

Обобщенная процедура синергетического синтеза векторных регуляторов электромеханических систем

А. Н. Попов

Южный федеральный университет, г. Таганрог
anpopov@sfedu.ru

Аннотация. Статья посвящена систематизации и обобщению результатов исследований, связанных с применением принципов и методов синергетической теории управления для решения задачи синтеза векторных регуляторов электромеханических систем (ЭМС) различного типа и назначения. Рассмотрены аспекты составления модели синтеза; представлена обобщенная процедура синергетического синтеза векторных регуляторов ЭМС в виде характерных этапов динамической декомпозиции исходной системы; обсуждаются особенности применения обобщенной процедуры для реализации типовых задач управления движением исполнительных органов ЭМС. Продемонстрировано применение предложенной процедуры на конкретном примере.

Ключевые слова: электромеханические системы; синтез регулятора; синергетическое управление; метод АКАР; инвариантные многообразия; динамическая декомпозиция

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных промышленных и транспортных установках электрический двигатель оснащается различными дополнительными устройствами, позволяющими повысить эффективность преобразования электрической энергии в механическое движение. Таким образом, электромеханическая система (ЭМС) – это комплекс аппаратно-технических и программно-алгоритмических средств, находящихся в процессе постоянного энергетического и информационного взаимодействия и направленных на решение общей задачи управляемого электромеханического преобразования энергии.

Ключевой научной задачей, которую приходится решать при проектировании ЭМС с автоматическим управлением, вне всякого сомнения, является задача синтеза регулятора. В силу своего широкого использования в промышленных и транспортных установках ЭМС выступили в роли своеобразного полигона, где апробировались новые теоретические результаты по синтезу автоматических регуляторов и внедрялись новые технические решения.

Анализ существующих подходов к проектированию современных управляемых ЭМС [1–4] позволили сделать следующие выводы.

1. При синтезе автоматических регуляторов ЭМС в основном используется подход, разработанный почти 70 лет назад (последовательная коррекция и ее вариации) и имеющий строгое математическое обоснование в применении к классу линейных систем с одним каналом управления.

2. Применение методов классической теории автоматического управления для синтеза регуляторов ЭМС приводит к необходимости обоснования и разработки дополнительных методик, позволяющих экстраполировать линейные подходы для управления нелинейными системами. Результатом такой экстраполяции является усложнение методики настройки контуров управления с типовыми регуляторами, введением в структуру системы дополнительных блоков, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественные обратные связи по ЭДС вращения двигателя.

3. Методики расчета контуров регулирования в особенности для ЭМС переменного тока содержат дополнительные ограничения и допущения, которые ставят под сомнение математическую строгость и обоснованность такого подхода.

4. Отсутствие аналитических методик расчета приводит к широкому использованию поисковых численных процедур настройки контуров регулирования, применению методов искусственного интеллекта и других информационных технологий.

Апробированные универсальные рецепты в виде типовых законов управления (П, ПИ, ПИД) оказываются неэффективными, поскольку не учитывают реальной динамики системы, которая описывается существенно нелинейными математическими моделями, и в принципе не предназначены для использования в задачах многосвязного управления.

В качестве концептуальной основы для синтеза векторных регуляторов нелинейных ЭМС предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления (СТУ), предложенной профессором А.А. Колесниковым [5–7]. Методы СТУ продемонстрировали свою высокую эффективность при решении прикладных задач синтеза регуляторов для различных классов технических объектов и систем [8–10]. При этом значительная часть прикладных исследований в рамках СТУ была направлена на решение задач синтеза векторных регуляторов нелинейных ЭМС [10–13]. В настоящей статье будут изложена процедура синергетического синтеза векторных регуляторов ЭМС, обобщающая и систематизирующая результаты этих многолетних исследований.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Исходными данными для проведения процедуры синергетического синтеза регуляторов являются математическая модель управляемой системы, цели

управления в виде соответствующих инвариантов, а также существующие неопределенности и ограничения. В работах [10–12, 14] приведена типизация инвариантов ЭМС и их разделение на технологические, электромагнитные и энергетические инварианты.

Математическая модель любой ЭМС в общем случае представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей основных элементов силовой подсистемы: преобразователей электрической энергии (ПЭЭ), электрических двигателей (ЭД) и механических преобразователей (МП). Подобная стандартная структура математических моделей ЭМС и типовые инварианты позволяют разработать обобщенную процедуру синергетического синтеза векторных регуляторов ЭМС.

Прежде чем перейти к ее изложению, сформулируем саму задачу. Требуется найти закон управления как функцию координат состояния ЭМС, обеспечивающий реализацию целей управления в виде совокупности инвариантов. При этом все траектории движения изображающей точки замкнутой системы должны быть устойчивы в целом относительно некоторых инвариантных многообразий (ИМ), формируемых в пространстве состояния системы и отражающих желаемые стационарные режимы ее работы.

Также введем ряд понятий, которые будем использовать при дальнейшем изложении обобщенной процедуры.

Управляемая переменная – переменная математической модели, относительно которой записан один из инвариантов системы. Синтезируемый регулятор должен обеспечивать желаемый характер поведения управляемых переменных. Так, например, если решается задача стабилизации угловой скорости исполнительного органа (ИО) ЭМС (технологический инвариант $\omega = \omega^*$), то угловая скорости является управляемой переменной. Если решаются задачи позиционирования, генерации динамического режима или слежения, то управляемой переменной является угловое положение ИО. Каждый электромагнитный инвариант ЭМС [10–12], является условием стабилизации одной из электромагнитных переменных. Следовательно, эта переменная является управляемой. Все энергетические инварианты [14] являются явными функциями одной из электромагнитных переменных. Соответствующая переменная также является управляемой.

Переменная математической модели будет считаться **управляющей переменной**, если в соответствующем дифференциальном уравнении присутствует управляющее воздействие. Например, для моделей двигателей постоянного тока управляющими переменными являются ток в обмотке якоря и магнитный поток одного полюса, для моделей двигателей переменного тока – проекции токов на оси координатной системы.

Заметим, что управляемые переменные остаются таковыми по ходу всей процедуры синтеза. А вот статус управляющей переменной может быть переназначен в ходе поэтапной динамической декомпозиции системы. При поэтапной декомпозиции в ходе процедуры синергетического синтеза в модели появляются «внутренние» управления. Их количество может отличаться от количества каналов управления в

исходной системе. Переменные декомпозированной системы, в дифференциальных уравнениях которых присутствуют «внутренние» управления становятся управляющими для декомпозированной системы. Таким образом, для каждого уровня декомпозиции определяется свой набор управляющих переменных.

III. ЭТАПЫ ПРОЦЕДУРЫ

Обобщенная процедура синергетического синтеза векторных регуляторов ЭМС представляет собой ряд последовательных этапов, во время которых осуществляется каскадная декомпозиция исходной системы дифференциальных уравнений математических моделей. Такая декомпозиция происходит в результате введения на каждом этапе параллельно-последовательной совокупности ИМ («внешних» и «внутренних») и нахождения вектора управления («внешнего» или «внутреннего») как решения основных функциональных уравнений метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). На определенных этапах процедуры явным образом задаются инварианты системы: электромагнитные, энергетические и технологические.

Структура силовой подсистемы ЭМС и специфика ее математического описания определяют следующие этапы обобщенной процедуры синергетического синтеза.

Этап 0. Построение модели синтеза

Этот этап включается в процедуру при необходимости компенсации внешних и параметрических возмущений, построения наблюдателей переменных, а также в случае изменяющихся во времени задающих воздействий. Модель синтеза представляет собой уравнения расширенной системы вида:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}); \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}),\end{aligned}\tag{1}$$

где \mathbf{x} – вектор переменных состояния; \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий; \mathbf{z} – вектор переменных информационной модели неопределенных возмущений, параметров и задающих воздействий.

Модель (1) получается из исходной модели объекта путем замены неопределенных величин новыми переменными и записью дополнительных дифференциальных уравнений, описывающих предполагаемую динамику этих переменных.

Распространенным вариантом расширения пространства состояния управляемой системы, который используется для компенсации внешних возмущений класса степенных функций времени и получивший свое применение в методе синергетического синтеза с интегральной адаптацией на инвариантных многообразиях [7–10] является модель, включающая в себя каскад интеграторов по ошибке управляемой переменной.

Этап I. Декомпозиция до уровня «ЭД – МП»

Этот этап включается в процедуру синтеза в тех случаях, когда необходимо учитывать динамику ПЭЭ. Тогда соответствующие дифференциальные уравнения математической модели ЭМС устанавливают связь между управляющими сигналами ПЭЭ, напряжением

источника, напряжениями и токами нагрузки (обмотками ЭД).

Согласно стандартной процедуре АКАР вводится параллельная совокупность ИМ. Это «внешние» многообразия. Все остальные многообразия, вводимые на последующих этапах – «внутренние», они геометрически принадлежат «внешним» многообразиям. Число «внешних» многообразий всегда равно числу физических каналов управления.

Управляющими переменными исходной модели являются напряжения на обмотках двигателя или их проекции на оси выбранной координатной системы (для двигателей переменного тока). В большинстве случаев в процедуре метода АКАР используются основные функциональные уравнения первого порядка вида $T_s \dot{\psi}_s + \psi_s = 0$. Тогда «внешние» многообразия всегда должны содержать управляющие переменные. Например, для ЭМС с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) совокупность «внешних» многообразий задается в виде:

$$\begin{aligned}\psi_1^{(I)} &= u_{я} - \varphi_1^{(I)} = 0; \\ \psi_2^{(I)} &= u_{\epsilon} - \varphi_2^{(I)} = 0,\end{aligned}$$

где $u_{я}$ и u_{ϵ} – напряжения на обмотках якоря и возбуждения; верхний индекс в виде римской цифры в скобках указывает на номер этапа обобщенной процедуры, к которому относятся соответствующие переменные; Функции $\varphi_1^{(I)}$ и $\varphi_2^{(I)}$ пока неизвестны и будут определяться на следующих этапах. В модели декомпозированной системы, описывающей динамику на пересечении «внешних» ИМ, эти функции рассматриваются как «внутренние» управления.

Этап II. Декомпозиция до уровня МП

Декомпозированная система представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику подсистемы «ЭД-МП». В этих уравнениях вместо напряжений на обмотках или их проекций присутствуют «внутренние» управления $\varphi_i^{(I)}$. Как правило, «внутренние» управления определяют динамику электромагнитных переменных: токов или их проекций, потока или потокосцепления. Поэтому указанные переменные на этом этапе процедуры становятся управляющими переменными. Далее вводятся ИМ этапа II, содержащие управляющие переменные декомпозированной системы этого этапа. Если управляющие переменные являются одновременно и управляемыми переменными, то соответствующее ИМ совпадает с одним из инвариантов системы. Потому на этом этапе в виде ИМ вводятся энергетические и электромагнитные инварианты.

Этап продолжается до тех пор, пока не будет задан характер изменения всех переменных, являющихся мультипликативными составляющими электромагнитного момента ЭД в рамках конкретной математической модели.

Итогом данного этапа является декомпозиция системы до уравнений механического движения вала ЭД и связанного с ним МП. В этой системе обычно остается одно «внутреннее» управление $\varphi_1^{(II)}$, которое определяется на следующем этапе.

Этап III. Декомпозиция до уровня технологической задачи

Синтез «внутреннего» управления $\varphi_1^{(II)}$ производится в рамках той же идеологии исходя из требований технологической задачи. То есть формируется ИМ, соответствующее технологическому инварианту системы. Если МП можно представить жестким механизмом, то динамика механической части описывается системой дифференциальных уравнений 2-го порядка, которая характеризует положение θ и угловую скорость ω ИО:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= (k\varphi_1^{(II)} - M_c)/J,\end{aligned}\quad (2)$$

где M_c – момент сопротивления нагрузки; J – момент инерции.

В этом случае для реализации задачи стабилизации угловой скорости в требуемом значении ω^* задается ИМ в виде соответствующего технологического инварианта:

$$\psi_1^{(III)} = \omega - \omega^* = 0. \quad (3)$$

Если необходимо позиционировать вал ИО в заданное угловое положение θ^* , то можно сформировать финишное ИМ как

$$\psi_1^{(III)} = \omega - \beta(\theta - \theta^*) = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что на ИМ (4) динамика углового положения ИО описывается дифференциальным уравнением $\dot{\theta} = \beta(\theta - \theta^*)$, которое при $\beta < 0$ обладает свойством асимптотической устойчивости относительно состояния $\theta = \theta^*$.

При формировании ИМ (4) использовалась идея использования дифференциальных уравнений эталонной динамики в процедуре синтеза. Для любой задачи стабилизации переменной x в заданном значении x^* простейшим видом такого уравнения является линейной дифференциальное уравнение 1-го порядка $\dot{x} = \beta(x - x^*)$.

Для реализации других стационарных режимов изменения скорости или угла также используется идея использования уравнений эталонной динамики [15].

При необходимости учета упругих деформаций модель МП обычно представляется в виде 2-хмассовой механической системы. С точки зрения процедуры синергетического синтеза на данном этапе принципиально ничего не меняется, то есть для задачи стабилизации скорости вводится ИМ вида (3), а для задачи позиционирования – ИМ вида (4).

Если после проведения всех этапов декомпозиции у системы имеется «остаточная» динамика, то есть остаются дифференциальные уравнения, описывающие динамику на финишном ИМ, необходимо проводить анализ асимптотической устойчивости.

Этап IV. Поиск «внутренних» и «внешних» управлений

На заключительном этапе процедуры осуществляется поиск управляющих воздействий для каждой декомпозированной системы, начиная с

последней. Этот поиск состоит в решении основных функциональных уравнений метода АКАР, записанных относительно соответствующих макропеременных в силу уравнений декомпозированной системы этого этапа.

То есть, сначала из уравнения $T_1^{(III)}\dot{\psi}_1^{(III)} + \psi_1^{(III)} = 0$ находится «внутреннее» управление $\varphi_1^{(II)}$. После этого конкретизированы все ИМ этапа II $\psi_i^{(II)} = 0$. Затем решается система уравнений $T_i^{(II)}\dot{\psi}_i^{(II)} + \psi_i^{(II)} = 0$ в силу уравнений декомпозированной системы этапа II, и определяются «внутренние» управления $\varphi_i^{(I)}$. После этого все «внешние» ИМ $\psi_i^{(I)} = 0$ принимают конкретный вид. Искомый вектор управления ищется как решение основных функциональных уравнений $T_i^{(I)}\dot{\psi}_i^{(I)} + \psi_i^{(I)} = 0$ в силу уравнений исходной модели синтеза.

IV. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ

Продемонстрируем применение изложенной выше процедуры на конкретном примере, позволяющем включить все рассмотренные этапы.

Рассматривается ЭМС постоянного тока, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Напряжения на обмотках якоря и возбуждения формируется с помощью управляемых выпрямителей. Уровень этих напряжений определяется значениями управляющих сигналов u_{1y} и u_{2y} . Генерируемое механическое движение передается к ИО через МП, который считается 2-хмассовой механической системой. Момент сопротивления со стороны нагрузки M_c считается линейной функцией угловой скорости ИО, причем до конца не определенной. Поэтому будем считать, что со стороны нагрузки на ЭМС действует кусочно-постоянный возмущающий момент M_d .

Поставим задачу синтезировать векторный синергетический регулятор, обеспечивающий стабилизацию угловой скорости ИО в заданном значении (технологический инвариант), стабилизацию магнитного потока двигателя в номинальном значении (электромагнитный инвариант) и компенсацию действия неизвестного кусочно-постоянного возмущения.

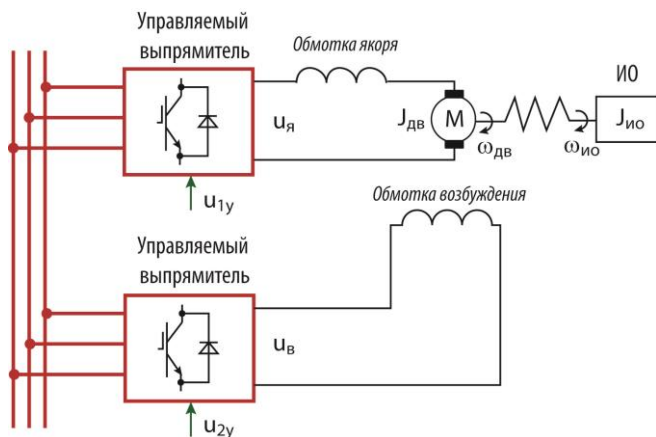


Рис. 1. Функциональная схема ЭМС постоянного тока

Этап 0. Составление модели синтеза.

Математическая модель рассматриваемой ЭМС формируется путем объединения модели ПЭЭ, модели ДПТ НВ и модели 2-хмассовой механической системы. Для обеспечения инвариантности к действию кусочно-постоянного возмущения к модели ЭМС добавляется один интеграл по ошибке скорости. В результате получаем следующую модель в переменных состояния:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= (a_5x_5x_6 - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4; \\ \dot{x}_5 &= (x_7 - a_5x_4x_6 - a_6x_5)a_7; \\ \dot{x}_6 &= (x_8 - a_8x_6)a_9; \\ \dot{x}_7 &= (a_{10}u_1 - x_7)a_{11}; \\ \dot{x}_8 &= (a_{10}u_2 - x_8)a_{12}; \\ \dot{z}_1 &= k_1(x_2 - x_2^*). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь: $x_1 = \theta_{ио}$, $x_3 = \theta_{об}$, $x_2 = \omega_{ио}$, $x_4 = \omega_{об}$ – угловые положения и скорости двигателя и ИО; $x_5 = i_y$, $x_7 = u_y$ – ток и напряжение на обмотке якоря; $x_6 = \Phi$, $x_8 = u_e$ – магнитный поток и напряжение на обмотке возбуждения; $u_1 = u_{1y}$ и $u_2 = u_{2y}$ – управляющие напряжения преобразователей; $a_3 = J_{ио}$, $a_4 = J_{об}$, $a_1 = c_{12}$, $a_2 = \beta_{12}$ – приведенные к валу двигателя значения моментов инерции, коэффициентов жесткости и диссипации упругой связи; $a_5 = c$ – конструктивная постоянная двигателя, $a_6 = R_y$, $a_7 = L_y$ – активное сопротивление и индуктивность цепи якоря; $a_8 = R_e k_\Phi$ – произведение сопротивления обмотки возбуждения на коэффициент, отражающий связь потока и тока возбуждения в номинальном режиме; $a_9 = 1/(2pw)$ – коэффициент, зависящий от числа пар полюсов p и числа витков на полюс обмотки возбуждения w ; $a_{10} = U_u$ – напряжение источника; $a_{11} = T_{n1}$, $a_{12} = T_{n2}$ – постоянные времени управляемых выпрямителей. Из последнего уравнения (5) следует, что $z_1 = \int (x_2 - x_2^*) dt + C$ представляет собой интеграл отклонения угловой скорости ИО x_2 от ее заданного значения x_2^* .

Поставим задачу синтеза векторного закона управления $\mathbf{u}(\mathbf{x}, z_1)$, обеспечивающего выполнение инвариантов $x_2 = x_2^*$ и $x_6 = x_6^*$.

Этап I. Декомпозиция до уровня «ЭД – МП».

Управляемыми переменными согласно заданным инвариантам системы являются скорость ИО и магнитный поток, то есть переменные x_2 и x_6 модели (5). Управляемыми переменными исходной системы являются переменные x_7 и x_8 , поскольку в правых частях 7-го и 8-го уравнений (5) находятся управляющие воздействия.

Наличие двух независимых каналов управления обуславливает введение параллельной совокупности двух ИМ относительно управляющих переменных системы (5):

$$\begin{aligned}\psi_1^{(I)} &= x_7 - \varphi_1^{(I)}(x_1, \dots, x_6, z_1) = 0; \\ \psi_2^{(I)} &= x_8 - \varphi_2^{(I)}(x_1, \dots, x_6, z_1) = 0.\end{aligned}\quad (6)$$

В структуру «внешних» ИМ (6) входят пока неизвестные функции $\varphi_1^{(I)}$ и $\varphi_2^{(I)}$.

На пересечении ИМ (6) устанавливается однозначная функциональная связь между переменными x_7 , x_8 и остальными переменными состояния. Таким образом, введение ИМ (6) позволяет осуществить управляемую редукцию избыточных степеней свободы динамической системы и в дальнейшем рассматривать декомпозированную систему:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= (a_5x_5x_6 - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4; \\ \dot{x}_5 &= (\varphi_1^{(I)} - a_5x_4x_6 - a_6x_5)a_7; \\ \dot{x}_6 &= (\varphi_2^{(I)} - a_8x_6)a_9; \\ \dot{z}_1 &= k_1(x_2 - x_2^*).\end{aligned}\quad (7)$$

Функции $\varphi_1^{(I)}$ и $\varphi_2^{(I)}$ можно рассматривать как «внутренние» управления системы (7), и ставить задачу синергетического синтеза уже для нее.

Этап II. Декомпозиция до уровня МП.

В системе (7) остаются два канала управления, а управляющими переменными являются переменные x_5 и x_6 . Заметим, что управляющая переменная x_6 является одновременно и управляемой. Поэтому одно из ИМ должно совпадать с электромагнитным инвариантом системы $x_6 = x_6^*$.

На этом этапе вводится следующая совокупность ИМ:

$$\begin{aligned}\psi_1^{(II)} &= x_5 - \varphi_1^{(II)}(x_1, \dots, x_4, z_1) = 0; \\ \psi_2^{(II)} &= x_6 - x_6^* = 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Очевидно, что введением ИМ $\psi_2^{(II)} = 0$ обеспечивается выполнение одной из задач управления.

Движение изображающей точки замкнутой системы на пересечении ИМ (8) описывается декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3; \\ \dot{x}_3 &= x_4; \\ \dot{x}_4 &= (a_5\varphi_1^{(II)}x_6^* - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4; \\ \dot{z}_1 &= k_1(x_2 - x_2^*).\end{aligned}\quad (9)$$

Этап III. Декомпозиция до уровня технологической задачи.

Очевидно, что модель (9) содержит уравнения механического движения вала двигателя и ИО и одно «внутреннее» управление $\varphi_1^{(II)}$. Управляющая переменная этой системы – переменная x_4 .

На заключительном этапе декомпозиции вводится ИМ

$$\begin{aligned}\psi_1^{(III)} &= (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3 \\ &- \beta(x_2 - x_2^*) = 0\end{aligned}\quad (10)$$

Тогда динамика управляемой переменной на $\psi_1^{(III)} = 0$ будет описываться дифференциальным уравнением $\dot{x}_2 = \beta(x_2 - x_2^*)$, которое при $\beta < 0$ обладает свойством асимптотической устойчивости относительно состояния $x_2 = x_2^*$.

Этап IV. Поиск «внутренних» и «внешних» управлений.

На заключительном этапе процедуры проводится поиск управлений для всех этапов декомпозиции, рассмотренных выше, начиная с заключительного.

Сначала записывается основное функциональное уравнение относительно агрегированной макропеременной $\psi_1^{(III)}$: $T_1^{(III)}\dot{\psi}_1^{(III)} + \psi_1^{(III)} = 0$.

Продифференцировав $\psi_1^{(III)}$ по времени по правилу дифференцирования сложной функции и подставив вместо производных переменных по времени правые части соответствующих дифференциальных уравнений декомпозированной системы (9), получим алгебраическое уравнение, разрешаемое относительно «внутреннего» управления $\varphi_1^{(II)}$.

После нахождения $\varphi_1^{(II)}$, когда структура ИМ $\psi_1^{(II)} = 0$ становится определенной, решается система функциональных уравнений вида

$$\begin{aligned}T_1^{(II)}\dot{\psi}_1^{(II)} + \psi_1^{(II)} &= 0, \\ T_2^{(II)}\dot{\psi}_2^{(II)} + \psi_2^{(II)} &= 0\end{aligned}$$

в силу уравнений декомпозированной системы (7), и находятся «внутренние» управления $\varphi_1^{(I)}$ и $\varphi_2^{(I)}$. Тем самым доопределяется структура «внешних» ИМ $\psi_1^{(I)} = 0$ и $\psi_2^{(I)} = 0$.

На заключительном шаге, решая систему функциональных уравнений метода АКАР

$$\begin{aligned}T_1^{(I)}\dot{\psi}_1^{(I)} + \psi_1^{(I)} &= 0, \\ T_2^{(I)}\dot{\psi}_2^{(I)} + \psi_2^{(I)} &= 0\end{aligned}$$

в силу исходной математической модели (5), можно найти искомым закон векторного управления ЭМС.

На рис. 2–3 представлены графики переходных процессов управляемых переменных системы (5).

Моделировался режим пуска двигателя в ход до заданной скорости без возмущающего момента. Затем, на 20 и 40 сек. имитировалось действие возмущающего момента величиной 50 Н·м и -50 Н·м соответственно.

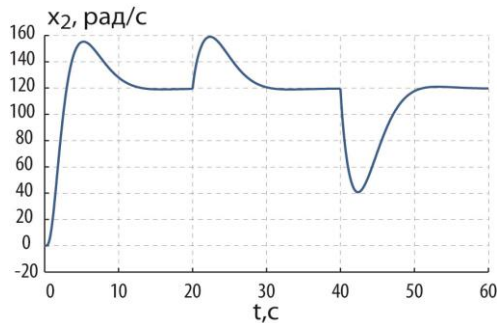


Рис. 2. Угловая скорость ИО

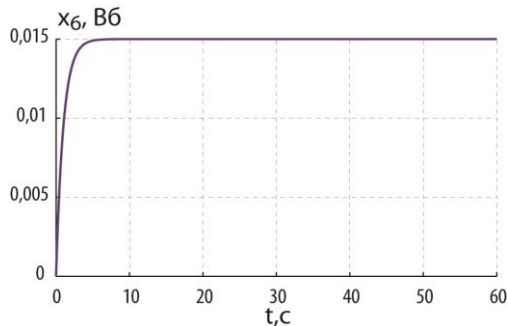


Рис. 3. Магнитный поток

Как видно из представленных графиков система с синтезированным регулятором обладает свойством асимптотической устойчивости относительно требуемого состояния, заданные инварианты выполняются, внешний возмущающий момент парируется.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена обобщенная процедура синергетического синтеза векторных регуляторов ЭМС, позволяющая применять принципы и методы СТУ для общего класса ЭМС и отличающаяся от традиционных подходов возможностью использования нелинейных моделей динамики, математической обоснованностью и отсутствием необходимости применения вычислительных методов и поисковых алгоритмов.

Предложенная процедура может послужить теоретической основой для разработки нового класса эффективных регуляторов для ЭМС различного типа и назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электрприводами. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.
- [2] Терехов В.М. Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 299 с.
- [3] Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
- [4] Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019. 575 p.
- [5] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
- [6] Современная прикладная теория управления: Ч.II. Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. Москва; Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 557 с.
- [7] Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. Изд. стереотип. Москва: URSS, 2019. 240 с.
- [8] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – Изд. стереотип. М: URSS, 2019. 248 с.
- [9] Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. Москва : Физматлит, 2013. 196 с.
- [10] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А., Топчиев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. Изд. стереотип. Москва : URSS, 2019. 300 с.
- [11] Колесников А.А. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А. Синергетическая теория управления нелинейными взаимосвязанными электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 182 с.
- [12] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Синергетическое управление нелинейным электроприводом. I. Концептуальные основы синергетического синтеза систем // Известия вузов, Электромеханика. Новочеркасск: 2005. № 6. С. 8-15.
- [13] Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. М.: 2014. № 4. С. 123-137.
- [14] Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2003. 67 с.
- [15] Попов А.Н. Синергетический синтез регуляторов для задач генерации колебательных режимов в технических системах // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Комплексная безопасность сложных систем». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. №4(129). С. 156-162.