именно поэтому наибольшими амплитудами ПП характеризуются режимы прямого пуска и реверса.

При ступенчатом изменении фазной емкости КУ амплитуда колебаний будет тем выше, чем больше разница между установившимися значениями величин в пред- и послекоммутационный период, причем последняя может быть оценена с помощью статических характеристик. В ЭП с компенсацией из-за относительно малого отличия статических характеристик, особенно на линейных участках, влияние низкочастотных составляющих весьма невелико, в то же время ступенчатое изменение фазной емкости КУ (как параллельного, так и последовательного), приведет к существенному проявлению высокочастотных переходных составляющих. С другой стороны, амплитуда колебаний будет тем выше, чем больше разница уровней компенсации (интенсивность затухания и колебательность ПП при этом определяются величиной фазной емкости КУ в послекоммутационный период [2]); для конкретного ЭП – при введении-выведении секции КУ, используемой на период пуска, обладающей максимальной фазной емкостью. Анализ статических характеристик показывает, что при обеспечении одинаковых уровней напряжения на зажимах двигателя ПП будет более амплитудным при наличии последовательного КУ. Указанное подтверждается результатами математического моделирования (рис.1, все электромагнитные величины представлены в долях соответствующих номинальных значений АД; ЧВР – в долях синхронной).

При построении ЭП со смешанной (продольная на период пуска и поперечная в установившихся режимах) компенсацией [3] ПП, вызванный выведением последовательного КУ с одновременным введением параллельного КУ, окажется наименее благоприятным.

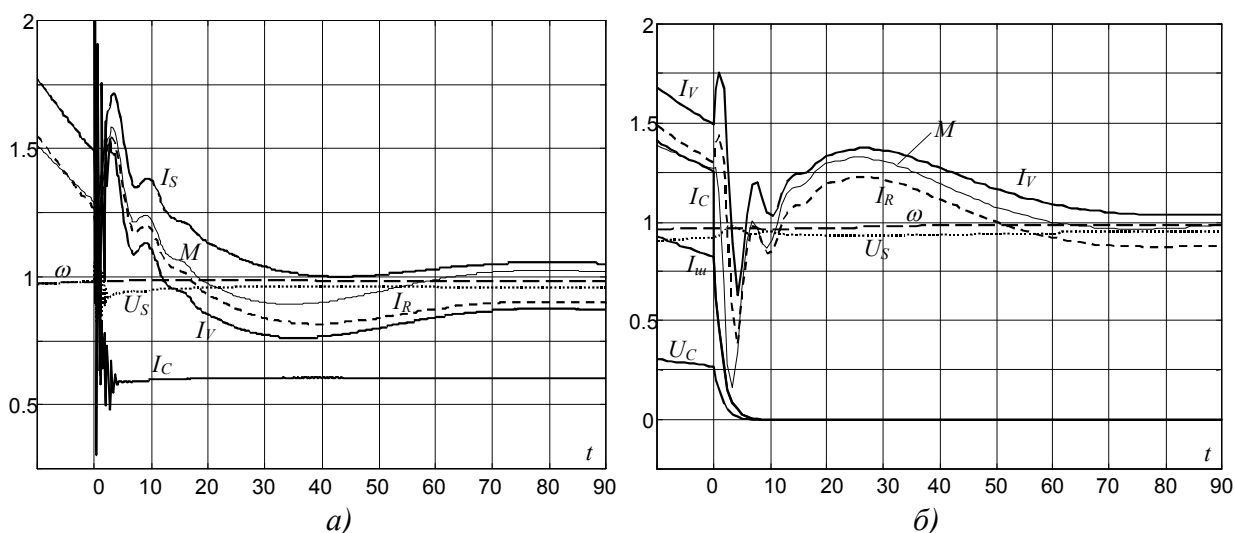


Рисунок 1 – Переходный процесс в ЭП с компенсацией при ступенчатом изменении фазной емкости КУ (а – параллельного; б – последовательного):

### Выводы:

1. При коммутации конденсаторных батарей (как параллельных, так и последовательных КУ) возникают затухающие, длительностью до 3 – 5 периодов питающего напряжения, высокочастотные колебания всех электромагнитных величин, амплитуда которых зависит от значения ЧВР (определяющей участок механической характеристики), а также от величины, на которую изменяются параметры КУ (определяющей отличие установившихся параметров послекоммутационного режима от начальных условий).

2. Сравнительный анализ разных вариантов ЭП с компенсацией влияния сети показал, что при одинаковых параметрах ПЛ и АД и использовании компенсации влияния сети для обеспечения одинаковых уровней напряжения в период пуска:

- поперечная компенсация обеспечивает более стабильный уровень напряжения на зажимах АД в период пуска, что обуславливает меньшее время разгона ЭП; более качественный ПП при коммутации конденсаторных батарей КУ; однако требует дополнительных мер по улучшению качества ПП в момент включения ЭП в сеть;
- продольная компенсация существенно улучшает качество ПП при включении ЭП в сеть; однако обеспечивает менее стабильный уровень напряжения на зажимах АД в период пуска, в частности, существенно снижается перегрузочная способность АД по критическому моменту; вызывает бо́льшие амплитуды колебаний электромагнитных величин при коммутации конденсаторных батарей КУ.

### Литература

1. 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.
2. Чекавский Г.С. Минимизация влияния питающей сети на работу асинхронного электропривода при ступенчатой поперечной компенсации реактивной мощности // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – С. 144 – 157.
3. Series compensation of voltage losses in electric mains use for increasing dynamic and energy coefficients of the asynchronous electric drive / E. Varenik, S. Karas, E. Kovalyov, P. Kotsegub, G. Checkavsky // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International conference UEES’01 (Szczecin and Miedzyzdroje, Poland, 05 – 08 Sep. 2001). – Vol. 3. – Szczecin: Technical University Press, 2001. – Pp. 849 – 854.