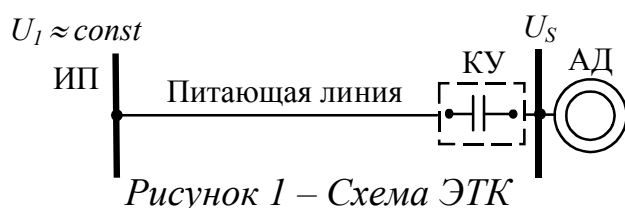


Г.С. Чекавский, канд. техн. наук, ДонНТУ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В УСЛОВИЯХ ПИТАНИЯ ОТ ПРОТЯЖЕННОЙ ЛИНИИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Объект исследований. Случаи питания электроприводов (ЭП) механизмов посредством протяженной питающей линии (ППЛ), обуславливающей снижение напряжения на зажимах приводного электродвигателя, достаточно часты в ряде отраслей промышленности (добывающая, лесоперерабатывающая и др.). Указанное зачастую приводит к существенному ухудшению условий работы ЭП и снижению производительности механизма, и в особенности режимов пуска ЭП. Одним из эффективных способов компенсации падения напряжения в ППЛ является использование продольной емкостной компенсации.

Рассматривается электротехнический комплекс (ЭТК) (рисунок 1), содержащий ППЛ, нерегулируемый ЭП на основе трехфазного низковольтного асинхронного двигателя (АД) и последовательное емкостное компенсирующее устройство (КУ), использование которого на период разгона АД призвано снизить негативное влияние ППЛ на величину U_S напряжения на зажимах двигателя, то есть, в приемлемой степени приблизить значение U_S к величине U_1 напряжение эквивалентного источника питания (ИП), которое может условно считаться неизменным. По завершении разгона ЭП последовательное КУ из работы выводится.



асинхронного двигателя (АД) и последовательное емкостное компенсирующее устройство (КУ), использование которого на период разгона АД призвано снизить негативное влияние ППЛ на величину U_S напряжения на зажимах двигателя, то есть, в приемлемой степени приблизить значение U_S к величине U_1 напряжение эквивалентного источника питания (ИП), которое может условно считаться неизменным. По завершении разгона ЭП последовательное КУ из работы выводится.

По завершении разгона ЭП последовательное КУ из работы выводится.

Состояние вопроса. Содержание исследований. Известны случаи эффективного использования последовательных емкостных КУ фиксированной номинальной мощности для снижения эквивалентного реактивного сопротивления высоковольтных линий электропередач [1], а также для снижения колебаний напряжения при резкопеременной нагрузке. В то же время в распределительных сетях предприятий такие установки широкого распространения не получили ввиду возможности самовозбуждения мощных АД.

Эффективным способом устранения этого недостатка является согласованное регулирование величины эквивалентных активного и реактивного сопротивлений питающей системы, который реализован в многофункциональных устройствах регулирования [2] для местного регулирования напряжения, а также в ряде устройств по обеспечению устойчивости пусков АД [3].

В то же время вопросы общего анализа изменения характеристик отдельного ЭТК, содержащего ППЛ и асинхронный ЭП, при индивидуальном использовании последовательных емкостных КУ, а также выбор параметров КУ с по-

зиции снижения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД не рассматривались. Исследование указанных вопросов и выполняется в этой работе на примере ЭТК (рисунок 1) и ступенчатого регулирования емкости последовательного КУ.

Математическое описание ЭТК и эквивалентная схема замещения. Регулирование величины эквивалентных активного и реактивного сопротивлений рассматриваемого ЭТК можно выполнить путем последовательного или параллельного с емкостью включения дополнительных активных сопротивлений [4] в сочетании с анализом влияния эквивалентных продольных активного и индуктивного сопротивления ППЛ.

Математическое описание ЭТК с учетом допущений о синусоидальности напряжения ИП, отсутствии потерь в стали, электростатического поля в обмотках АД и токов утечки в ППЛ, в стационарной системе координат статора АД $\alpha, \beta, 0$ имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \mathbf{U}_S + (R_V + R_P + L_V p) \mathbf{I}_V + \mathbf{U}_C; \\ \mathbf{I}_V &= (C_P p + R_{uu}^{-1}) \mathbf{U}_C; \quad \mathbf{I}_V = \mathbf{I}_S; \\ p \Psi_S &= \mathbf{U}_S - T_{\sigma S}^{-1} \Psi_S + K_R T_{\sigma S}^{-1} \Psi_R; \\ p \Psi_R &= \mathbf{U}_R - T_{\sigma R}^{-1} \Psi_R + K_S T_{\sigma R}^{-1} \Psi_S + \omega \mathbf{G} \Psi_R; \\ \mathbf{I}_S &= (\sigma L_S)^{-1} (\Psi_S - K_R \Psi_R); \quad \mathbf{I}_R = (\sigma L_R)^{-1} (\Psi_R - K_S \Psi_S); \\ M &= \zeta_H L_m \mathbf{I}_S^T \cdot \mathbf{G} \mathbf{I}_R = M_C + J p \omega. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Исследования выполнены на примере двигателя ВАО2-280L-8 (110 кВт, 660 В, 124 А). При исследованиях использована система относительных единиц с ориентацией на переменные цепи статора и электромагнитную мощность АД: все электромагнитные величины взяты в долях соответствующих номинальных значений, частота вращения ротора – в долях синхронной, время – в радианах, базисные сопротивление – 3,065 Ом, емкость – 1039 мкФ, угол – 1 радиан. Все параметры приведены к цепи статора АД.

В (1) приняты следующие обозначения: $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_C, \mathbf{U}_S, \mathbf{U}_R, \mathbf{I}_V, \mathbf{I}_S, \mathbf{I}_R, \Psi_S, \Psi_R$ – векторы электромагнитных величин – напряжений (\mathbf{U}), токов (\mathbf{I}), потокосцеплений (Ψ) – вида $\mathbf{Y} = [y_\alpha \ y_\beta \ y_0]^T$ [индексы указывают принадлежность к ИП ($\mathbf{1}$), ППЛ (\mathbf{v}), емкости КУ (\mathbf{c}), статору (\mathbf{s}), ротору (\mathbf{r}) АД]; $R_V = Z_V \cos \varphi_V, L_V = Z_V \omega_S^{-1} \sin \varphi_V$ – продольные фазные параметры ППЛ: активное сопротивление и индуктивность; C_P – фазная емкость последовательного КУ; R_P, R_{uu} – активные сопротивления, пофазно включенные соответственно последовательно и параллельно с емкостью с целью снижения возможности самовозбуждения АД; $K_S = L_m L_S^{-1}, K_R = L_m L_R^{-1}$ – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора АД; $T_{\sigma S} = \sigma L_S R_S^{-1}, T_{\sigma R} = \sigma L_R R_R^{-1}$ – постоянные времени цепей статора и ротора АД с учетом рассеяния; $L_S = L_m + L_{S\sigma},$

$L_R = L_m + L_{R\sigma}$ – полные индуктивности статора и ротора АД; L_m – взаимная индуктивность; R_S, R_R – фазные активные сопротивления обмоток статора и ротора АД; $L_{S\sigma}, L_{R\sigma}$ – эквивалентные индуктивности рассеяния статора и ротора АД; $\sigma = 1 - L_m^2 L_S^{-1} L_R^{-1}$ – коэффициент рассеяния; M, M_C – электромагнитный момент АД и момент сопротивления (нагрузки); $\zeta_H = S_{SH}/P_H$ – номинальный параметр АД; J – момент инерции ЭП; ω – частота вращения ротора АД; $p = d/dt$ – символ дифференцирования; \mathbf{G} – постоянный матричный коэффициент.

Соответствующая схема замещения для установившихся режимов представлена на рисунке 2.

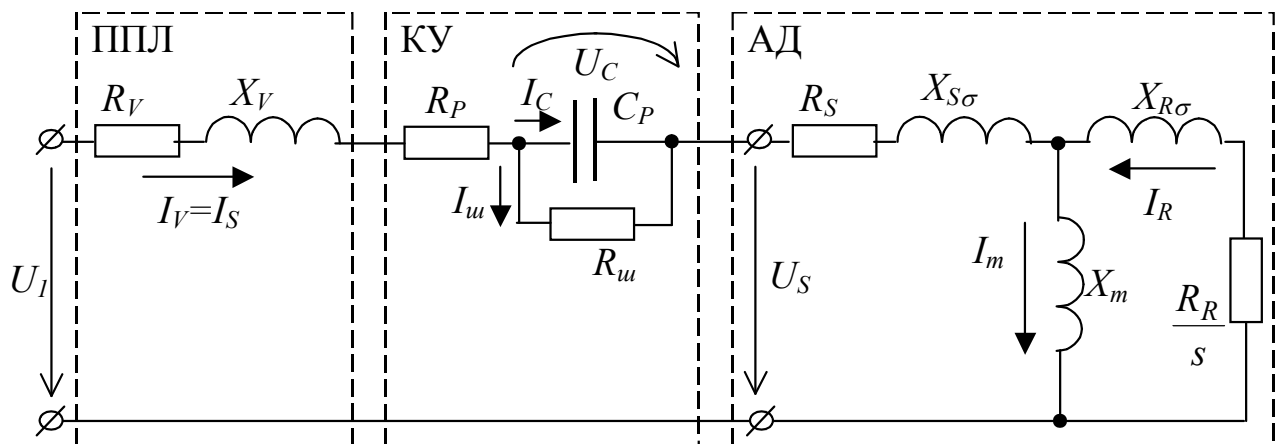
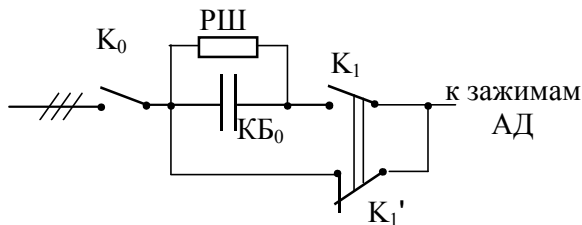


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения ЭТК

Гарантированное исключение самовозбуждения. Динамические свойства ЭТК. Для имеющих место на практике параметров ППЛ при работе АД может иметь место достаточно широкий диапазон частот вращения ротора АД, в котором без принятия специальных мер может развиваться самовозбуждение. Как известно [4], самовозбуждение может не развиваться полностью при достаточно быстром "прохождении" через зону отрицательного демпфирования и разгон АД успешно завершится. Как правило, разгон осуществляется достаточно быстро при пуске АД вхолостую либо при малой нагрузке, а также при малом суммарном моменте инерции ЭП, что нечасто имеет место на практике. Особенности кинематических схем и условия эксплуатации мощных механизмов перечисленных выше отраслей промышленности предполагают, напротив, относительно продолжительное время разгона; кроме того, возникновение самовозбуждения и связанных с этим амплитудных колебаний электромагнитных величин может привести к выходу из строя ряда звеньев кинематической цепи механизма, что чревато, по меньшей мере, простоями.

Указанное свидетельствует о необходимости обеспечения *гарантированного исключения самовозбуждения*: параметры последовательных емкостных КУ должны быть выбраны таким образом, чтобы в рабочем диапазоне частот вращения не создавалось условий для возникновения самовозбуждения АД при любом, даже сколь угодно медленном, темпе изменения ЧВР. Исследования, выполненные в [5], свидетельствуют о необходимости использования в рас-

сма­три­вае­мом ком­плек­се для ис­клю­че­ния са­мо­воз­буж­де­ния имен­но по­фаз­но­го па­рал­лель­но­го с ем­ко­стью вклю­че­ния ак­тив­ных со­про­тив­ле­ний. Со­от­вет­ст­вую­щая струк­ту­ра КУ пред­став­ле­на на рисун­ке 3. Ком­му­та­ци­он­ные ап­па­ра­ты (КА) K_1 и K_1' сбро­ки­ро­ва­ны ме­жду со­бой (за­мы­ка­ние КА K_1 со­пря­же­но с од­но­вре­мен­ным раз­мы­ка­ни­ем K_1').



Рисун­ок 3 – При­нци­пи­аль­ная схе­ма по­сле­до­ва­тель­но­го КУ

ко­то­ро­го вы­браны с це­лью обес­пе­че­ния тре­буе­мой ве­ли­чи­ны на­пря­же­ния в пе­ри­од пу­ска при од­но­вре­мен­ном га­ран­ти­ро­ван­ном ис­клю­че­нии са­мо­воз­буж­де­ния АД. Ток ста­то­ра АД уве­ли­чи­ва­ет­ся до пу­ско­во­го зна­че­ния. При сни­же­нии то­ка АД до у­ров­ня, со­от­вет­ст­вую­ще­го ли­ней­ной ча­сти ха­рак­те­ри­сти­ки (до 1,5...2,0-крат­но­го зна­че­ния но­ми­наль­но­го то­ка) по­сред­ст­вом то­ко­во­го ре­ле КА K_1 раз­мы­ка­ет­ся (за­мы­ка­ет­ся K_1'), та­ким об­ра­зом, осу­ществ­ля­ет­ся вы­ве­де­ние по­сле­до­ва­тель­но­го КУ. Раз­ряд­ка KB_0 по­сле это­го осу­ществ­ля­ет­ся че­рез со­про­тив­ле­ние $R_{ш}$, вы­пол­ня­ю­ще­го в дан­ном слу­чае роль раз­ряд­но­го.

Ана­ли­ти­че­ское оп­ре­де­ле­ние диа­па­зо­на са­мо­воз­буж­де­ния и ве­ли­чи­ны шун­ти­ру­ю­ще­го со­про­тив­ле­ния $R_{ш}$ вы­пол­не­но в [6]. Тем не ме­нее, та­кой спо­соб оп­ре­де­ле­ния яв­ля­ет­ся ве­сью­ма не­удоб­ным при прак­ти­че­ском ис­поль­зо­ва­нии; альтер­на­ти­вой ему мож­но пред­ло­жить и­те­ра­ци­он­ный под­ход, основан­ный на чис­лен­ном ре­ше­нии ха­рак­те­ри­сти­че­ско­го урав­не­ния, ко­то­рое мож­ет быть по­лу­че­но по­сле ли­не­ар­и­за­ции (1) пред­по­ло­же­ни­ем о по­сто­ян­стве ча­сто­ты вра­ще­ния ро­то­ра АД:

$$p^3 + [\alpha_V + \alpha_R \sigma_V^{-1} - j\omega + T_{ш}^{-1}]p^2 + [\alpha_V(\alpha_R - j\omega) + (\beta_{ш} + 1)K + T_{ш}^{-1}(\alpha_R \sigma_V^{-1} - j\omega)]p + (\beta_{ш} + 1)K(\alpha_R - j\omega) = 0, \quad (2)$$

где $\beta_{ш} = (R_V + R_S)R_{ш}^{-1}$; $\alpha_V = (R_V + R_S)(L_V + \sigma L_S)^{-1}$; $\alpha_R = R_R/L_R$;

$$\sigma_V = (L_V + \sigma L_S)(L_V + L_S)^{-1}; K = (L_V + \sigma L_S)^{-1}C_P^{-1}; T_{ш} = R_{ш}C_P.$$

Из­ме­не­ние ди­на­ми­че­ских по­ка­за­те­лей ЭТК (ко­эф­фи­ци­ен­тов за­ту­ха­ния α_i и сво­бод­ных ча­сто­т ω_i) при из­ме­не­нии $R_{ш}$ про­ил­лю­стри­ро­ва­но на за­ви­си­мо­стях рисун­ка 4. Для су­щест­во­ва­ния ста­ти­че­ских ха­рак­те­ри­стик па­ра­мет­ры по­сле­до­ва­тель­но­го КУ дол­жны быть вы­браны та­ким об­ра­зом, что­бы ис­клю­чить воз­ник­но­ве­ние от­ри­ца­тель­но­го дем­п­фи­ро­ва­ния во всем диа­па­зо­не ча­сто­т вра­ще­ния ро­то­ра от ну­ле­вой до син­хрон­ной. Мож­но по­ка­зать, что прак­ти­че­ски для лю­бых зна­че­ний па­ра­мет­ров ЭТК су­щест­ву­ет свое "гра­нич­ное" зна­че­ние со­про­тив­ле­ния $R_{ш} = R_{ш\max}$, при ко­то­ром при од­ной ча­сто­те вра­ще­ния зна­че­ние ми­ни­маль­но­го ко­эф­фи­ци­ен­та за­ту­ха­ния $\alpha_1 = 0$ (что со­от­вет­ст­ву­ет гра­ни­це ста­ти­че­ской ус­той­чи­во­сти), а в ос­таль­ном диа­па­зо­не ча­сто­т вра­ще­ния име­ет место

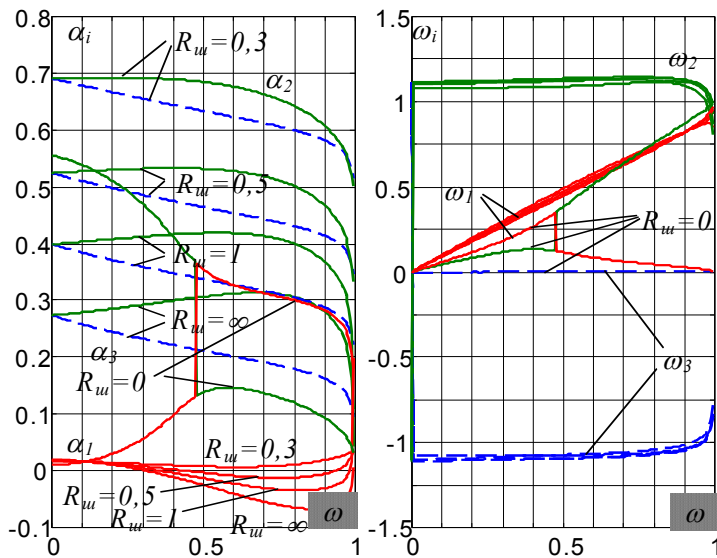


Рисунок 4 – Коэффициенты затухания и частоты вращения векторов свободных токов в функции частоты вращения при разных значениях R_{u1} : $Z_V=0,05$; $\varphi_V=\pi/8$; $C_P=4$.

свободных составляющих условно является низкочастотной, изменяется с частотой, пропорциональной (в относительных единицах) частоте вращения ротора; две другие являются высокочастотными, изменяются с одинаковыми частотами, близкими к частоте сети. Низкочастотная составляющая при условии гарантированного исключения самовозбуждения носит затухающий характер, и

$\alpha_1 > 0$. Алгоритм, осуществляющий поиск значения $R_{u1,max}$, представлен на рисунке 5, его точность зависит от значений заранее заданных переменных max , h_R и h_ω .

Анализ корней уравнения (2) при $R_{u1} = R_{u1,max}$ показывает, что при достаточно медленном изменении частоты вращения ротора АД векторы всех электрических величин (токов, напряжений) будут иметь по три свободных составляющих. Одна из составляющих. Одна из

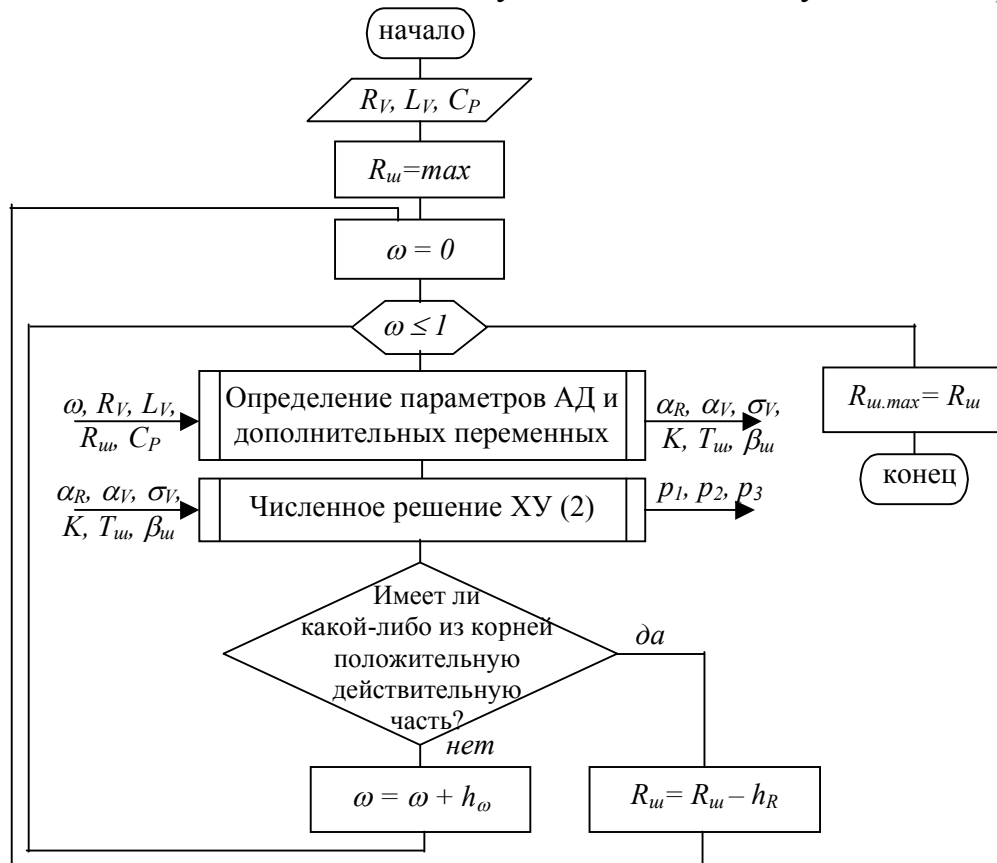


Рисунок 5 – Алгоритм определения максимального из возможных значений R_{u1} , обеспечивающих гарантированное исключение самовозбуждения

характеризуется существенно бо'льшим (по сравнению с высокочастотными составляющими) временем затухания.

Характер переходных процессов, вызванных коммутацией конденсаторных батарей последовательного КУ в штатных режимах (подключение к ИП, выведение КУ), а также их параметры достаточно подробно изложены в [6].

Анализ статических характеристик. После перехода от (1) к математическому описанию в обобщенных векторах [6] можно получить основные выражения для электрических величин ЭТК в установившихся режимах.

Установившийся ток сети:

$$\bar{\mathbf{i}}_{vy} = \bar{\mathbf{G}} \cdot \bar{\mathbf{u}}_1, \quad (3)$$

где

$$\bar{\mathbf{G}} = \frac{(\alpha_R + j\omega_S - j\omega) \times}{-j\omega_S^3 K^{-1} - \omega_S^2 [\alpha_R \sigma_V^{-1} K^{-1} + \beta_{uu} T_{uu} + \alpha_V^{-1} \beta_{uu} - j\omega K^{-1}] + \times (j\omega_S T_{uu} + 1) R_{uu}^{-1}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ j\omega_S \beta_{uu} [T_{uu} (\alpha_R - j\omega) + \alpha_R \alpha_V^{-1} \sigma_V^{-1} + 1 + \beta_{uu}^{-1} - j\omega \alpha_V^{-1}] + (\beta_{uu} + 1) (\alpha_R - j\omega)}{}$$

Установившиеся напряжения на зажимах АД и на емкости КУ:

$$\bar{\mathbf{u}}_{sy} = \frac{j\omega_S (R_S + \alpha_R L_S) + R_S (\alpha_R - j\omega) - \omega_S \sigma L_S (\omega_S - \omega) - R_{uu} \frac{\alpha_R + j(\omega_S - \omega)}{j\omega_S T_{uu} + 1}}{(L_V + \sigma L_S) [-\omega_S^2 + j\omega_S (\alpha_V + \alpha_R \sigma_V^{-1} - j\omega) + \alpha_V (\alpha_R - j\omega)]} \bar{\mathbf{u}}_1; \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_{cy} = (j\omega_S T_{uu} + 1)^{-1} R_{uu} \bar{\mathbf{i}}_{vy}. \quad (5)$$

После представления (4) в виде

$$\bar{\mathbf{u}}_{sy} = f(R_{uu}) \bar{\mathbf{u}}_1$$

исследование функции $|f(R_{uu})|$ при прочих неизменных параметрах (рисунок 6)

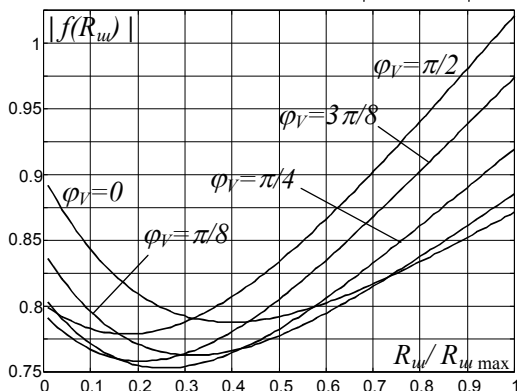


Рисунок 6 – Отношение напряжения на зажимах АД к напряжению ИП в функции сопротивления R_{uu} :

$$Z_V = 0,05; C_p = 4,5; \omega = 0.$$

Показывает, что достижение максимального эффекта от использования продольной компенсации с соблюдением принципа гарантированного исключения самовозбуждения имеет место при значении шунтирующего активного сопротивления $R_{uu} = R_{uu \max}$; в то же время при большой доле активного сопротивления в полном сопротивлении ППЛ (при весьма малых углах φ_V) использование такой емкостной компенсации может вообще не приводить к улучшению характеристик рассматриваемого ЭТК. Поэтому имеет смысл выполнить анализ статических характеристик, определяемых выражениями (3) – (5), именно при указанном значении шунтирующего сопротивления.

Зависимости амплитуд электрических величин ЭТК в функции фазной емкости последовательного КУ (*количественные зависимости*) для режима короткого замыкания (КЗ) ($\omega = 0$) представлены на рисунках 7 и 8. Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- значение фазной емкости последовательного КУ, при котором имеет место полная компенсация реактивных токов ППЛ, потребляемых ЭП в режиме КЗ, мало зависит от параметров ППЛ;
- снижения влияния ППЛ на величину напряжения на зажимах АД в режиме КЗ можно достичь при значениях фазной емкости, определяющих *технически эффективный диапазон значений*, соответствующих частичной компенсации потребляемой реактивной мощности (РМ) (это подтверждает предположения, сделанные в [5]);
- величина РМ, генерируемой конденсаторной батареей последовательного КУ, с учетом величины напряжения на ее зажимах в диапазоне эффективных значений фазной емкости последовательного КУ не превышает номинального значения;
- возможности для эффективного использования продольной компенсации расширяются при увеличении угла φ_V , то есть, при увеличении доли реактивной составляющей в сопротивлении ППЛ.

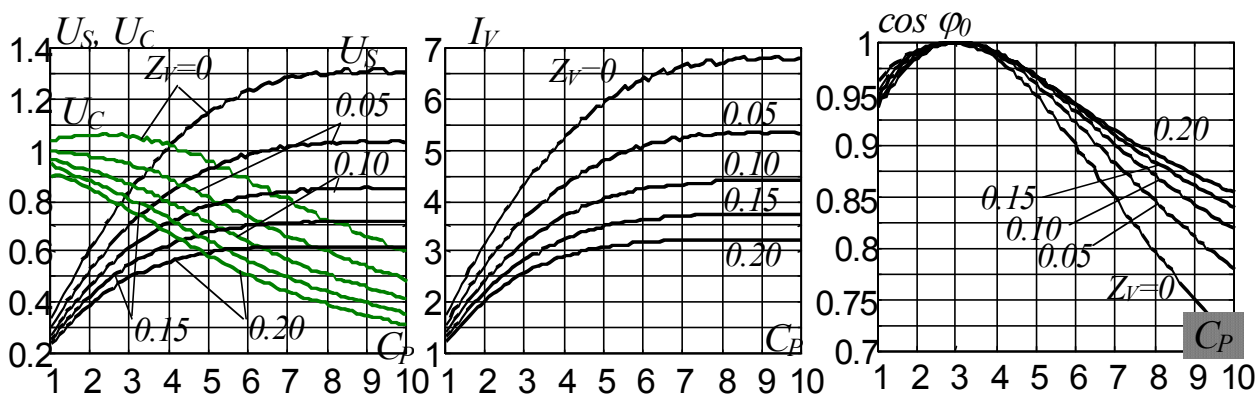


Рисунок 7 – Количественные зависимости для режима КЗ

($\omega = 0$; $\varphi_V = \pi/8$; $R_{ii} = R_{ii \max}$)

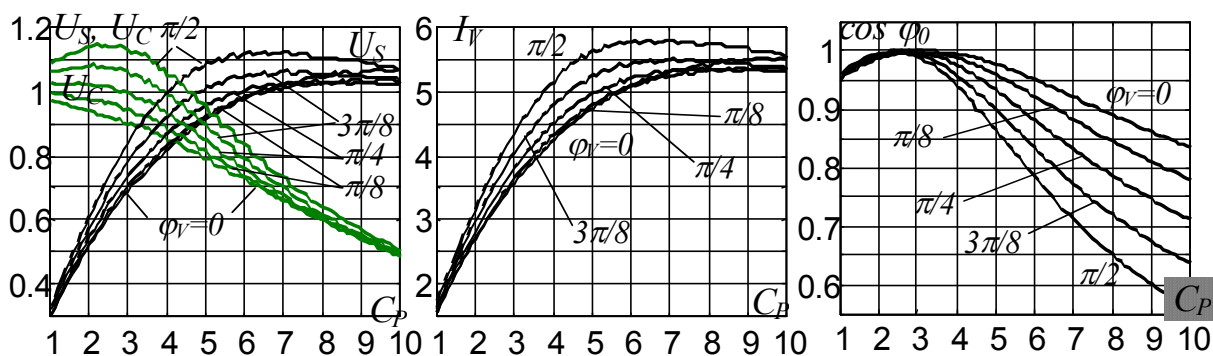


Рисунок 8 – Количественные зависимости для режима КЗ

($\omega = 0$; $Z_V = 0,05$; $R_{ii} = R_{ii \max}$)

Зависимости амплитуд электрических величин ЭТК в функции частоты вращения ротора АД представлены на рисунках 9 – 11. Совокупный анализ представленных статических характеристик показывает достаточность и целесообразность использования одной ступени компенсации для снижения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД в диапазоне частот вращения ниже критической. Кроме того, выбор фазной емкости КУ, исходя из необходимости обеспечения требуемого уровня напряжения на зажимах АД в режиме

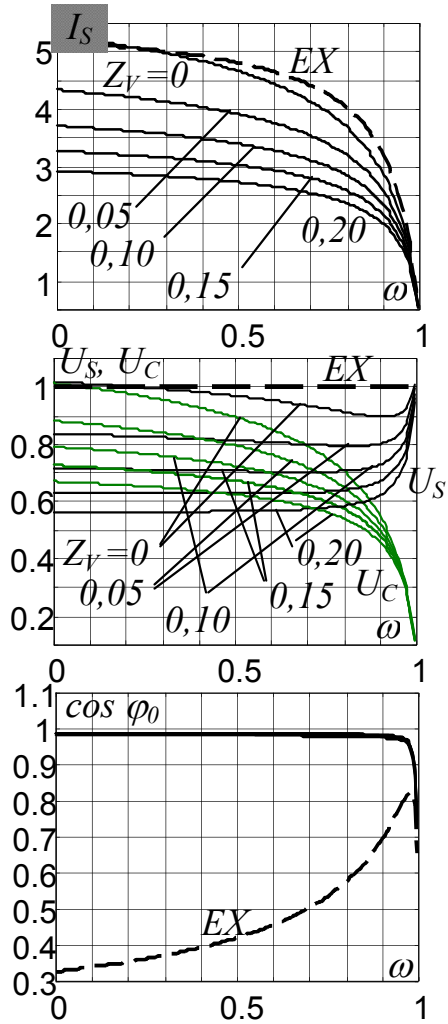


Рисунок 9 – Статические характеристики при разных сопротивлениях ППЛ ($\varphi_V = \pi/8$; $C_P = 4$; $R_{u1} = R_{u1max}$).

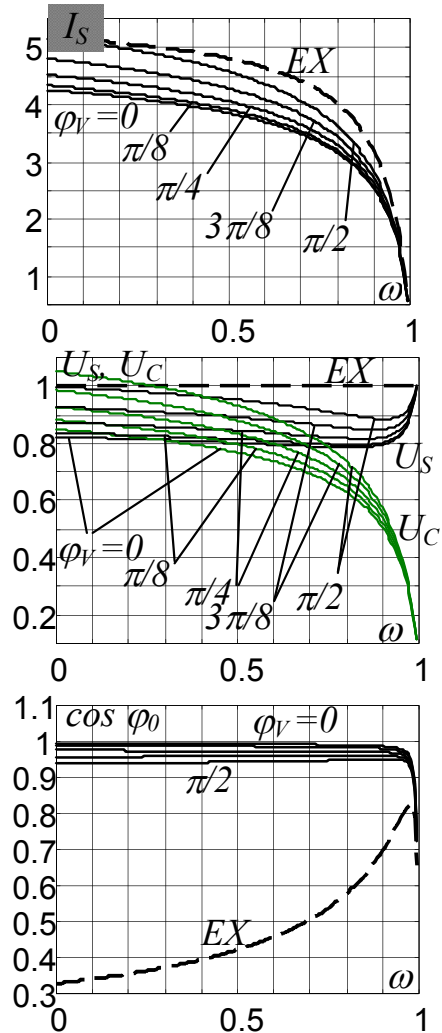


Рисунок 10 – Статические характеристики при разных углах ППЛ ($Z_V = 0,05$; $C_P = 4$; $R_{u1} = R_{u1max}$).

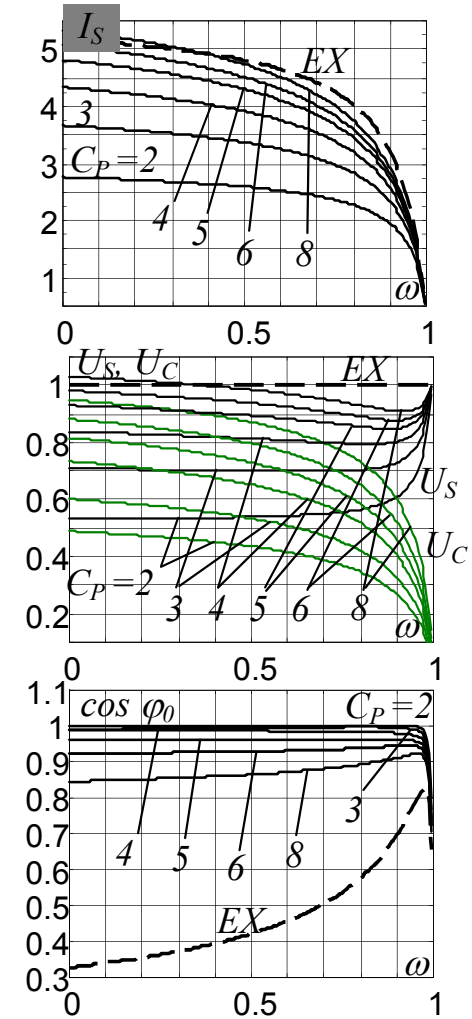


Рисунок 11 – Статические характеристики при разных фазных емкостях КУ ($Z_V = 0,05$; $\varphi_V = \pi/8$; $R_{u1} = R_{u1max}$).

КЗ, обеспечивает примерно постоянный уровень напряжения на зажимах АД на весь период работы последовательного КУ. Наибольшее отклонение напряжения от желаемого уровня в этом случае имеет место при частотах вращения, близких к критической, особенно при малых углах φ_V (при большой доле активной составляющей в полном сопротивлении ППЛ).

Оценка эффективности снижения влияния ППЛ. Такая оценка может быть выполнена с использованием количественных зависимостей, определяющих в функции параметров ППЛ фазную емкость последовательного КУ, необходимую для обеспечения желаемого уровня напряжения на зажимах АД [7] при гарантированном исключении самовозбуждения АД путем предварительного выбора значения шунтирующего активного сопротивления $R_{ш} = R_{ш \max}$ с помощью алгоритма, представленного на рисунке 5.

Такие зависимости для режима КЗ представлены на рисунках 12 и 13. Кривая ОК (рисунок 13) ограничивает сверху значения параметров ППЛ, при которых желаемый уровень напряжения на зажимах АД обеспечивается и при отсутствии компенсации. Анализ зависимостей позволяет сделать выводы:

- возможности полного исключения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД ограничиваются при увеличении сопротивления ППЛ, а также при снижении доли активной составляющей в полном сопротивлении ППЛ;
- снижение влияния ППЛ возможно в более широком диапазоне сопротивлений линии, однако также ограничивается при увеличении сопротивления ППЛ, а также при снижении доли активной составляющей в полном сопротивлении ПЛ.

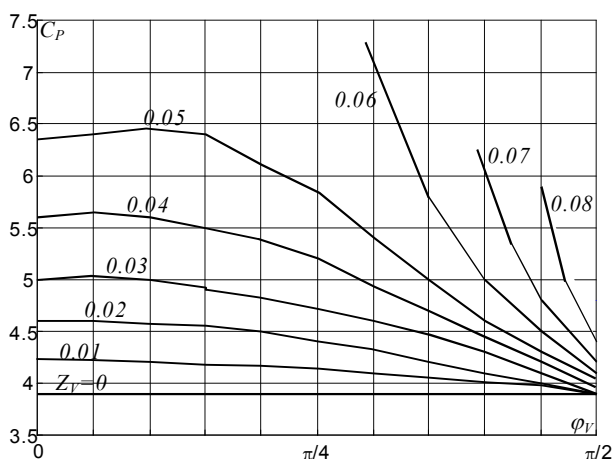


Рисунок 12 – Уровни компенсации для полного исключения влияния ППЛ ($U_S = 1$) в режиме КЗ ($\omega = 0$), в функции параметров ППЛ

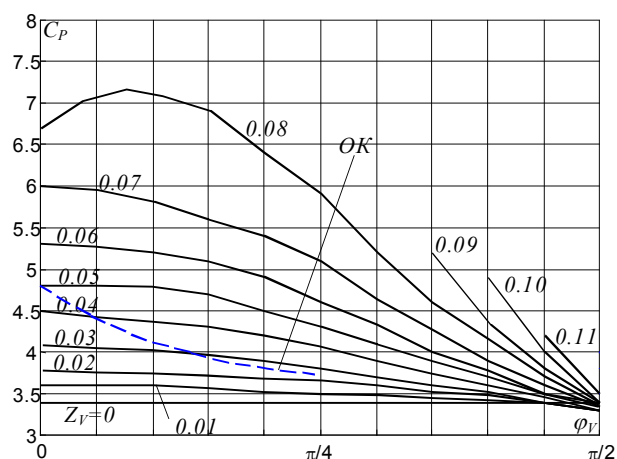


Рисунок 13 – Уровни компенсации для снижения влияния ППЛ ($U_S = 0,9$) в режиме КЗ ($\omega = 0$), в функции параметров ППЛ

С точки зрения экономической целесообразности частичное снижение влияния ППЛ при обеспечении достаточного уровня напряжения на зажимах АД является более рациональным, чем полное исключение указанного влияния, и в большинстве случаев – более целесообразным.

Пример математического моделирования. Графики переходных процессов в рассматриваемом ЭТК при использовании на период пуска АД продольной емкостной компенсации, представлены на рисунке 14 а,б,в ($Z_V = 0,05$, $\varphi_V = \pi/4$). Графики отражают динамику изменения электромагнитных величин в период разгона АД. На рисунке 14,а представлены зависимости амплитуд результирующих векторов в функции времени, а на рисунках 14 б,в – мгновенные значения фазных напряжения на зажимах АД и тока ППЛ соответственно.

Конденсаторная батарея последовательного КУ имеет номинальную РМ 685,9 квар, что несколько ниже величины РМ, потребляемой АД в режиме КЗ, и позволяет обеспечить примерно 10%-ное отклонение напряжения на зажимах АД в период пуска. Примерная стабильность уровня напряжения на зажимах АД достигается за счет использования последовательного КУ с большей РМ в режиме КЗ: обеспечивается 7%-ное отклонение напряжения в режиме КЗ, но существенно большее (более 14%) – в зоне критического скольжения.

При подключении ЭТК к ИП высокочастотные колебания электромагнитных величин практически компенсируют друг друга, чем обеспечивается хорошая динамика переходных процессов в этом режиме. Выведение последовательного КУ при завершении разгона не приводит к появлению колебаний электромагнитных величин недопустимой амплитуды, но сопровождается значительным их снижением. Снижение напряжения на зажимах АД при этом не приводит к нарушению устойчивости АД ввиду относительно малой продолжительности указанного переходного процесса и достаточного значения избыточного (разгонного) электромагнитного момента АД.

Выводы:

1. В ЭТК "ППЛ – асинхронный ЭП" при использовании продольной емкостной компенсации обобщенные векторы всех электрических величин в переходных режимах имеют по три свободных составляющих, одна из которых может обуславливать возможность возникновения в определенном диапазоне частот вращения ротора АД самовозбуждения. Эффективным способом его исключения в рассматриваемом ЭТК является включение параллельно с последовательно включенной емкостью КУ активных сопротивлений.

2. Представлен алгоритм, позволяющий определить значение активного сопротивления, шунтирующего последовательно включенную емкость, при котором, а также при всех меньших его значениях, в диапазоне частот вращения ротора АД от нулевой до синхронной гарантированно не будет развиваться самовозбуждение двигателя.

3. Максимальной эффективности использования продольной емкостной компенсации при условии гарантированного исключения самовозбуждения АД возможно достичь при значении шунтирующего активного сопротивления, равного максимальному из ряда его значений, при которых будет исключено самовозбуждение АД во всем диапазоне рабочих частот вращения.

4. Теоретически снижения влияния ППЛ на величину напряжения на зажимах АД в режиме КЗ можно достичь при значениях фазной емкости, соответствующих частичной компенсации потребляемой РМ.

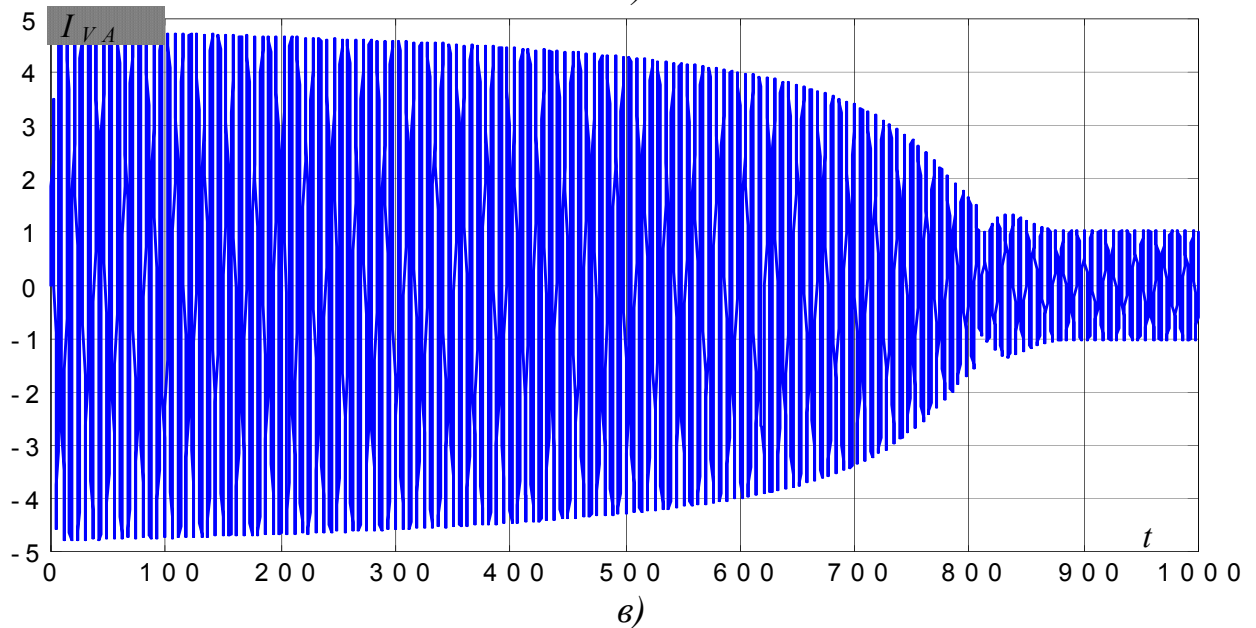
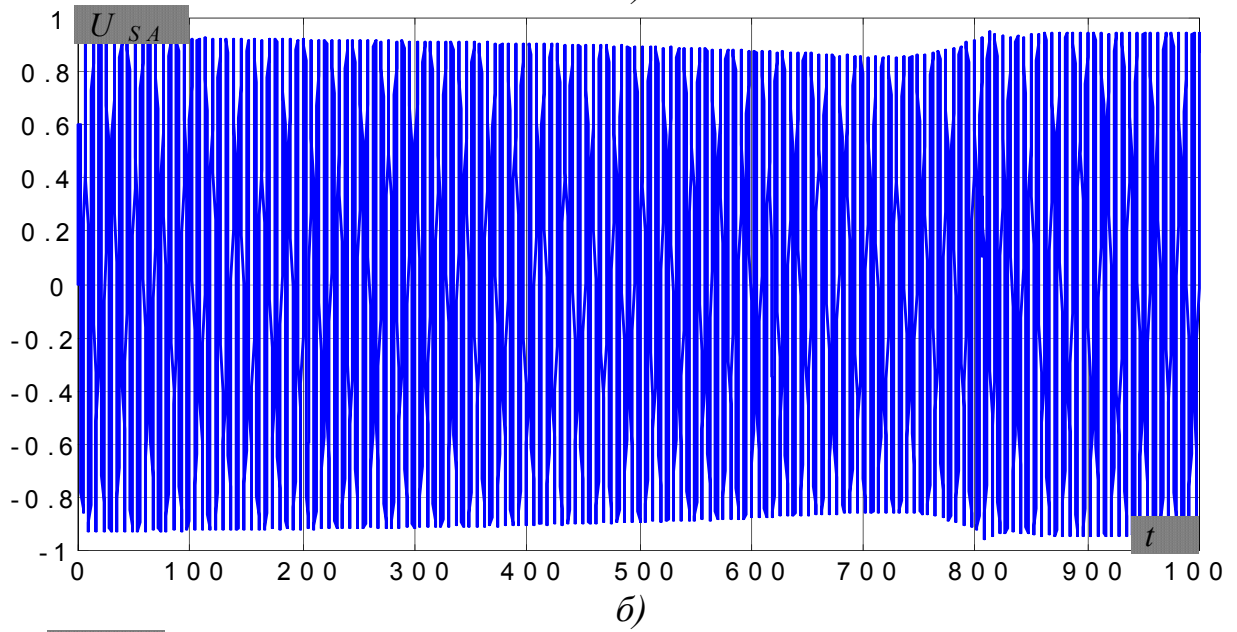
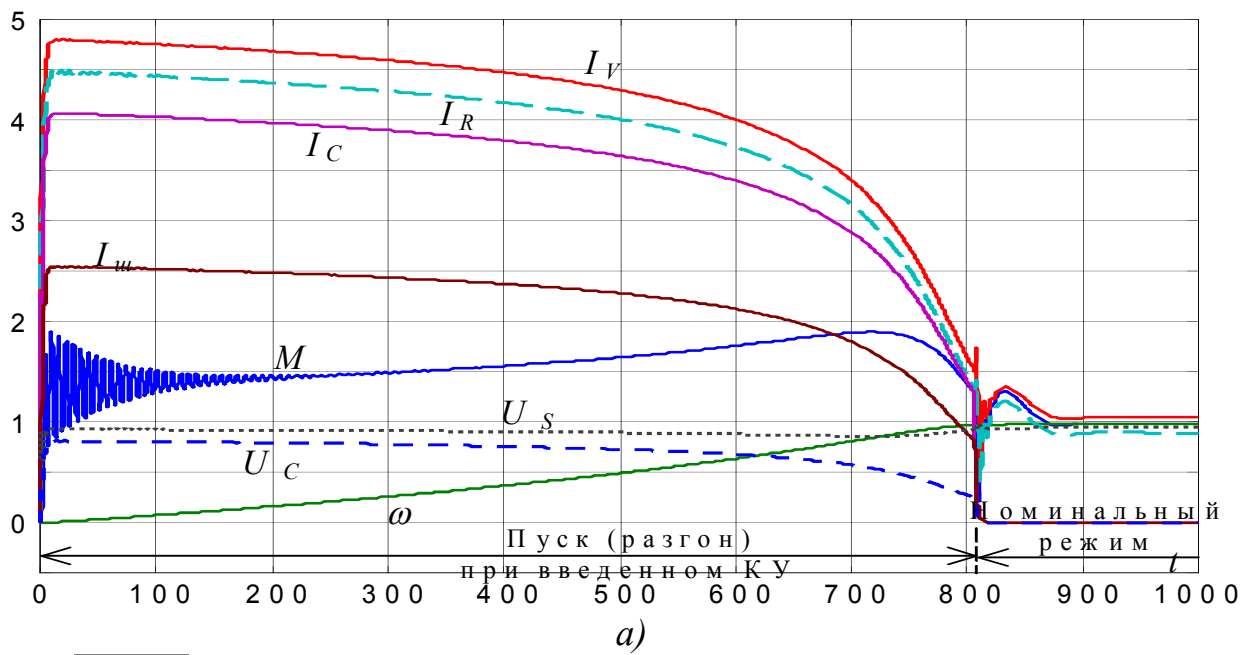


Рисунок 14 – Результаты математического моделирования

5. Для снижения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД в диапазоне малых частот вращения ротора достаточно использовать одну компенсирующую ступень. При этом, при выборе фазной емкости КУ, исходя из необходимости обеспечения требуемого уровня напряжения на зажимах АД в режиме КЗ, будет обеспечен примерно стабильный уровень напряжения на зажимах АД, а максимальное снижение напряжения будет наблюдаться в области критической частоты вращения.

6. Возможности эффективного снижения негативного влияния ППЛ на работу ЭП ограничиваются при увеличении сопротивления ППЛ, а также при снижении доли активной составляющей в полном сопротивлении ППЛ.

7. Использование продольной емкостной компенсации для снижения влияния ППЛ на уровень напряжения на зажимах АД при условии гарантированного исключения самовозбуждения обеспечивает хорошую динамику переходных процессов при пуске. Выведение последовательного КУ при завершении разгона не приводит к появлению колебаний электромагнитных величин недопустимой амплитуды, но сопровождается значительным их снижением, которое не приводит к потере устойчивости АД ввиду относительно малого его продолжительности и достаточного значения электромагнитного момента.

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 Харківського державного технічного університету. Збірка наукових праць*. – Тематичний випуск 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. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с., ил.

5. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Чекавский Г.С. Статические характеристики асинхронного электропривода при компенсации реактивной мощности // *Вісник Східноукраїнського національного університету*. – № 4 (50). – Луганськ: Видавництво СНУ. – 2002. – С. 213 – 223.

6. Чекавский Г.С. Переходные процессы в асинхронном электроприводе при адаптации к условиям питания от протяженной линии // *Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научн. тр. УкрНИИВЭ*. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – С. 173 – 184.

7. Чекавский Г.С. Минимизация влияния питающей сети на работу асинхронного электропривода при ступенчатой поперечной компенсации реактивной мощности // *Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научн. тр. УкрНИИВЭ*. – Донецк: Юго-Восток. – 2002. – С. 144 – 157.