

ОПТИМИЗАЦИЯ ОДНОМАССОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ ДИАГРАММ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Введение. В [1] разработан новый способ параметрической оптимизации астатических (условно устойчивых) электромеханических систем автоматического регулирования методом диаграмм качества управления (ДКУ) по критерию максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ). Данный метод обеспечивает сбалансированное улучшение указанных показателей качества управления по сравнению с традиционными критериями. Его эффективность была неоднократно подтверждена на примерах электроприводов (ЭП) постоянного тока, построенных по принципу систем подчиненного регулирования (СПР) с регуляторами скорости различного порядка астатизма.

Вместе с тем в последние годы происходит вытеснение традиционного для большинства ответственных машин и механизмов глубоко-регулируемого ЭП постоянного тока. Ему на смену приходит ЭП переменного тока на базе короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД) с векторным управлением. Он также строится по принципу СПР с использованием типовых настроек и астатических регуляторов скорости [2].

Указанная тенденция и особенность построения частотно-регулируемого асинхронного ЭП обосновывают актуальность и возможность дальнейшего улучшения его динамических характеристик. При этом целесообразным представляется применение ранее апробированного метода ДКУ.

Оптимизация систем векторного управления асинхронным ЭП будет способствовать ускорению перехода регулируемого ЭП с двигателями постоянного тока к более простым и надежным системам с двигателями переменного тока. Это позволит сократить расходы на их ремонт и обслуживание. Учитывая, что коэффициент полезного действия асинхронных машин выше, чем у двигателей постоянного тока, это также ведет к энергосбережению, что еще раз подтверждает актуальность проводимых исследований. Кроме того, улучшение динамики асинхронного ЭП повлечет за собой повышение производительности и качества выпускаемой продукции.

Постановка задач исследования. Целью работы является оптимизация двукратно интегрирующего одномассового асинхронного электропривода с векторным управлением методом диаграмм качества управления. Поставленная цель может быть достигнута решением следующих задач: 1) построением ДКУ для одноканальной структуры частотно-управляемого асинхронного ЭП; 2) выбором параметров астатического регулятора скорости на линии МДУ; 3) проведением сравнительного анализа динамических показателей переходных процессов в традиционно настроенной и оптимизированной одноканальной и полной двухканальной структурах асинхронного ЭП; 4) оценкой сопутствующего расширения допустимых пределов изменения момента инерции электропривода.

Материалы исследования. Как известно [2], система векторного управления асинхронным одномассовым ЭП состоит из двух взаимозависимых каналов: стабилизации потокосцепления ротора ψ_r и регулирования скорости двигателя ω . Каждый из них строится по принципу СПР с типовой настройкой контуров тока, потокосцепления и скорости. Как правило, для придания системе астатизма по возмущающему воздействию в канале регулирования скорости используют ПИ регулятор (ПИ – РС), вследствие чего сам канал, да и вся система становятся двукратно интегрирующими.

Принадлежность асинхронного ЭП с векторным управлением к многократно интегрирующим системам подтверждает возможность его оптимизации методом ДКУ по критерию МДУ [3]. Однако наличие двух каналов и взаимовлияния между ними не позволяет сразу применить метод ДКУ. Поэтому в проводимых исследованиях автором приняты следующие допущения: 1) возможность в оптимизационных расчетах методом ДКУ использования одноканальной структуры вместо полной двухканальной с учетом компенсации внутренних перекрестных связей в структуре АД; 2) обеспечение работы одноканальной системы регулирования скорости АД при установившемся значении потокосцепления ротора ψ_r ; 3) предварительная настройка внешнего контура тока с регулятором РТ2 на модульный оптимум с последующим использованием упрощенной передаточной функции контура в виде

$$W_{KT}(p) = \frac{1/K_T}{(4T_{\mu}K_2p + 1)}; \tag{1}$$

- 4) компенсация внутренней обратной связи по ЭДС двигателя звеном с передаточной функцией

$$W_{K.O.C.(E)}(p) = \frac{2T\mu ZpK_rK_\tau}{Ls\sigma K_\pi K_{dc}}; \quad (2)$$

5) достаточного широкий диапазон изменения приведенного момента инерции.

С учетом вышеизложенных допущений, одноканальная структура одномассового асинхронного ЭП с векторным управлением представлена на рис.1.

В формулах (1), (2) а также на структурной схеме приняты обозначения в соответствии с [2].

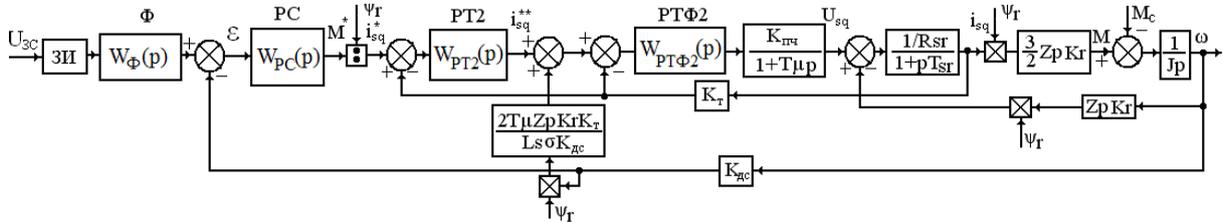


Рисунок 1 – Одноканальная структура асинхронного ЭП

Для проведения исследований выбран АД типа МТКФ 312-8 со следующими параметрами: $P_n=13$ кВт; $n_n=690$ об/мин; $U_n=380$ В; $I_n=31,8$ А; $I_0=27,7$ А; $\cos\phi_0=0,088$; $\cos\phi=0,63$; $\eta=76$ %; $GD^2=1,55$ кг м²; $R_s=0,45$ Ом; $X_{s1}=0,53$ Ом; $R'_r=0,64$ Ом; $X'_{r1}=0,42$ Ом и преобразователь частоты, для которого $K_{пт}=38$; $T_\mu=0,002$ с.

В результате расчетов для полной двухканальной структуры асинхронного ЭП, представленной на рис. 2, получено: $K_1=0,4129$; $K_2=0,7065$; $Kr=0,9808$; $Zp=4$; $Tsr=0,0028$ с; $Rsr=1,0657$ Ом; $J=0,3875$ кг м²; $T_M=0,012$ с; $Tr=0,1088$ с; $Ls=0,07$ Гн; $Lm=0,0683$ Гн; $\sigma=0,0428$. При $U_{3c}=U_{3п}=10$ В учтем, что: $K_1=0,1258$ В/А; $K_{dc}=0,1384$ Вс, $K_\pi=14,6326$ В/Вб.

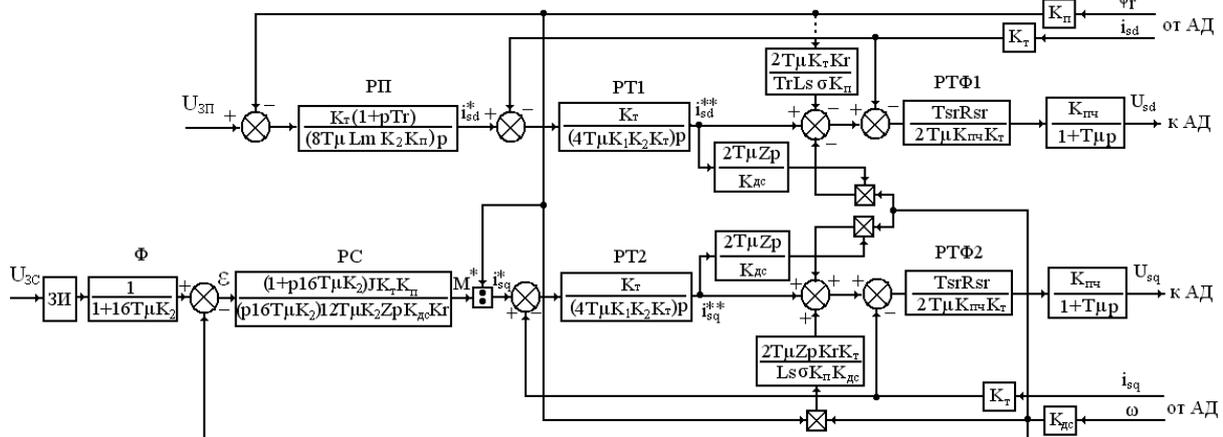


Рисунок 2 – Структурная схема системы векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей объекта управления

Для значений передаточных функций регуляторов рис. 1 и рис. 2 имеем:

$$W_{PT\Phi 1}(p) = W_{PT\Phi 2}(p) = 0,1568; \quad (3)$$

$$W_{PT1}(p) = W_{PT2}(p) = \frac{428,49}{p}; \quad (4)$$

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(\tau_{PC}p + 1)}{\tau_{PC}p} = \frac{7,75(0,0226p + 1)}{0,0226p}; \quad (5)$$

$$W_{PI}(p) = \frac{1,2089 (0,1088 p + 1)}{0,1088 p} \quad (6)$$

На диаграммах качества управления линейных систем с последовательным корректирующим устройством в виде ПИ – РС, по ординате откладывают значение его коэффициента передачи K_{PC}/τ_{PC} , а по абсциссе значение постоянной времени τ_{PC} [3]. Для удобства и повышения наглядности процесса оптимизации искусственно введем безразмерные переменные k и b в коэффициент усиления и постоянную времени регулятора скорости соответственно. Далее k и b будем называть параметрами регулятора скорости. При этом получим следующую передаточную функцию ПИ – РС:

$$W_{PC}(p) = \frac{k \cdot 7,75(b \cdot 0,0226 p + 1)}{0,0226 p} = \frac{k \cdot 343(b \cdot 0,0226 p + 1)}{p} \quad (7)$$

Выполним построение ДКУ асинхронного ЭП, воспользовавшись одноканальной двукратноинтегрирующей структурой рис. 1, без учета задатчика интенсивности и фильтра на входе системы.

Для заданных параметров ЭП на рис.3 в координатах k и b ПИ – РС приведена рассчитанная ДКУ с линиями равного уровня перерегулирования.

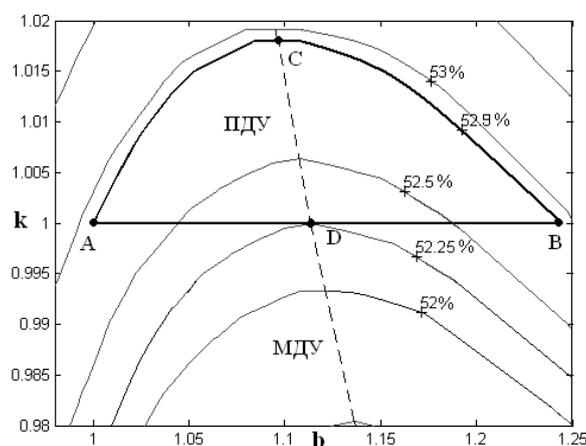


Рисунок 3 – Диаграмма качества управления

Изолинии перерегулирования имеют дугообразный вид с явно выраженным максимумом и промаркированы в процентах. Через точки максимума этих кривых проведена штриховая линия максимальной добротности и запаса устойчивости – линия МДУ. Любая точка вне линии МДУ имеет присоединенную замкнутую область повышенной добротности и запаса устойчивости (ПДУ), которая образуется пересечением дугообразной изолинии перерегулирования и прямой линии уровня коэффициента передачи k . Например, для точки А ($k=1$; $b=1$), соответствующей исходной настройке системы на симметричный оптимум с перерегулированием 52,9 %, область ПДУ выделена жирным и ограничивается буквами АСВD. Отрезки дугообразной и прямой линий от точки А до точки В являются верхней и нижней ее границами. Важно отметить, что в области ПДУ любая внутренняя точка имеет значение перерегулирования менее 52,9 % и коэффициент передачи более 1.

Таким образом, точки отрезка CD линии МДУ внутри этой области дают максимально сбалансированное улучшение настройки с нулевым значением их площадей ПДУ. При этом точка С с координатами $k=1,017$; $b=1,09$ на линии МДУ обеспечивает максимальное значение добротности системы $k=1,017$ при исходном значении перерегулирования 52,9 %, а точка D с координатами $k=1$; $b=1,12$ имеет максимальный запас устойчивости при исходном значении добротности. Необходимо добавить, что настройка системы рис.1 в точке С позволяет при принятых параметрах ЭП увеличить добротность на 1,7 %, а в точке D – снижает исходное перерегулирование 52,9 % до 52,25 %. Точка В как и точка исходной настройки А удалена от линии МДУ. Она имеет аналогичный резерв повышения качества управления.

Для обоих случаев оптимизации параметры ПИ – РС должны быть приведены в соответствие с найденными значениями k и b . Поэтому для точек С и D имеем следующие оптимизированные значения передаточных функций РС:

$$W_{PC}^C(p) = \frac{1,017 \cdot 343(1,09 \cdot 0,0226 p + 1)}{p}; \quad (8)$$

$$W_{PC}^D(p) = \frac{1 \cdot 343(1,12 \cdot 0,0226 p + 1)}{p}. \quad (9)$$

Проверим адекватность полученных оптимальных настроек ПИ – РС для полной структуры рис. 2 асинхронного ЭП.

Переходные процессы по скорости, соответствующие исходной А и двум оптимальным точкам С и D настройки для одноканальной ω^* и полной ω структур асинхронного ЭП приведены на рис. 4 а), б) и в), г) – соответственно.

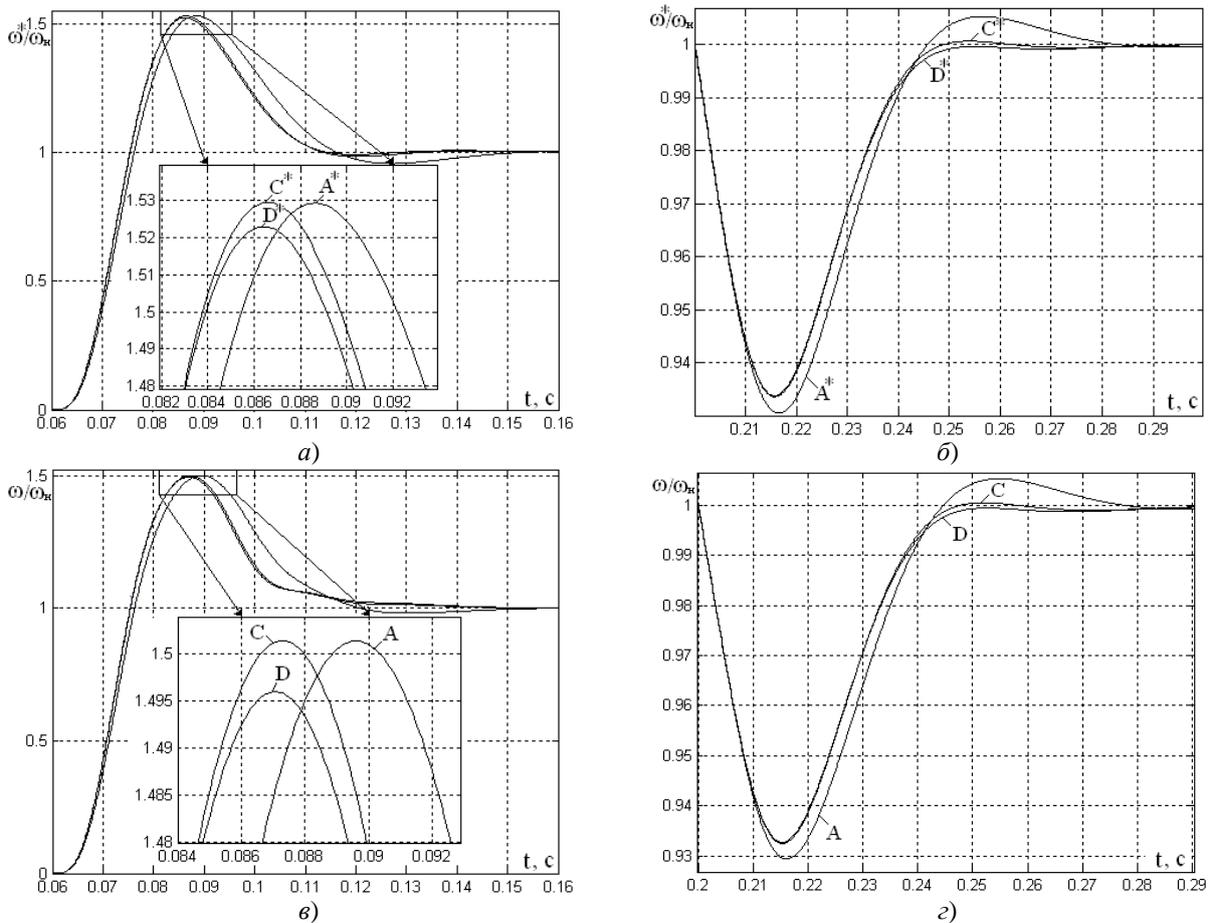


Рисунок 4 – Переходные процессы в одноканальной и полной системе векторного управления АД

При моделировании были проведены следующие опыты: разгон на холостом ходу – а), в) и наброс номинальной нагрузки в установившемся режиме – б), г).

Анализ переходных процессов в одноканальной структуре (рис. 4 а, б) показал преимущества оптимальных настроек перед исходной. Это выражается не только в улучшении основных показателей качества управления (перерегулирование, время первого согласования), но и в уменьшении динамической ошибки регулирования скорости при номинальном ступенчатом возмущающем воздействии. Оптимизация полной структуры асинхронного ЭП с векторным управлением рис. 2 дала аналогичные результаты (см. рис. 4 в, г) с сохранением всех преимуществ настроек по критерию МДУ. Основные показатели качества управления для одноканальной и полной структур сведены в табл. 1.

Таким образом, подтверждена возможность эффективного применения метода ДКУ для оптимизации одномассового двукратно интегрирующего асинхронного ЭП, представленного полной двухканальной

структурой при изначальной оптимизации упрощенной одноканальной структуры и последующим использованием полученных результатов. Кроме того, доказана правомерность использования принятых при исследованиях допущений.

В некоторых промышленных ЭП момент инерции механизмов может изменяться в достаточно широких пределах, что отрицательно сказывается на динамических свойствах и устойчивости системы в целом [5]. Свойство системы изменять режим работы при отклонениях того или иного ее параметра от расчетного значения называется чувствительностью.

Одним из преимуществ критерия МДУ является сопутствующее сбалансированному улучшению качества управления системы, уменьшение ее параметрической чувствительности. Это позволяет, в частности, расширить допустимые пределы изменения приведенного момента инерции.

Оценим изменение параметрической чувствительности в системе рис. 2 с исходными и оптимизированными параметрами. В качестве оценки чувствительности используем функции чувствительности [6]. Они представляют собой частные производные принятого показателя качества системы по каждому i -ому параметру

$$S_{R_i}^{Q_j} = \left(\frac{\partial Q_j}{\partial R_i} \right)_{R_i=R_{i0}}, \quad (10)$$

где Q_j – j -тый показатель качества регулирования системы; и ее R_i -й параметр с исходным значением R_{i0} .

Для сравнения то же самое сделаем для одноканальной структуры рис. 1, что поможет убедиться в правильности применения критерия МДУ.

Проведем расчет параметрической чувствительности систем рис. 1 и рис. 2 для всех рассмотренных выше настроек. Показателем качества регулирования при этом примем квадратично-интегральную оценку (КИО) ошибки регулирования ε . Расчет значений функций чувствительности произведем заменой значения частной производной в (10) на отношение приращений значений величин. Результаты расчета функций чувствительности по моменту инерции J сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные показатели качества управления

Настройка		$\sigma, \%$	$t_{\text{пер}} 10^{-3}, \text{с}$	$t_{01} 10^{-3}, \text{с}$	$S_J^{\text{КИО}}$
Одноканальная структура	A(k=1, b=1)	52,9	130	76,7	0,47
	C(k=1,017, b=1,09)	52,9	108	75,5	0,3
	D(k=1, b=1,12)	52,25	110	75,6	0,28
Двухканальная структура	A(k=1, b=1)	50,2	116	76,4	0,42
	C(k=1,017, b=1,09)	50,2	114	75,2	0,28
	D(k=1, b=1,12)	49,5	115	75,3	0,27

Анализ данных в табл. 1, показал, что, как и ожидалось, при оптимизации системы помимо улучшения всех основных ее показателей качества управления имеет место уменьшение функций параметрической чувствительности. Для одноканальной структуры – на 67,8 %, а для полной – на 55,5 %. В целом полная модель асинхронного ЭП с векторным управлением приобрела те же свойства, что и оптимизированная одноканальная структура. При этом некоторое уменьшение эффективности настройки по критерию МДУ для полной структуры можно объяснить остаточным влиянием полностью недокомпенсированных внутренних перекрестных обратных связей.

Проведем количественную оценку расширения допустимых пределов изменения моментов инерции в исходном и оптимизированном на максимум добротности и минимум перерегулирования двухканальном ЭП.

Исследованиями установлено, что система значительно хуже воспринимает уменьшение момента инерции ЭП, чем его увеличение. Это объясняется тем, что уменьшение J фактически соответствует увеличению коэффициента усиления регулятора K_{PC} и приводит к росту колебательности. Поэтому расчетное значение J необходимо выбирать на уровне возможного минимального его значения.

Некоторое затягивание переходного процесса происходит при принимаемом нами варианте увеличения момента инерции по сравнению с расчетным, равным 0,3875 кг м². Условно договоримся, что при исходном значении перерегулирования 50,2 % допустимым является его значение 58,8 %. Тогда исходная система позволяет увеличить момент инерции J в 4 раза, а настроенная на максимум добротности – в 5,65 раз, что соответствует расширению допустимого предела изменения момента инерции на 41,25 %.

Система, оптимізована на максимум запаса устойчивости, исходно имеющая перерегулирование 49,5 %, позволяет увеличить J в 6,2 раза, что соответствует расширению допустимого предела изменения момента инерции на 55 %. Полученные результаты свидетельствуют о повышении робастности системы и правильности рассчитанных ранее функций параметрической чувствительности.

Выводы. Достигнута оптимизация одномассового двукратноинтегрирующего асинхронного электропривода с векторным управлением методом диаграмм качества управления. Этим подтверждена эффективность использования метода ДКУ для улучшения динамических характеристик асинхронного ЭП. Оптимизация ЭП на максимальную добротность и запас устойчивости расширила допустимые пределы изменения момента инерции $J_{\min} \div J_{\max}$ соответственно – в 5,65 раз ($0,3875 \div 2,19 \text{ кг м}^2$) и в 6,2 раза ($0,3875 \div 2,4 \text{ кг м}^2$), что на 41,25 % и 55 % больше чем в исходно настроенной системе, в которой этот допустимый предел принят $0,3875 \div 1,55$.

В целом полученные результаты благоприятно будут сказываться на надежности, уменьшении брака выпускаемой продукции и связанной с этим экономии энергоресурсов.

Литература

1. Гуль А.І., Параметрична оптимізація багатократно інтегруючих електромеханічних з критерію максимальної добротності та запасу стійкості. Автореф. дис. докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ», 2004. 32 с.
2. Слежановский О.В., Дацковский И.С., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электропривода переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
3. Гуль А.И., Кунченко Т.Ю., Колесникова В.Д., Литвиненко Д.Г. “О диаграммах качества управления” Донецк: ДВ.– Н 34 Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 7 (128) С.285–286.
4. Гуль А.И. Комплексный критерий качества управления многократноинтегрирующих систем // Вестник Национального технического университета “ХПИ”.–Харьков: НТУ “ХПИ”.–2002. – Вып.12.– С.152–157.
5. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петербург. отд-ние.– 1992.– 288 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд-во «Наука», Глав. редак. физ-мат. литер., М.: 1972.– 762 с.

УДК 62-83

Литвиненко Д.Г.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОДНОМАСОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ МЕТОДОМ ДІАГРАМ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ

У статті розглядається оптимізація двукратно інтегруючого одномассового асинхронного електропривода з векторним керуванням методом діаграм якості керування. Проводиться будівництво діаграм якості керування для одноканальної структури частотно-керуваного асинхронного ЕП та вибір параметрів астатичного регулятора швидкості на лінії максимальної добротності та запасу стійкості. Виконується порівняльний аналіз динамічних показників перехідних процесів у традиційно налагодженій та оптимізованій одноканальній та повній двоканальній структурах асинхронного ЕП. Наводиться оцінка супроводжувачого розширення припустимих меж змінення моменту інерції електропривода.

Litvinenko D.G.

OPTIMIZATION OF SINGLE-MASS ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VECTOR CONTROL BY THE DIAGRAMS QUALITY CONTROL METHOD

In article construction of diagrams quality control for single-channel structure of the frequency-control asynchronous electric drive is considered, the choice of parameters of astatic speed regulator with use of the maximum good quality and a stability stock line is carried out. The comparative analysis of dynamic indicators of transients in traditionally adjusted and optimized single-channel and full two-channel structures of the asynchronous electric drive is made. The estimation of accompanying expansion of change admissible limits of the electric drive moment inertia is resulted.