

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ВЕКТОРНЫМ ПОЛЕОРИЕНТИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**Клименко Ю.М., Садовой А.В., Клименко Ю.Ю.**

**Днепродзержинский государственный технический университет**

Разработка новых технологий, автоматизация и интенсификация производственных процессов во многом определяют направления развития теории и практики современного электропривода (ЭП). Одним из таких направлений является проблема создания интегрированных с технологическим оборудованием управляемых силовых электромеханических модулей (СЭМ) для систем точного воспроизведения сложных движений (ТВСД). Характерными требованиями, которым должны соответствовать эти модули и их системы управления (СУ), являются:

- уровень управляемости и гибкость настройки, позволяющие обеспечить сложные, оперативно изменяемые графики движения и режимы работы систем ТВСД;
- высокие требования к статической и динамической точности воспроизведения задающих воздействий;
- низкая чувствительность СУ к возмущающим воздействиям и параметрической нестационарности объекта управления (ОУ);
- оптимальный уровень энергопотребления, высокая экономичность;
- длительный ресурс работы и приемлемая стоимость;
- уровень модульности и унификации, обеспечивающий высокую ремонтоспособность СЭМ.

Как показала практика последних лет, устойчивой тенденцией при создании СЭМ является применение бесконтактных асинхронных электроприводов (АЭП). Конкурентоспособность таких электроприводов по отношению к лучшим образцам глубоко регулируемых электроприводов постоянного тока и наиболее эффективное использование высоких регулировочных возможностей АЭП могут быть достигнуты при построении СУ АЭП по принципу векторного полеориентированного управления (ВПУ) и использовании силового транзисторного преобразователя (СТП).

Последние достижения в области силовой электроники: разработка и освоение в 1999-2000г. ОАО «Электровыпрямитель» производства более 60-ти типов одиночных модулей и полумостов на основе IGBT биполярных транзисторов с изолированным затвором на токи до 2400А, напряжением до 3300В; реализация перспективной концепции повышения уровня интеграции силовых элементов в одном модуле, начатая путем подготовки к выпуску шестиключевых IGBT модулей со структурой и корпусами, аналогичными выпускаемым зарубежными фирмами сборкам

ECONOPACK 2-3, позволяют с уверенностью констатировать, что недавние проблемы построения СТП, соответствующих требованиям систем ВПУ для двигателей мощностью до 150 кВт и более, могут быть эффективно решены применением отечественных силовых компонентов.

Создание АЭП с ВПУ, обладающих практически неограниченными функциональными возможностями, на данном этапе развития и внедрения систем векторного управления АД требует окончательного решения:

- задач выбора структур СУ;
- проблем информационного, алгоритмического и программного обеспечения системы;
- вопросов увязки применяемых алгоритмов управления (АУ) с выпускаемыми сигнальными процессорами и программируемыми логическими матрицами.

Не смотря на высокий уровень теоретических проработок и обоснованную во многих публикациях перспективность использования таких систем, количество разработок АЭП с ВПУ, доведенных до уровня серийного производства крайне незначительно, а область их применения ограничена лишь опытными образцами. В силу перечисленных причин на внутреннем рынке страны образовался серьезный дефицит серийно выпускаемых отечественной промышленностью АЭП с ВПУ для систем ТВСД. Значительная доля постоянно растущего спроса удовлетворяется за счет управляемых АЭП импортного производства, имеющих высокую стоимость. Выполнение этих АЭП по принципам частотного или частотно-токового управления не позволяет получить высокое качество управления координатами, достигаемое при ВПУ. Эти электроприводы имеют «закрытое» от перепрограммирования программное обеспечение, исключающее изменение структуры и адаптацию СУ и СТП под конкретно выполняемые задачи ТВСД.

Цель статьи: обобщение опыта создания АЭП с ВПУ, накопленного при выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИР кафедрой электрооборудования ДГТУ; обсуждение результатов разработки и исследования новых АУ, синтезированных на основе оригинальных математических моделей АД, вопросов технической реализации синтезированных АУ.

При синтезе АУ СЭМ, выполненных на основе глубоко регулируемых АЭП с ВПУ, получение требуемого качества воспроизведения задающих воздействий невозможно без учета нелинейного, многосвязного характера АД как ОУ, нестационарности его параметров, обусловленной изменениями количественных связей между

параметрами в статических и динамических режимах работы при нагреве машины, изменениях насыщения магнитопровода и вытеснении тока. При создании АЭП СЭМ, соответствующих повышенным требованиям к точности, глубине и плавности регулирования, неприемлемым оказывается применение методов анализа и синтеза, применяемых в линейной теории управления. Решение задачи синтеза АУ для ОУ с нестационарными свойствами и функционирующих в условиях действия возмущающих воздействий, может быть осуществлено при построении СУ в классе нелинейных систем, работающих в скользящем режиме (СР).

За последние годы разработано множество вариантов систем ВПУ различной сложности, отличающихся применяемыми АУ, ОКБ по векторам потокосцеплений  $\Psi_A^o$  статора, ротора или воздушного зазора ( $A = s, m$  или  $r$ ), составом СУ и их информационно - датчиковых структур (ИДС). Использование различных вариантов ОКБ, выбираемых прежде из соображений удобства измерения вычисления  $\Psi_A^o$ , упрощения технической реализации АЭП с ВПУ и снижения чувствительности СУ к изменениям параметров АД в последнее время превращается в инструмент оптимизации таких технико-экономических показателей АЭП, как перегрузочная способность по моменту, жесткость характеристик, К.П.Д., степень использования магнитных материалов и габаритной мощности.

Применение СЭМ механизмов ТВСД, осуществляющих сложные циклически повторяющиеся движения в робототехнике, металлообработке и текстильной промышленности, позволяет обеспечить выполнение характерных для таких механизмов требований оптимизации показателей в статических и в динамических режимах работы путем изменений ОКБ в соответствии с их программным чередованием. Синтез АУ выполним по методике [1], основанной на концепции А.М.Ляпунова об устойчивости возмущенного движения. В соответствии с этой методикой формулируется, а затем с применением вариационных методов решается задача аналитического конструирования оптимальных регуляторов, обеспечивающих минимум интегральных квадратичных отклонений траекторий движения от траекторий, заданных программно.

Расчетную математическую модель АСПЭ

составим на основе модели [2] АД при ВПУ, отличающейся от известных структурой вычислений, унифицированной для вариантов ориентации координатного базиса (ОКБ) по одному из потокосцеплений статора, ротора или воздушного зазора:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_A^0}{dt} &= -C1T_r^{-1} \cdot \Psi_A^0 + C2 \cdot i_{su} + C3(L_s')^{-1} U_{su} + \\ &+ C1C3\omega_{sv} \\ \frac{di_{su}}{dt} &= C4i_{su} + (L_s' T_r)^{-1} \Psi_A^0 + (L_s')^{-1} U_{su} - \\ &- (C3(L_s')^{-1} \omega - \omega_{\Psi^0})_{sv} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= J^{-1} (M - M_c) = (C5\Psi_{A'sv}^0 i_{sv} - M_c) J^{-1} \\ \frac{di_{sv}}{dt} &= -C4i_{sv} + (L_s')^{-1} U_{sv} - (L_s')^{-1} \omega \cdot (\Psi_A^0 - \\ &C3i_{su}) - \omega_{\Psi^0} i_{su} \end{aligned}$$

где  $U_s, I_s$  - изображающие векторы напряжений и токов статора в системе координат (СК)  $UV0$ , ориентированной по вектору потокосцепления  $\Psi_A^o$  ( $A = s, r$  или  $m$ ) при выполнении условий ориентации:  $\Psi_{AU}^o = \Psi_A^o, \Psi_{AV}^o = 0$  и  $\omega_{\Psi^0} = \omega_k$ ;  $C1 \div C5$  - коэффициенты из таблицы, выбираемые в соответствии с желаемой ОКБ;  $L_s', T_r$  - параметры АД;  $M, M_c$  и  $J$  - моменты АД, сопротивления механизма и инерции;  $\omega, \omega_k$  и  $\omega_{\Psi^0}$  - угловые скорости вращения ротора, базисной системы координат и ориентирующего вектора  $\Psi_A^o$ .

В процессе синтеза получены АУ АЭП с ВПУ:

$$\begin{aligned} U_{pc} &= U_{m1} \text{sign}(U_{pp} - \omega - k_1 i_{sv}) \\ U_{pat} &= U_{m2} \text{sign}(U_{pc} - i_{sv}) \\ U_{prt} &= U_{m3} \text{sign}(\Psi_A^0 - \Psi_A^{0*} - k_2 i_{su}) \\ U_{ppt} &= U_{m4} \text{sign}(U_{prt} - i_{su}) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k_1, k_2$  - коэффициенты, устанавливаемые для выбранного варианта ОКБ;  $\Psi_A^{0*}, \omega^*$  - задающие воздействия на входах СУ;  $\Psi_A^o$  - сигнал наблюдателя координат потока (НК);  $\omega$  - сигнал тахогенератора;  $U_{m1} \div U_{m4}$  и  $U_{(*)}$  - амплитуды реле и выходные напряжения регуляторов ( $*$ ) скорости (PC), потокосцепления (PP), активного (PAT) и реактивного (PPT) токов. На рис.1 представлена функциональная схема системы ВПУ АЭП с АУ (2) в состав которой входят: контуры регулирования координат механического движения КРМ и

Таблица 1

Коэффициенты в (1)	Ориентирующий вектор системы $\Psi_A^o$		
	$\Psi_A^o = \Psi_s$	$\Psi_A^o = \Psi_r$	$\Psi_A^o = \Psi_m$
C1	0	1	$1 - k_r L_{\sigma r} / L_s'$
C2	$L_s'$	0	$k_r L_{\sigma r}$
C3	$-R_s$	$R_r k_r^2$	$k_r (R_r L_{\sigma s} - R_s L_{\sigma r}) / L_s'$
C4	$(R_s + R_r k_r / k_s) / L_s'$	$(R_s + R_r k_r^2) / L_s'$	$(R_s + R_r k_r) / L_s'$
C5	$mz_p / 2$	$mz_p k_r / 2$	$mz_p / 2$

потокосцепления КРП; модель контура тока МКТ; преобразователи координат ПК1 ÷ 4; КФФТ, состоящий из релейных регуляторов токов РФТ, блока логики БЛ, СТП, датчиков токов ДФТ. Контурь КРМ и КРП содержат релейные регуляторы скорости РС, потокосцепления РП, активного РАТ и реактивного РРТ токов.

ИДС системы составляют ДФТ, датчик частоты вращения ДС и наблюдатель координат потокосцепления НК. В соответствии с пинципом ВПУ, амплитуда, частота и фаза задающих воздействий  $i_{sABC}^*$  на входах КФФТ относительно полученных в НК сигналов  $\cos \Theta_{\Psi_0}$ ,  $\sin \Theta_{\Psi_0}$  пространственного положения ориентирующего вектора  $\Psi_A^0$ ,

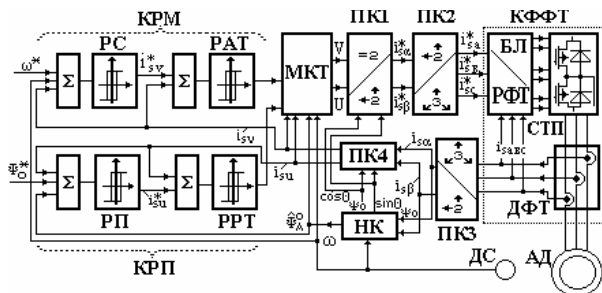


Рис.1 Функциональная схема синтезированной СУАЭП с ВПУ.

формируется ПК1, ПК2 по сигналам на выходах РРТ и РАТ в соответствии с целью управления формирования  $M(t)$ . На рис.1 представлена функциональная схема системы ВПУ АЭП с АУ (2), в состав которой входят: контуры регулирования координат механического движения КРМ и потокосцепления КРП; модель контура тока МКТ; преобразователи координат ПК1 ÷ 4; КФФТ, состоящий из релейных регуляторов токов РФТ, блока логики БЛ, СТП, датчиков токов ДФТ.

Контурь КРМ и КРП содержат релейные регуляторы скорости РС, потокосцепления РП, активного РАТ и реактивного РРТ тока. Выполнение этих регуляторов релейными приводит к следующим особенностям формирования  $i_{sABC}$ . При отсутствии СР работы РРТ и РАТ сигналы  $i_{sABC}^*$  синусоидальны или знакопостоянны, а КФФТ функционирует в устойчивом СР. Амплитуда пульсаций тока, интервал частот СР однозначно предопределяются выбором ширины петли гистерезиса  $\Delta_{рт}$ , величин  $k_f$ ,  $T_z$  и могут быть оптимизированы. При вхождении РАТ и РРТ в СР КФФТ переходит в режим переключений. РФТ размыкаются т.к. сигналы  $i_{sABC}^*$  при этом представляют собой фрагменты опорных синусоид со сдвигами  $\pm 90$ ,  $-180$  эл. град. скачкообразно чередующимися в соответствии со сложными комбинациями частот СР РАТ, РРТ и нередко сопровождающимися биениями. Это приводит к значительному увеличению пульсаций формируемых токов выше значений, заданных гистерезисом  $\Delta_{рт}$ .

Для устранения этих недостатков, обеспечения стабильности частот СР КФФТ и возможности применения алгоритмов как двух-, так и однополярной модуляции в схеме СУ

предусмотрено выделение сигналов "эквивалентного управления"  $V$  и  $U$ , осуществляемое моделью токового контура МТК с настроечными параметрами реального АЭП. Сигналы  $V$  и  $U$  на выходах МТК не содержат высокочастотных разрывов и представляют собой сигналы непрерывного управления в функции координат ОУ. При отработке КФФТ, эти сигналы обеспечивают характер движений ОУ и желаемые свойства СУ, как и исходные сигналы разрывных управлений РАТ и РРТ по которым вычисляется эквивалентное управление. В состав МТК введены переключатели с логическим управлением от датчиков СР, переключающие вместо сигналов РАТ и РРТ на входы ПК1 сигналы  $V$  и  $U$  только в случае перехода указанных регуляторов в СР.

Практическая реализация систем ВПУ АД АУ (2), переход от единичных разработок к широкому внедрению комплектов электроприводов ограничены трудностью получения информации о параметрах поля и электромагнитного момента. Точность, полнота и достоверность такой информации, совместно с рациональным выбором законов управления, ОКБ и состава ИДС, предопределяют эффективность применяемых алгоритмов, структур и сложность технической реализации АЭП. В практике электропривода накоплен опыт построения устройств получения информации о  $\Psi_A^0(t)$ , основанных на:

- применении встраиваемых в АД датчиков потока (ДП), выполненных на элементах Холла, магнитодиодах, магниторезисторах или датчиках ЭДС машины (ДЭ) типа "активный" проводник или измерительная обмотка с диаметральным шагом;
- использовании вычислительных устройств косвенного определения  $\Psi_0A$ .

Обобщение опыта ТР систем ВПУ АЭП и их ИДС показывает, что в последнее время наблюдается устойчивая тенденция отказа от применения классических подходов к получению информации о  $\Psi_A^0(t)$  с помощью встраиваемых в АД ДП и ДЭ. Причиной являются следующие недостатки датчиков ДП и ДЭ: усложнение конструкции вновь изготавливаемых машин; необходимость выполнения низко технологичных операций разборки-сборки и монтажа датчиков при модернизации существующих электроприводов, ухудшающая их надежность и ремонтноспособность; наличие шумов в выходных сигналах. Последнее обстоятельство обусловлено несинусоидальностью полей в зазоре, коммутационными всплесками и зубцовыми гармониками. На рис.2 показаны осциллограммы сигналов потокосцепления  $\Psi_{\alpha, \beta}$  полученных на выходах датчиков на элементах Холла, установленных в зазоре АД типа 4А56В2У3, мощностью 0.25 кВт, работающего в номинальном режиме при питании от сети. Спектр зубцовых гармоник при глубоком регулировании частоты вращения изменяется в широких пределах. Это приводит к необходимости введения в состав ИДС сложных перестраиваемых векторных фильтров, увеличивающих сложность аналитических расчетов

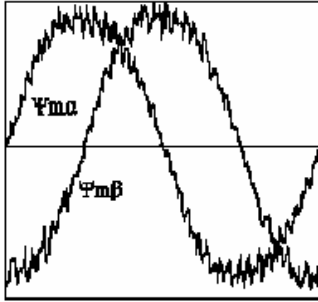


Рис.2 Форма сигналов на выходах измерителей потока, выделенных на элементах Холла

при синтезе АУ и предопределяющих необходимость проверки системы на устойчивость и отсутствие резонансных явлений во всем диапазоне регулирования.

Кроме перечисленных общих свойств, каждый из типов датчиков имеет свои специфические, накладывающие ограничения на его использование. Характерными для применения ДП являются:

- нелинейность их характеристик, зависящая от частоты и уровня магнитного потока;
- температурная нестабильность;
- соизмеримость толщины датчиков с величинами воздушных зазоров АД.

Особенности ДЭ предопределяют необходимость выполнения операций интегрирования сигналов без накопления статической ошибки, обусловленной неидеальностью применяемых интеграторов, согласования постоянных времени последних с частотами измеряемых сигналов, что осложняет техническую реализацию при больших диапазонах регулирования и, особенно, в зоне с нулевыми или близкими к ним частотами вращения. В силу перечисленных причин, промышленностью серийно не выпускаются АД со встроенными ДП или ДЭ, а системы ВПУ с непосредственной ОКБ по результатам прямых измерений потока находят применение лишь в опытных образцах АЭП.

Альтернативой применению встраиваемых датчиков ДП и ДЭ является развивающийся подход, основанный на использовании устройств косвенного вычисления (УКВ) и наблюдателей-идентификаторов координат (НИК). УКВ, выполняемые на основе разомкнутых динамических моделей (ДМ) наблюдаемых электромагнитных процессов в АД или функциональных преобразователей, осуществляющих определение  $\Psi_A^0$  по статическим зависимостям его от легко доступных измерению векторам  $U_s$  и  $I_s$ , не позволяют получить приемлемую для реализации ВПУ точность, т.к. в процессе вычисления не учитывается динамика электромагнитных и электромеханических процессов АД.

Наиболее совершенными средствами вычисления  $\Psi_A^0(t)$  и  $M(t)$  являются НИК, выполняемые на основе работающих в реальном масштабе времени прямых замкнутых ДМ АД

полного или пониженного порядка, снабженных следящим контуром, обеспечивающим при работе его в СР сходимость наблюдаемых и истинных координат. Однако, кроме [3], большинство известных структур НК [4], синтезированы при стремлении построить ИДС без измерителей частоты вращения на валу с косвенным ее вычислением, что в условиях высокодинамичных, глубокорегулируемых АЭП систем ТВСД не позволяет получить точность вычисления координат, позволяющую в полной мере реализовать потенциально высокие регулировочные возможности систем ВПУ. Все известные НИК, предназначенные для вычисления потокосцепления  $\Psi_A^0$ , имеют постоянную структуру ДМ и не могут быть применены в системах с изменяемой ОКБ без применения дополнительных вычислений.

С помощью методик [1,5] синтезирован НИК пониженного порядка. При синтезе НИК применена ДМ, полученная из (1) методом эквивалентных преобразований координатного базиса:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{A\alpha}^0}{dt} &= -C1T_r^{-1}\Psi_{A\alpha}^0 + C2i_{s\alpha} + C3(L_s')^{-1}U_{s\alpha} + C1C3\omega i_{s\beta} \\ \frac{d\Psi_{A\beta}^0}{dt} &= -C1T_r^{-1}\Psi_{A\beta}^0 + C2i_{s\beta} + C3(L_s')^{-1}U_{s\beta} + C1C3\omega i_{s\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} = J^{-1}(M - M_c) = (C5(\Psi_{A\alpha}^0 i_{s\beta} - \Psi_{A\beta}^0 i_{s\alpha}) - M_c)J^{-1}$$

где  $U_{\alpha,\beta}$  - напряжения на выходах СК ИК, формируемые в СР по алгоритмам:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= \Psi_\alpha - \Psi_\beta U_{p3} \text{sign} \left( \varepsilon + K1 \frac{d\omega}{dt} \right) \\ U_\beta &= \Psi_\beta + \Psi_\alpha U_{p3} \text{sign} \left( \varepsilon + K1 \frac{d\omega}{dt} \right); \\ U_\omega &= K2 \int \varepsilon dt \end{aligned} \quad (4)$$

В (4) обозначены:  $U_{p3}$  - напряжение на выходе реле СК;  $\varepsilon = \omega - \dot{\omega}$ ;  $K1, K2$  - постоянные коэффициенты, полученные в процессе синтеза НИК и обеспечивающие в соответствии с принимаемыми критериями оптимизации требуемые характеристики НИК. На рис.3 представлена функциональная схема синтезированного НИК, соответствующая (3), (4). По аналогии с полученными АУ (2) настроечные коэффициенты НИК имеют переменные, программно устанавливаемые в соответствии с требуемой ОКБ, значения.

На рис.4 представлены результаты исследования АЭП с АУ (2), полученные при цифровом моделировании системы для варианта ОКБ  $\Psi_{0A} \equiv |\Psi_r|$ . Осциллограммы переходных процессов изменения координат  $\omega$ ,  $M$ ,  $|\Psi_r|$ ,  $i_{su}$ ,  $i_{sv}$ ,  $i_{s\alpha}$ ,  $\Psi_{r\alpha}$ ,  $i_{s\alpha}$ ,  $\Psi_{r\beta}$  и  $i_{s\beta}$  и сигналов управления  $U_{rp}$ ,  $U_{rs}$  и  $U_{rrt}$ ,  $U_{rat}$  на выходах регуляторов получены для режимов работы с  $\omega^* = 0$ ,  $|\Psi_r|^* = 0$  и  $M_c = 0$  ( $0 - t1$ );

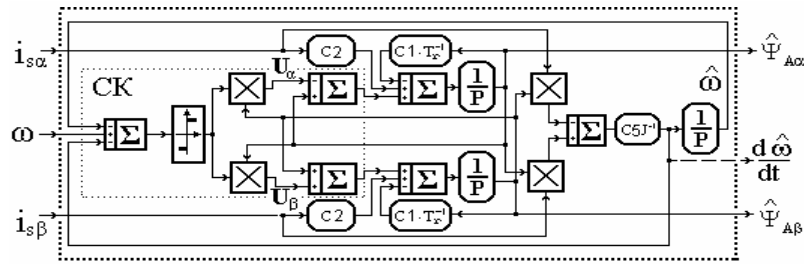


Рис.3 Функциональная схема синтезированного НИК АД с ВПУ.

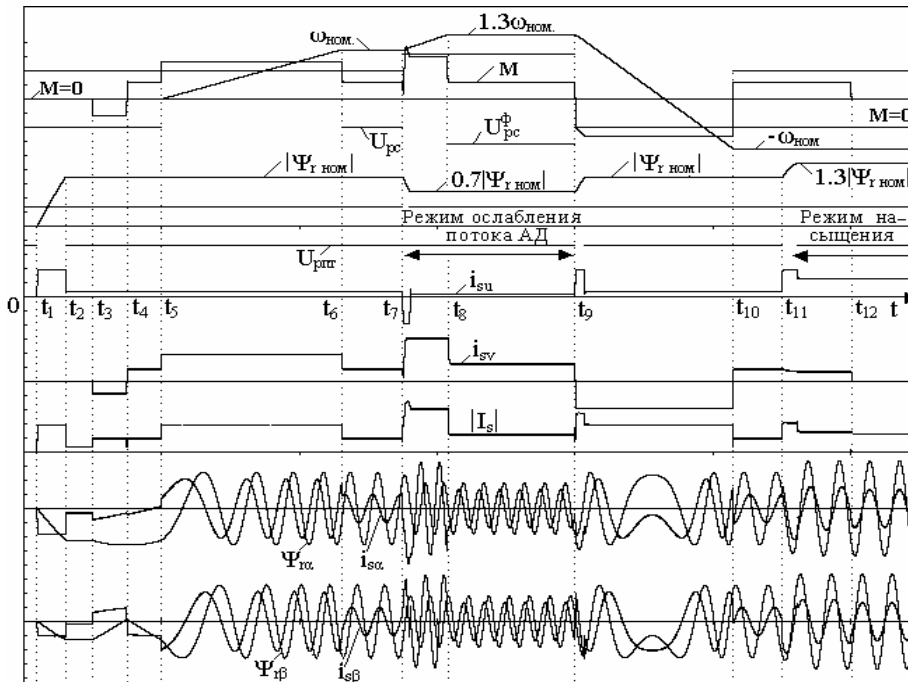


Рис.4 Результаты математического моделирования АУ (2) АЭП с ВПУ

возбуждения машины  $|\Psi_r|^* = |\Psi_r|_{ном}$  на интервале времени  $(t_1 - t_2)$ ; работы с  $M_c = -M_{ном} - (t_3 - t_{12})$  в том числе при:  $\omega^* = 0 - (t_4 - t_5)$ ,  $\omega^* = \omega_{ном} (t_5 - t_7)$ ,  $\omega^* = 1,3\omega_{ном} - (t_7 - t_9)$  и  $\omega^* = -\omega_{ном} (t_9 - t)$ . Указанные режимы получены при стабилизации  $|\Psi_r|$  на уровнях:  $|\Psi_r|^* = |\Psi_r|_{ном} - (t_1 - t_7)$  и  $(t_9 - t_{11})$ , "ослаблении" потока до  $|\Psi_r|^* = 0,7|\Psi_r|_{ном} - (t_7 - t_9)$  и в режиме "насыщения" АД до уровня  $|\Psi_r|^* = 1,3|\Psi_r|_{ном} - (t_{11} - t)$ .

Применение СУ АЭП с алгоритмами ВПУ (2), реализуемыми на основе выполненных в соответствии с (3), (4) НИК потока АД, обеспечивают высокую динамическую точность и устойчивость формирования электромагнитного момента АД с минимальными пульсациями. Системы рассмотренной структуры могут быть использованы при практической реализации унифицированных для ОКБ по векторам потокоцеплений  $\Psi_s$ ,  $\Psi_m$  или  $\Psi_r$  АЭП с ВПУ для механизмов с повышенными требованиями к точностным и динамическим характеристикам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Садовой А.В. Синтез и исследование оптимальных по точности систем управления электроприводами с низкой чувствительностью

- к широкому спектру дестабилизирующих факторов. Дис. на соиск. ученой степени доктора техн. наук. Днепродзержинск: ДИИ, 1992. - 501с.
2. Клименко Ю.М. Математическая модель асинхронного двигателя и синтез алгоритмов полеориентированного управления на ее основе // Юбилейный сборник научно-технических трудов ДГТУ. - Днепродзержинск, 1995. - С.518-527.
3. А.с.№ 1634108,1450706 Устройство определения координат следящего электромеханического модуля с АД / Ю.М.Клименко, А.В.Садовой, Б.В.Сухинин - Оpubл. 1992,1987, - Бюл. №3,12.
4. Браславский И.Я., Зюзев А.М. и др. Синтез нейронного наблюдателя для асинхронного электропривода с прямым управлением моментом. // Электротехника, №12, 2001, с.31-34.
5. Клименко Ю.М., Поликарпов Д.Ю. Структурно-алгоритмический синтез наблюдателя координат асинхронного двигателя для систем векторного полеориентированного управления // Контроль и управление в технических системах. - Винница, 1995. - С.488-490