

Чекавский Г.С., ДонНТУ

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ
ПРИ АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ ПИТАНИЯ ОТ ПРОТЯЖЕННОЙ
ЛИНИИ**

Постановка задачи. На предприятиях строительной, деревоперерабатывающей, добывающей и других отраслей промышленности часты случаи питания 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 производственных комплексов (уровень питающего напряжения, установленная мощность и др.). Это влечет за собой снижение напряжения на зажимах приводных асинхронных двигателей (АД), зачастую оказывая существенное влияние на их работу. Ситуация усугубляется, если электромеханическая система обладает значительной суммарной маховой массой, диссипацией, большими моментами сопротивления при пуске, значительными пусковыми токами при низком коэффициенте мощности ($\cos \varphi$).

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 удовлетворительное напряжение 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 в ЭП должен обеспечивать допустимые ударные (максимальные) переходные значения различных параметров.

Цель работы – исследование переходных процессов в низковольтном асинхронном ЭП при указанной адаптации к условиям питания от протяженной ПЛ, на основании которого могут быть определены допустимые параметры КУ, а также проведение сравнительного анализа разных способов компенсации потребляемого реактивного тока с позиции обеспечения эффективности и допустимого качества переходных процессов в ЭП. Рассматриваются варианты ЭП с поперечной и продольной компенсацией [1]. Исследова-

ния выполнены на примере АД типа ВАО2-280L-8 (110 кВт, 660 В, 124 А), используемого, в частности, в ЭП лесопильных рам 2Р75 (А) [2].

Математическое описание ЭП с компенсацией изложено в [3]. При исследованиях используется система относительных единиц, ориентированная на номинальные данные цепи статора АД: все электромагнитные величины представлены в долях соответствующих фазных номинальных значений АД; частота вращения ротора АД (ЧВР) – в долях синхронной ЧВР. Базовое сопротивление для рассматриваемого АД – 3,065 Ом; базовая емкость – 1000 мкФ, что соответствует номинальной реактивной мощности 141,4 квар.

Математическое описание [3] электрических контуров ЭП при его симметричности может быть записано в комплексных величинах.

Для ЭП с поперечной компенсацией:

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

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

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

$R_V = z_V \cos \varphi_V$, $L_V = z_V \sin \varphi_V / \omega_S$ – 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 эквивалентной схемы замещения АД; C_K – параметр параллельного КУ (фазная емкость); ω – ЧВР; $p = d/dt$ – символ дифференцирования по времени.

Для ЭП с продольной компенсацией:

$$(\alpha_R + p - j\omega) \frac{T_{uu} p + 1}{R_{uu}} \bar{u}_1 = G(p) \bar{i}_V, \quad (2)$$

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

$$+ [R_{VPS} C_P (\alpha_R - j\omega) + \alpha_R (L_V + L_S) R_{uu}^{-1} + \beta_{uu} + 1 - j\omega (L_V + \sigma L_S) R_{uu}^{-1}] p + (\beta_{uu} + 1) (\alpha_R - j\omega);$$

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_S L_R); \beta_{uu} = R_{VPS} / R_{uu}; \alpha_V = R_{VPS} / (L_V + \sigma L_S); R_{VPS} = R_V + R_S;$$

$$\alpha_R = R_R / L_R; \sigma_V = (L_V + \sigma L_S) / (L_V + L_S); K = [(L_V + \sigma L_S) C_P]^{-1}; T_{uu} = R_{uu} C_P.$$

C_P , R_{uu} – параметры последовательного КУ (фазные емкость и шунтирующее активное сопротивление).

Динамические свойства ЭП с компенсацией. С учетом специфики рассматриваемых механизмов устойчивость и колебательность переходного процесса может быть оценена без учета составляющих, обусловленных темпом изменения ЧВР. Указанные динамические показатели определены при условии постоянства ЧВР ($\omega \approx const$) соответственно как действительная и мнимая части корней $p_i = -\alpha_i + j\omega_i$ характеристических уравнений ($i = 1 \dots n$, где n – порядок уравнения), соответствующих однородному дифференциальному уравнению (1) для ЭП с поперечной компенсацией ($n = 4$):

$$N(p) + (R_V + L_V p)H(p) = 0, \quad (3)$$

и однородному дифференциальному уравнению (2) для ЭП с продольной компенсацией ($n = 3$):

$$G(p) = 0, \quad (4)$$

Зависимости коэффициентов затухания и частот свободных составляющих электрических величин, определенных после решения (3), (4), в функции ЧВР при разных уровнях компенсации для ЭП с поперечной компенсацией представлены на рисунке 1, а для ЭП с продольной компенсацией – на рисунке 2.

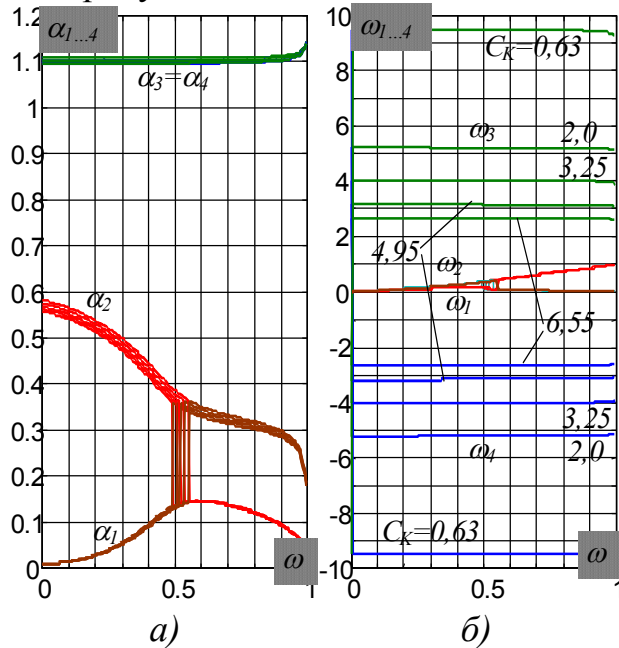


Рисунок 1 – Коэффициенты затухания (а) и частоты вращения (б) векторов свободных токов в функции ЧВР для ЭП с поперечной компенсацией ($z_V = 0,05$, $\varphi_V = \pi/8$).

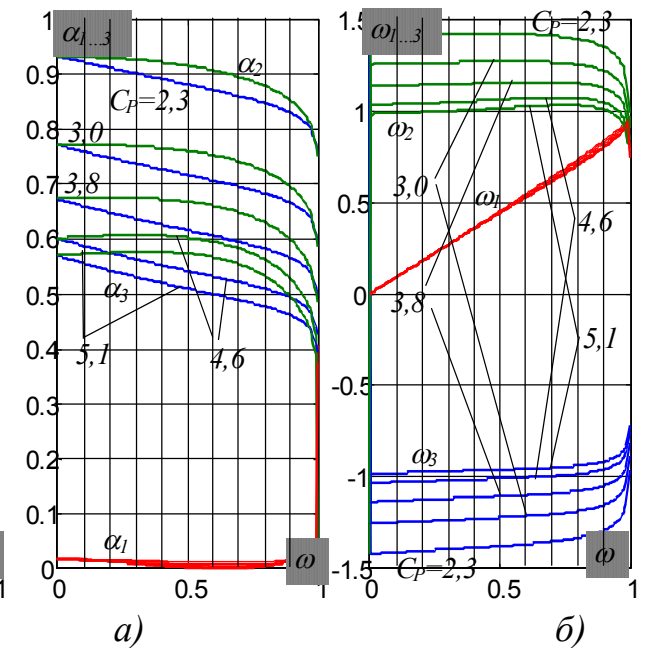


Рисунок 2 – Коэффициенты затухания (а) и частоты вращения (б) векторов свободных токов в функции ЧВР для ЭП с продольной компенсацией ($z_V = 0,05$, $\varphi_V = \pi/8$).

Из зависимостей следует, что по сравнению с аналогичными зависимостями при отсутствии компенсации (представленными в [2]) в рассматриваемом случае дополнительно присутствуют высокочастотные свободные составляющие, частота которых примерно равна или превышает частоту сети, в зависимости от уровня компенсации, и не зависит от ЧВР. Частота низкочастотных составляющих не превышает частоту сети. При поперечной компенсации имеем две низкочастотные и две высокочастотные составляющие; при продольной – одну низкочастотную и две высокочастотные. Время затухания высокочастотных свободных составляющих существенно (как правило, в несколько раз) меньше времени затухания низкочастотных.

В ЭП с поперечной компенсацией при пуске и штатных переключениях все свободные составляющие при $\alpha_R > 0$ носят затухающий характер, основные зависимости между корнями характеристического уравнения и параметрами этого ЭП представлены в [4]. Минимальный коэффициент затухания, характеризующий длительность переходного процесса, практически не зави-

сит от параметров параллельного КУ, и в основном определяется параметром α_V .

В ЭП с продольной компенсацией один из корней (наименьший) может иметь положительную действительную часть, обуславливая возникновение в определенном диапазоне ЧВР отрицательного демпфирования [5]. После подстановки в (4) $p \rightarrow p + j\omega$ и при пренебрежении составляющими с p^2 и p^3 может быть определено приближенное аналитическое выражение для минимального коэффициента затухания:

$$\alpha_1 = \alpha_R \frac{\left[\alpha_R \alpha_V + \frac{\alpha_R}{\sigma_V T_{uu}} + (\beta_{uu} + 1)K - \omega^2 \right] \left[(\beta_{uu} + 1)K - \frac{\omega^2}{\sigma_V} \right] + \omega^2 \left(\alpha_V + \frac{1}{\sigma_V T_{uu}} \right) \left(\alpha_V + \frac{2\alpha_R}{\sigma_V} + \frac{1}{T_{uu}} \right)}{\left[\alpha_R \left(\alpha_V + \frac{1}{\sigma_V T_{uu}} \right) + (\beta_{uu} + 1)K - \omega^2 \right]^2 + \omega^2 \left(\alpha_V + \frac{2\alpha_R}{\sigma_V} + \frac{1}{T_{uu}} \right)^2}, \quad (5)$$

а также диапазон ЧВР, в котором имеет место самовозбуждение. Этот диапазон ограничен ЧВР, положительные значения которых с достаточной степенью точности могут быть определены из (5) при пренебрежении в числителе малыми составляющими:

$$\omega_{cam1,2} = \sqrt{\frac{K}{2}(\sigma_V + 1) - \frac{1}{2T_{uu}^2} \pm \sqrt{\left[\frac{1}{2T_{uu}^2} - \frac{K}{2}(\sigma_V + 1) \right]^2 - \sigma_V(\beta_{uu} + 1)^2 K^2}}.$$

Путем выбора определенного значения шунтирующего активного сопротивления шунта можно добиться того, что коэффициент затухания α_1 будет положительным во всем диапазоне ЧВР от нулевой до синхронной (см. рисунок 2), что означает *гарантированное исключение самовозбуждения* в указанном диапазоне ЧВР. Последнее имеет особое значение для ЭП с большой маховой массой, обуславливающей медленный темп разгона.

Максимальные амплитуды колебаний электромагнитных величин могут быть оценены по значениям постоянных интегрирования, которые, в свою очередь, определяются из матричного уравнения:

$$\mathbf{A} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{B}, \quad (6)$$

где \mathbf{A} – вектор $[n^2 \times 1]$ искомым постоянных интегрирования, представляющих собой начальные амплитудные значения свободных составляющих линейно независимых напряжений и токов элементов ЭП; \mathbf{B} – вектор $[n^2 \times 1]$ разностей между начальными условиями и значениями установившихся составляющих соответствующих величин непосредственно после коммутации; \mathbf{K} – матрица $[n^2 \times n^2]$ коэффициентов соответствующих уравнений связи между начальными условиями и свободными составляющими.

Анализ максимальных значений переходных величин при подключении к сети. При качественном анализе максимальных (ударных) переходных значений электромагнитных величин использовано выражение (6), при количественном – подход, основанный на анализе изменения мгновен-

ных значений амплитуд комплексных векторов токов и напряжений, с учетом того, что мгновенные значения указанных амплитуд, а также электромагнитного момента АД не зависят от угла включения [6].

Согласно (6), начальные значения амплитуд свободных составляющих будут тем выше, чем больше различие между начальными значениями электрических величин и их установившимися значениями в послекоммутационный период (вектор **В**). Действительно, при питании АД от мощной сети наибольшими амплитудами переходного процесса характеризуются случаи, связанные с резким изменением режима работы АД (прежде всего режимы прямого пуска и реверсирования путем изменения порядка чередования фаз).

Влияние параметров ПЛ на ударные значения переходных электромагнитных величин при включении в сеть ЭП без компенсации может быть оценено с использованием кривых, представленных на рисунке 3 (время представлено в периодах напряжения). Очевидно, что ПЛ оказывает демпфирующее влияние на переходный процесс, а при неизменном сопротивлении ПЛ минимальные ударные значения будут иметь место при $\varphi_V \approx 3\pi/20$, что означает $R_V \approx \omega_S L_V / 2$.

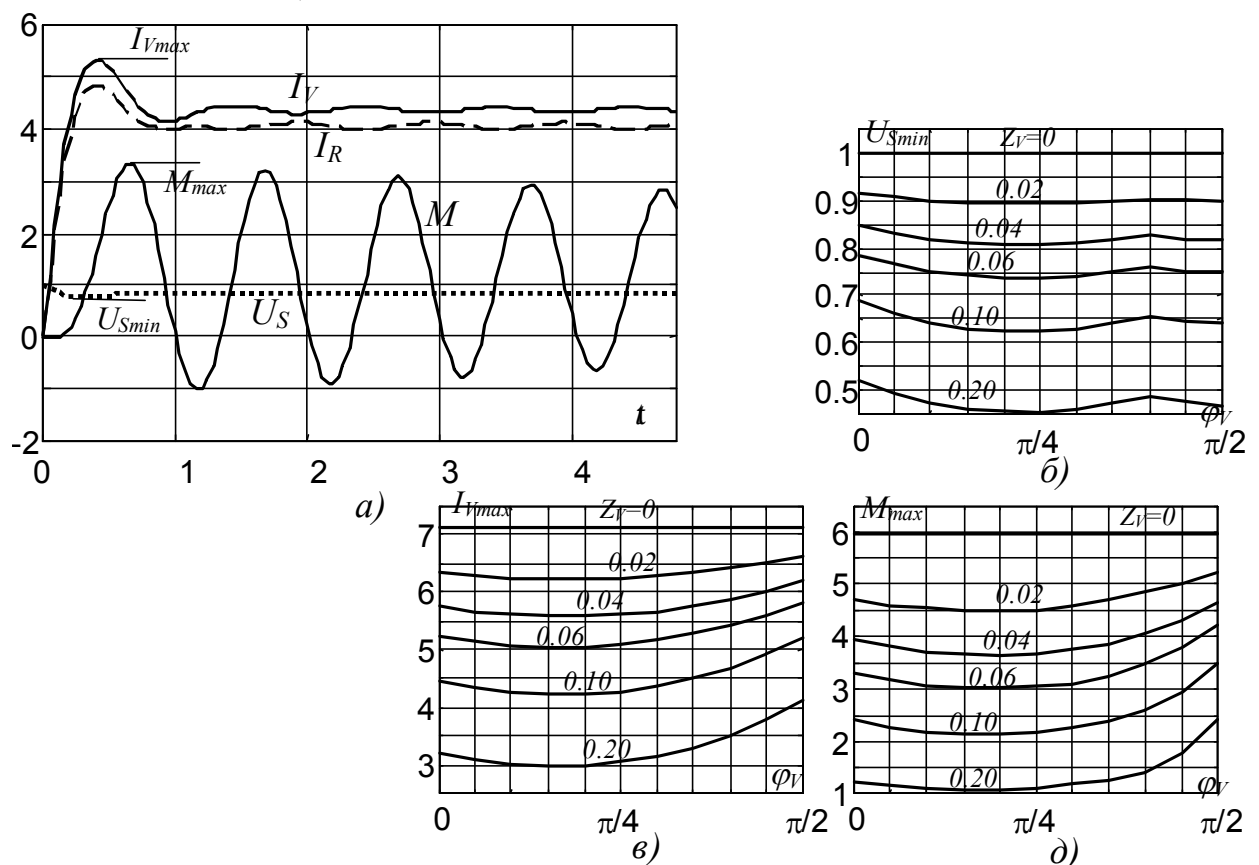


Рисунок 3 – Ударные значения переходных величин при включении в сеть АД, питаемого от протяженной ПЛ, в функции параметров ПЛ

При оценке приемлемости переходного процесса при пуске ЭП с компенсацией в качестве предельно допустимого примем такой его характер (рисунок 3), который соответствует пуску АД при абсолютно жесткой сети ($Z_V = 0$).

При возникновении переходного процесса в ЭП с поперечной компенсацией (см. рисунок 1) сохраняются низкочастотные свободные составляющие, динамика которых определяется параметрами ПЛ и АД и, в отличие от высокочастотных составляющих, не зависит от параметров параллельного КУ [4], а амплитуда колебаний зависит также и от значений элементов вектора \mathbf{B} (6). Следовательно, изменение этих свободных составляющих носит характер, рассмотренный в [2], аналогичный таковому при отсутствии компенсации. Амплитуды колебаний высокочастотных переходных составляющих (затухающих в течение не более одного периода напряжения U_1) также зависят от значений соответствующих элементов вектора \mathbf{B} . При включении ЭП в сеть при нулевых начальных условиях элементы вектора \mathbf{B} значительны, поэтому возникновение напряжения АД (которое является также напряжением на зажимах КУ) вызовет переходный процесс с большими амплитудами токов КУ и ПЛ, обусловленный действием всех четырех свободных составляющих. По мере затухания высокочастотных составляющих амплитуды колебаний снижаются, и дальнейшее протекание переходного процесса определяется низкочастотной составляющей, имеющей наибольшую постоянную времени τ и наименьшую амплитуду.

Зависимости ударных значений переходных электромагнитных величин при пуске ЭП с поперечной компенсацией в функции параметров ПЛ приведены на рисунке 4 (время указано в периодах напряжения). Уровень компенсации, соответствующий значению фазной емкости параллельного КУ, равной $C_K = 3.25$, предназначен для обеспечения оптимального уровня напряжения на зажимах АД в период пуска. Анализ этих зависимостей показывает, что ударные значения токов КУ и ПЛ могут в несколько раз превышать установившиеся значения, превышая при этом допустимые значения, особенно при малых электромагнитной постоянной АД (когда сопротивление ПЛ мало и характеризуется в основном активной составляющей). Можно также показать, что ударные значения величин будут тем выше, чем выше фазная емкость параллельного КУ. В то же время увеличения ударных значений напряжения на зажимах АД, тока и электромагнитного момента АД не наблюдается.

Исходя из приведенного, эффективным способом снижения токовых перегрузок при включении в сеть ЭП с поперечной компенсацией является *использование временной задержки* между моментами включения ЭП (подачи напряжения на зажимы АД) и включения пусковой компенсирующей ступени. Достаточный временной интервал, соответствующий задержке, определяется временем затухания высокочастотных переходных составляющих токов и может составлять, как правило, не менее 1...2 периодов напряжения.

При возникновении переходного процесса в ЭП с продольной компенсацией (см. рисунок 2) по сравнению с ЭП с поперечной компенсацией (см. рисунок 1) отсутствует одна низкочастотная свободная составляющая, другая же характеризуется небольшой амплитудой и имеет наибольшую постоянную времени. Обе высокочастотные составляющие имеют частоту, близкую

к частоте сети, затухают достаточно быстро (в течение 1...2 периодов напряжения) и имеют малые амплитуды. Указанное обуславливает отсутствие колебательного переходного процесса с большими ударными значениями электромагнитных величин при включении ЭП в сеть даже при нулевых начальных условиях, что означает значительное снижение динамических усилий в кинематических звеньях ЭП технологических механизмов и машин.

Зависимости ударных значений переходных электромагнитных величин в функции параметров ПЛ для ЭП с продольной компенсацией приведены на рисунке 5 (время указано в периодах напряжения). Уровень компенсации примерно соответствует случаю полной компенсации реактивной мощности, потребляемой в процессе пуска, выбранная фазная величина шунтирующего сопротивления обеспечивает гарантированное исключение самовозбуждения АД в диапазоне ЧВР от нулевой до подсинхронной (см. рисунок 2). Анализ зависимостей (рисунок 5) показывает, что ударные значения всех величин не превышают допустимых, но в начальный момент пуска возникает значительный провал напряжения на зажимах АД длительностью не более половины периода напряжения.

Переходный процесс при торможении. При отключении ЭП с поперечной компенсацией будет иметь место конденсаторное торможение АД. Характеристическое уравнение соответствующего дифференциального уравнения имеет вид [6]:

$$p^3 + \left(\frac{\alpha_S}{\sigma} + \frac{\alpha_R}{\sigma} - j\omega \right) p^2 + \frac{1}{\sigma} [\alpha_S (\alpha_R - j\omega) + K] p + \frac{K}{\sigma} (\alpha_R - j\omega) = 0, \quad (7)$$

где $\alpha_S = R_S / \sigma L_S$.

Приближенное значение минимального коэффициента затухания определим после подстановки в (7) $p \rightarrow p + j\omega$ и при пренебрежении составляющими с p^2 и p^3 :

$$\alpha_1 = \alpha_R (K - \omega^2) (K - \sigma\omega^2) - \alpha_S \alpha_R \omega^2 (\alpha_S + 2\alpha_R),$$

причем значения параметров АД следует принять такими же, как в режиме короткого замыкания (КЗ) [6]. Самовозбуждение имеет место при соотношении параметров

$$1/(\sigma L_S \omega^2) > C_K > 1/(L_S \omega^2). \quad (8)$$

С помощью (8) может быть определена минимальная фазная емкость КУ, при которой самовозбуждение АД при торможении будет исключено. Эта емкость, как правило, соответствует полной компенсации реактивной мощности, потребляемой ЭП в режиме идеального холостого хода. Как известно [6], в этом случае электромагнитный переходный процесс затухает достаточно быстро (до 10 периодов напряжения) и не сопровождается колебаниями электромагнитных величин недопустимой амплитуды.

Торможение ЭП при использовании продольной компенсации как штатный режим не рассматривается.

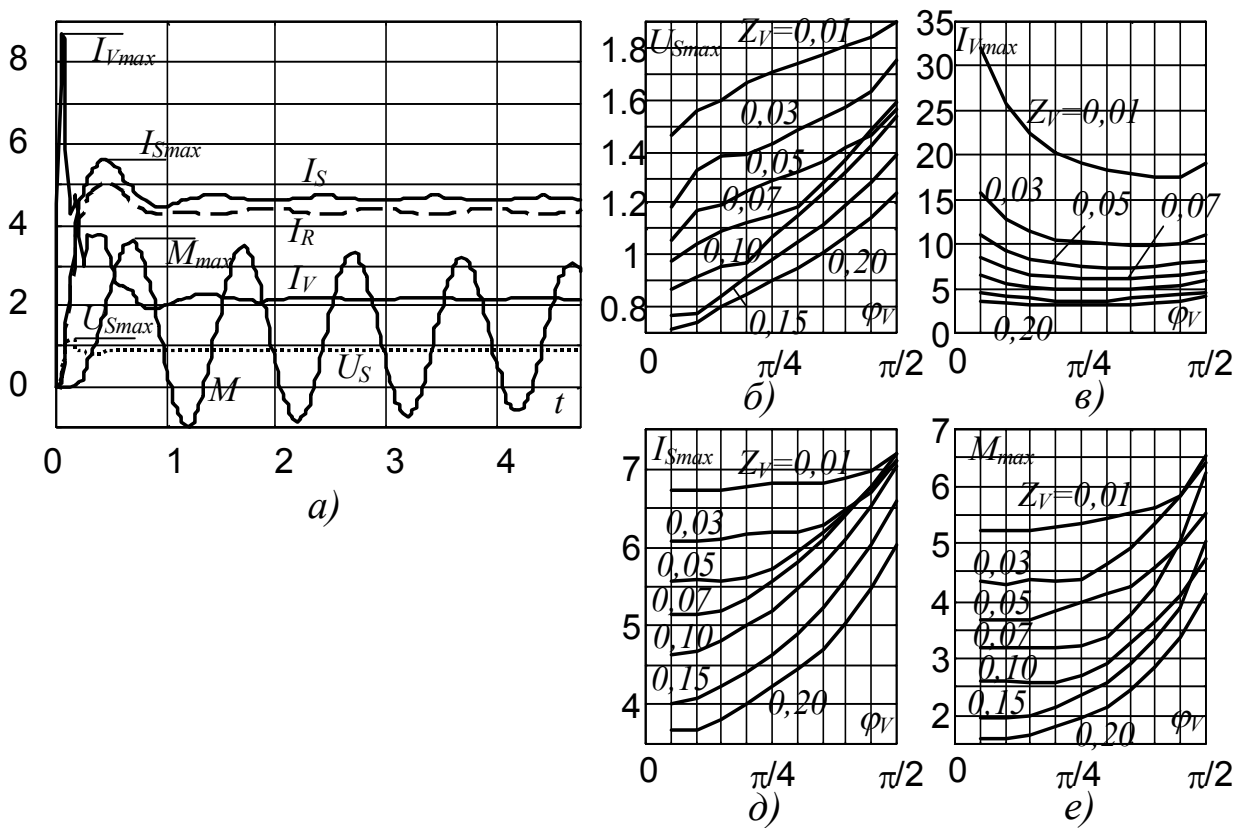


Рисунок 4 – Ударные значения переходных величин при включении в сеть ЭП с поперечной компенсацией в функции параметров ПЛ: $C_K = 3,25$

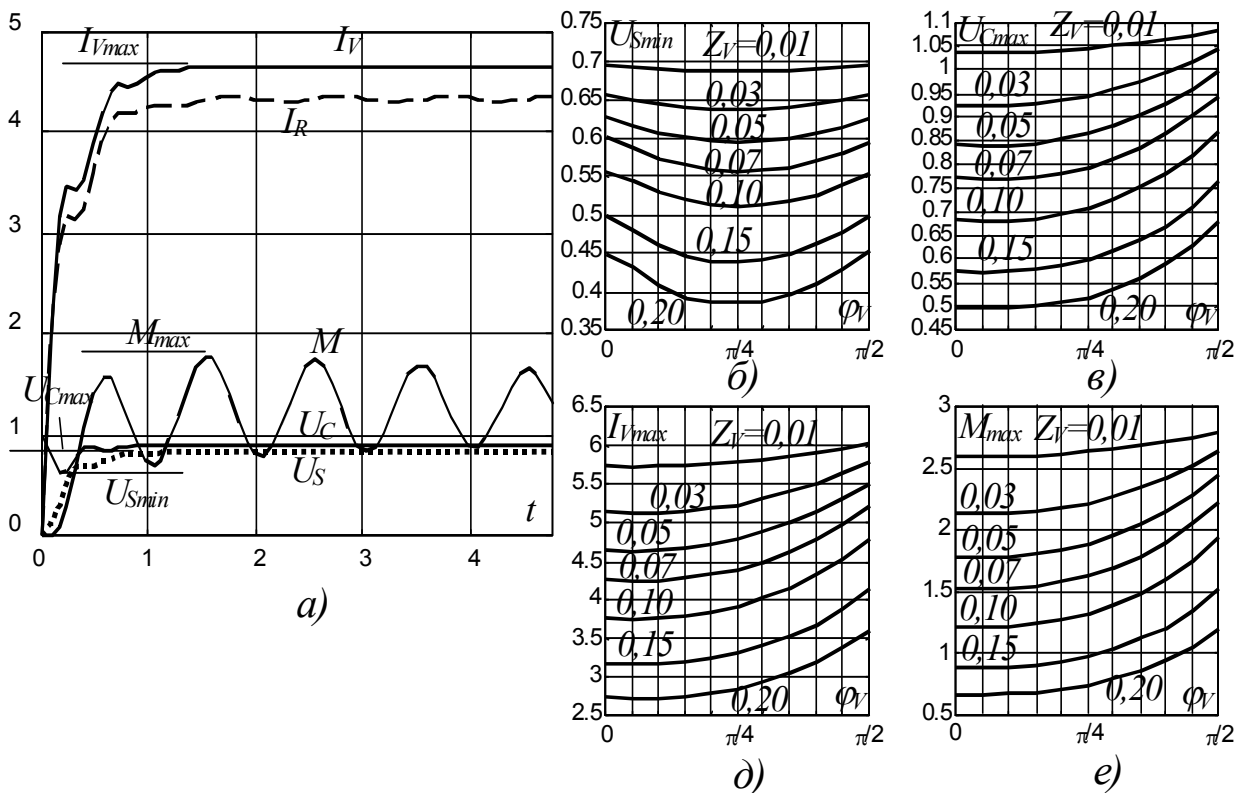


Рисунок 5 – Ударные значения переходных величин при включении в сеть ЭП с продольной компенсацией, в функции параметров ПЛ: $C_P = 4,6$, $R_{uu} = 0,33$

Переходный процесс при коммутации конденсаторных батарей КУ.

При ступенчатом изменении фазной емкости КУ амплитуда колебаний будет тем выше, чем больше разность между векторами установившихся величин в пред- и послекоммутационный периоды, которая может быть оценена с помощью статических характеристик [7]. Характер переходного процесса при коммутации конденсаторных батарей КУ в послепусковой период (при работе АД на линейной части механической характеристики) может быть оценен способом, аналогичным приведенному выше.

В ЭП с компенсацией из-за относительно малого отличия статических характеристик на линейных участках [7] влияние низкочастотных составляющих невелико, в то же время ступенчатое изменение фазной емкости КУ (как параллельного, так и последовательного) обусловит значительное проявление высокочастотных свободных составляющих. С другой стороны, амплитуда колебаний будет тем выше, чем больше разница уровней компенсации (интенсивность затухания и колебательность переходного процесса при этом определяются уровнем компенсации в послекоммутационный период [4]); в рамках одного ЭП – при введении-выведении секции КУ, использующейся на период пуска, обладающей максимальной фазной емкостью. При обеспечении одинаковых уровней напряжения на зажимах АД переходный процесс будет характеризоваться большими начальными амплитудами свободных составляющих при наличии последовательного КУ. При построении ЭП со смешанной (продольной на период пуска и поперечной в установившихся режимах) компенсацией [5] переходный процесс, вызванный выведением последовательного КУ с одновременным введением параллельного КУ, окажется наименее благоприятным.

Сравнительный анализ электроприводов проведен на примере рассматриваемого АД при питании его посредством кабельной ПЛ с параметрами $Z_V = 0,05$, $\varphi_V = \pi/8$. Параметры параллельных или последовательных КУ выбраны для обеспечения напряжения на зажимах АД в режиме КЗ (при пуске) на уровне не ниже $U_S = 0,9U_H$ и обеспечения высокого $\cos\varphi$ в установившихся режимах. Графики переходного процесса, полученные при математическом моделировании пуска АД под номинальной нагрузкой при использовании разных вариантов ЭП, приведены на рисунках 6 и 7 (время в радианах).

Алгоритм управления параллельным КУ (рисунок 6) следующий: в начальный момент введена минимальная степень компенсации мощностью 56 квар, затем с выдержкой 20 рад вводится пусковая компенсирующая степень мощностью 460 квар, по завершении разгона (при достижении током статора АД 1,5-кратного номинального значения и ниже) работает степень мощностью 90 квар.

Последовательное КУ (рисунок 7) номинальной мощностью 650 квар введено на период пуска и выводится при достижении током статора АД 1,5-кратного номинального значения.

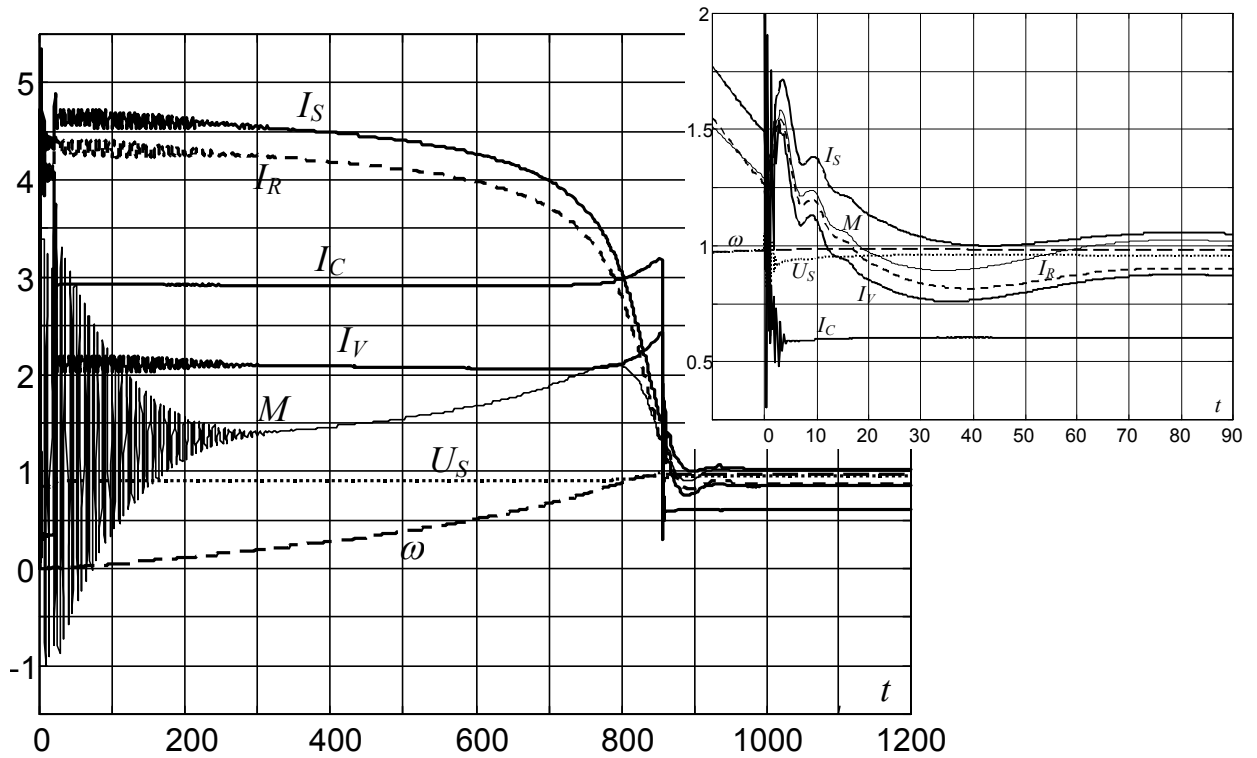


Рисунок 6 – Графики переходных процессов в ЭП с поперечной компенсацией:
 U_S – напряжение на зажимах АД; M – электромагнитный момент АД;
 I_V, I_S, I_R, I_C – токи ПЛ, статора, ротора АД, КУ.

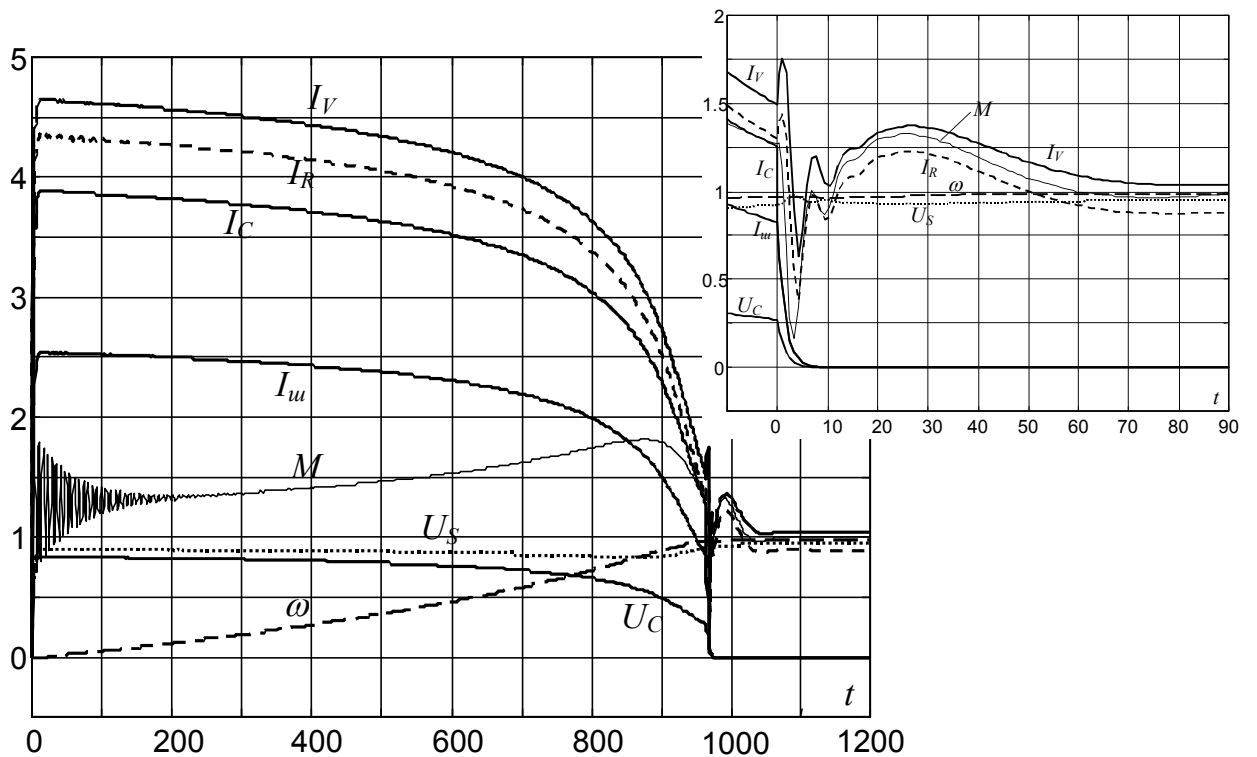


Рисунок 7 – Графики переходных процессов в ЭП с продольной компенсацией:
 U_S – напряжение на зажимах АД; M – электромагнитный момент АД;
 I_V, I_R, I_C, I_u – токи ПЛ (статора), ротора АД, емкостный и активный КУ.

Выводы:

1. Представлены приближенные аналитические выражения, определяющие минимальный коэффициент затухания в функции параметров ЭП и ширину зон самовозбуждения, позволяющие определить параметры КУ, предотвращающие самовозбуждение при разгоне (при использовании продольной компенсации) и при торможении ЭП (при использовании поперечной компенсации).

2. Питающая линия оказывает демпфирующее влияние на переходные процессы в ЭП, которое выражается в том, что при увеличении сопротивления сети и доли активной составляющей этого сопротивления имеет место как увеличение коэффициентов затухания свободных составляющих токов, так и снижение ударных значений токов ПЛ и АД и электромагнитного момента АД при пуске.

3. При наличии параллельно включенной емкости в момент подключения к сети неподвижного АД могут возникать затухающие колебания токов линии и КУ большой амплитуды, длительностью до одного периода питающего напряжения, обусловленные наличием КУ, существенно превышающие установившиеся значения, которые тем больше, чем ниже сопротивление ПЛ, чем меньше доля реактивной составляющей в ее сопротивлении и выше фазная емкость КУ. Эффективными способами исключения указанных колебаний является ограничение фазной емкости параллельного КУ, а также использование временной задержки между моментами подключения ЭП и включения пусковой компенсирующей ступени. При наличии последовательно включенной емкости при подключении к сети неподвижного АД существенно улучшается качество переходного процесса: отсутствуют опасные (недопустимо большой амплитуды) колебания токов и электромагнитного момента.

4. 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 различия параметров КУ в пред- и послекоммутационный периоды (определяющей отличие установившихся параметров послекоммутационного режима от начальных условий).

5. Сравнительный анализ разных вариантов ЭП, обеспечивающих адаптацию АД к условиям питания от протяженной ПЛ, показал, что при рассмотренных параметрах ПЛ и АД: 1) поперечная компенсация обеспечивает более стабильный уровень напряжения на зажимах АД в период пуска, что обуславливает меньшее (примерно на 10%) время разгона ЭП и более качественный переходный процесс при коммутации конденсаторных батарей КУ, но требует дополнительных мер по улучшению качества переходного процесса в момент включения ЭП в сеть; 2) продольная компенсация существенно улучшает качество переходного процесса при включении ЭП в сеть, однако обеспечивает менее стабильный уровень напряжения на зажимах АД в пе-

риод пуска (в частности, существенно снижает перегрузочную способность АД по критическому моменту) и вызывает бо'льшие амплитуды колебаний электромагнитных величин при коммутации конденсаторных батарей КУ.

Список литературы

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. Анализ статических и динамических характеристик асинхронного электропривода при питании двигателя от сети ограниченной мощности / Захарченко П.И., Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С. // Наукові праці ДонДТУ. Серія “Електротехніка і енергетика” – Випуск 29. – Донецьк, ДонДТУ, 2002. – С. 35 – 40.
3. Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С. Математическое моделирование асинхронного двигателя при компенсации реактивной мощности с помощью статических конденсаторов // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 2/2000 (9). – Кременчуг: КГПУ, 2000. – С. 287 – 294.
4. 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.
5. 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 5th International conference UEES'01 (Szczecin and Miedzyzdroje, Poland, 05 – 08 Sep. 2001). – Vol. 3. – Szczecin: Technical University Press, 2001. – Pp. 849 – 854.
6. Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. – М.: Энергия, 1967. – 200 с., с ил.
7. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Чекавский Г.С. Статические характеристики асинхронного электропривода при компенсации реактивной мощности // Вісник СНУ. – № 4 (50). – Луганськ: Видавництво СНУ, 2002. – С. 213 – 223.