

**ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им П.О.СУХОГО**

УДК 62-83:621.313.333

ЛОГВИН Владимир Васильевич

**ЧАСТОТНО-ТОКОВЫЙ ИНВАРИАНТНЫЙ АСИНХРОННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ С КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ
НАГРУЗКОЙ**

**05.09.03-Электротехнические комплексы и системы, включая
их управление и регулирование**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ГОМЕЛЬ 1999

Работа выполнена на кафедре “Автоматизированный электро-привод” Гомельского государственного технического университета им.П.О.Сухого.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Луковников В.И.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор Фираго Б.И.
- кандидат технических наук, доцент Курганов В.В.

Оппонирующая организация - Белорусский металлургический завод

Защита состоится “ 16 ” июня 1999г. в 10⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Гомельском государственном техническом университете им П.О. Сухого по адресу:

246746, г.Гомель, пр-кт Октября, 48, корп.1, ауд. 516, Гомельский государственный технический университет им П.О. Сухого.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гомельского государственного технического университета им П.О. Сухого.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 1999г

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

Г.И. Селиверстов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Колебательная периодическая или неравномерная нагрузка характерна для широкого класса механизмов добывающей, перерабатывающей и машиностроительной отраслей. Применяемые в настоящее время электроприводы таких механизмов не всегда удовлетворяют требуемым технико-экономическим показателям. Так, например, исследования ЦНИИЧМ (Россия) на ведущих зарубежных предприятиях, таких как металлургические заводы в городах Терни (Италия), Надахама (Япония), Раахе (Финляндия), а так же Новолипецком и Нижневартовском металлургических комбинатах (Россия), показали, что вызванные периодической колебания скорости двигателей кристаллизаторов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) превышают в 3-4 раза допустимый уровень колебаний, равный 2% от номинального значения угловой скорости, что отрицательно сказывается на качестве получаемого металла, а также на долговечности и надежности работы машин.

В настоящее время 50% производимой в мире стали разливается на МНЛЗ. Широкое внедрение МНЛЗ обуславливается крупными технико-экономическими преимуществами этого метода получения заготовок для листовых, сортовых и трубных станов. При разливке стали на МНЛЗ увеличивается выход годного проката на 10-15% по сравнению с прерывным методом разливки стали. МНЛЗ представляет собой сложный технологический комплекс, электрооборудование которого включает в себя более сотни автоматизированных электроприводов, большинство из которых работают с колебательной нагрузкой. Поэтому обеспечение высокой надежности работы этих приводов при стабилизации с большой точностью частоты вращения в условиях нагрузки, пульсирующей с частотой до 5 Гц, является актуальной и исключительно важной задачей.

Об актуальности данной проблемы говорит и то, что разработкой и внедрением систем автоматизированного электропривода МНЛЗ занимаются ведущие отечественные металлургические предприятия, а за рубежом созданием аналогичных систем интенсивно занимаются ведущие электрические фирмы: "General Electric" (США), "Englis Electric" (Великобритания), "Siemens" (Германия) и др.

Стратегическим направлением этих работ является развитие автоматизированных электроприводов с двигателями постоянного тока (ДПТ). Хорошая управляемость ДПТ позволяет создать электроприводы с высокой степенью инвариантности частоты вращения к колебательному моменту нагрузки, но их невысокая надежность, сложность изготовления и эксплуатации, высокая стоимость в сравнении с асинхронными электродвигателями (АД) заставляет

считать переход от приводов постоянного тока к приводам переменного тока для данного класса машин более перспективным.

Действительно, обеспечение постоянства магнитного потока АД позволяет максимально использовать магнитную систему двигателя и получить при частотно-токовом управлении, в отличие от ДПТ, на всех рабочих частотах перегрузочную способность, превышающую в 2-2,5 раза перегрузочную способность АД на естественной характеристике, что очень важно для надежного преодоления ударных моментов, возникающих при залипании металла в осцилляторе МНЛЗ, прохождении “мертвых” точек кривошипно-шатунных механизмов, реверсе в точках возврата рабочего режущего инструмента и т.д.

Вышеперечисленные аргументы говорят о необходимости проведения исследований, основное содержание которых сформулировано в цели и задачах настоящей работы.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в соответствии с темами научно-исследовательских работ кафедры “Автоматизированный электропривод” Гомельского государственного технического университета им П.О.Сухого № Гос.рег.19971048 “Математическое моделирование системы ”обобщенный управляемый вентильный коммутатор - обобщенный электромеханический преобразователь” и № Гос.рег.1998838 “Анализ и синтез автоколебательных процессов в электромеханических системах с периодической нелинейностью”.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке структур, методов анализа и синтеза, схемных реализаций частотно-токовых асинхронных электроприводов, инвариантных к колебательному нагрузочному моменту.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выяснить возможность физической реализуемости абсолютно инвариантных по моменту асинхронных электроприводов механизмов, работающих с колебательной нагрузкой.
2. Разработать типовые структуры асинхронных электроприводов, инвариантных к колебательному моменту нагрузки.
3. Построить математическую модель частотно-токового инвариантного асинхронного электропривода.
4. Разработать методы синтеза регуляторов на основе численного анализа по математической модели с учетом влияния параметров нагрузки, электродвигателя и системы управления на статические и динамические характеристики привода.
5. Осуществить схемную реализацию некоторых вариантов асинхронных электроприводов, инвариантных по моменту.
6. Провести экспериментальные исследования инвариантного асинхронного электропривода с различными параметрами нагрузки.

Объект и предмет исследования. Электроприводы на базе асинхронных двигателей с частотно-токовым способом управления для механизмов с колебательным моментом нагрузки.

Гипотеза. Предполагалось, что подходы и принципы реализации инвариантности по моменту для электроприводов постоянного тока дадут положительный эффект при их использовании в частотно-токовых асинхронных электроприводах.

Методология и методы проведенного исследования. При аналитическом исследовании частотно-токового инвариантного электропривода использовались традиционные методы интегро-дифференциального и операционного исчислений, методы теории автоматического управления и электропривода. Численный анализ осуществлялся с использованием современных математических пакетов программ на персональных ЭВМ. Подтверждение достоверности полученных теоретически результатов производилось экспериментальными исследованиями на лабораторном макете с компьютерным управлением.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

1. Выяснено, что невозможно физически реализовать абсолютно инвариантную к колебательному моменту нагрузки систему стабилизации частоты вращения частотно-токового асинхронного электропривода (ЧТАЭП).

2. Разработаны новые структуры векторного управления асинхронным электроприводом, обеспечивающие инвариантность к колебательному нагрузочному моменту в квазиустановившемся режиме.

3. Создана математическая модель частотно-токового инвариантного асинхронного электропривода.

4. Предложен метод косвенного определения колебательного момента нагрузки.

5. Впервые определены границы рационального применения последовательно-параллельной инвариантной оптимизации контура регулирования тока частотных асинхронных электроприводов.

6. Разработан новый метод синтеза регуляторов по требуемым показателям качества привода для различных типов машин с колебательным движением рабочего органа.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Разработана имитационная модель и ее программное обеспечение, позволяющие проводить разносторонние исследования частотно-токового электропривода, оптимизировать структуры и параметры управления.

2. Предложены схемные реализации частотно-токового асинхронного электропривода, инвариантного к колебательному моменту нагрузки.

3. Даны рекомендации по синтезу параллельных и последовательных регуляторов приводов конкретных промышленных механизмов с колебательной нагрузкой.

4. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в работе, внедрены в НТЦ Конструкторского бюро системного программирования и используются при чтении специальных дисциплин учебного плана студентов специальности Т.11.02.01 - Автоматизированный электропривод в Гомельском государственном техническом университете им.П.О.Сухого.

5. Предложенные схемные реализации, методики проектирования и их программное обеспечение для ЭВМ позволяют синтезировать частотно-токовые электроприводы, инвариантные к колебательному моменту нагрузки с оптимальными параметрами. Потребность в таких установках ощущается в добывающей и перерабатывающей промышленности как в Республике Беларусь, так и в странах СНГ. Их применение значительно удешевляет стоимость привода, позволяет увеличивать срок службы приводных электродвигателей, и в целом повышает надежность рабочих машин и механизмов.

Экономическая значимость работы определяется возможностями использования результатов исследований в качестве коммерческого продукта организациями и предприятиями, занимающимися проектированием систем управления электроприводами для механизмов металлургической и других смежных отраслей промышленности.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Результаты теоретического исследования возможности физической реализуемости абсолютной инвариантности ЧТАЭП с колебательной нагрузкой.

2. Обобщенная структура асинхронного электропривода, инвариантного к колебательному моменту нагрузки.

3. Математическая модель частотно-токового инвариантного асинхронного электропривода и программное обеспечение ее анализа.

4. Метод синтеза регуляторов и численного анализа ЧТАЭП по математической модели с учетом влияния параметров нагрузки на статические и динамические характеристики привода.

5. Принципы построения и схемные реализации типовых частотно-токовых асинхронных электроприводов, инвариантных по моменту.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем. Гипотеза, общие направления иссле-

дований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на:

-республиканской научно-технической конференции “ Автоматизированный электропривод промышленных установок” (г.Минск, 1994г.);

-международной 51-ой научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов Белорусской государственной политехнической академии (г.Минск, 1995г.);

-межрегиональном научно-техническом семинаре “Автоматизация и прогрессивные технологии” (г.Новоуральск, 1996г.);

-межвузовской конференции аспирантов и студентов (г.Гомель 1997г.);

-международной научно-технической конференции, посвященной П.О. Сухому (г.Гомель 1998г.).

Опубликованность результатов. Результаты выполненных исследований опубликованы в одной статье научного журнала Российской Федерации, двух статьях материалов международных конференций, четырех тезисах докладов. Проведена предварительная экспертиза заявки на изобретение. Всего объем опубликованных материалов составляет 14 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 114 страниц, в том числе 28 рисунков на 25 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 2 приложения на 17 страницах и список из 75 используемых источников на 6 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика проблемы, рассмотрены общие пути ее решения.

В первой главе рассмотрены принципы построения и технические характеристики существующих электроприводов механизмов с колебательной нагрузкой. Проведенный критический обзор технических характеристик современных отечественных и зарубежных систем управления и их сравнительный анализ позволяет заключить, что в настоящее время отсутствует удовлетворительная система управления асинхронным электроприводом, обеспечивающая технологические требования, предъявляемые механизмами данного класса, по стабильности частоты вращения при колеба-

тельной нагрузке и ограниченной установленной мощности. Выявлено, что наиболее перспективным для использования в асинхронных электроприводах механизмов с колебательной нагрузкой являются системы регулирования, построенные по принципу частотно-токового управления с ориентацией координатной системы по направлению вектора потокосцепления ротора.

О перспективности таких систем управления, в частности, говорит тот факт, что при использовании управления по частотно-токовому принципу появляется возможность обеспечения инвариантности к колебательному нагрузочному моменту. Отсутствие в настоящее время для таких систем управления оптимизированных методов анализа и синтеза, учитывающих особенности их работы на колебательную нагрузку, сдерживает создание автоматизированных асинхронных электроприводов, способных обеспечить инвариантность к колебательному нагрузочному моменту.

Во второй главе получена математическая модель асинхронного двигателя при частотно-токовом управлении в синхронно вращающейся системе координат, из которой видно, что по аналогии с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, можно создать инвариантный асинхронный электропривод, используя принцип Понселе.

Действительно, из системы уравнений асинхронного двигателя с частотно-токовым управлением

$$(1) \quad \left. \begin{aligned} T_r \cdot \frac{d\Psi_{rx}}{dt} + \Psi_{rx} &= \frac{X_m}{\omega_{1N}} \cdot i_{sx}, \\ i_{sy} &= \frac{1}{K_r \cdot R_r} \cdot (\omega_1 - \omega) \cdot \Psi_{rx}, \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_c(t) &= \frac{3}{2} \cdot K_r \cdot i_{sy} \cdot \Psi_{rx}. \end{aligned} \right\}$$

где $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ - постоянная времени ротора;

L_r, R_r - полное индуктивное и активное сопротивления ротора;

$K_r = \frac{L_m}{L_r}$ - постоянная ротора;

i_{sx}, i_{sy} - проекции вектора тока статора на оси синхронно вращающейся системы координат X, Y;

Ψ_{rx} - проекция вектора потокосцепления ротора на ось x, координатной системы вращающейся с синхронной скоростью;

M_c - момент сопротивления;

ω - частота вращения ротора;

ω_{1N}, ω_1 - номинальная и текущая частоты вращения магнитного поля, можно получить статическую характеристику в виде

$$\omega = \omega_1 - \frac{2 \cdot R_r}{3 \cdot \Psi_{\Gamma X}^2} \cdot M_c \quad . \quad (2)$$

Отсюда видно, что, поддерживая потокосцепление $\Psi_{\Gamma X}$ постоянным и осуществляя управление частотой вращения ротора ω асинхронного двигателя за счет изменения частоты вращения поля ω_1 , можно скомпенсировать влияние нагрузки M_c с помощью положительной обратной связи.

Разработан ряд структур САУ частотно-токовых асинхронных электроприводов, позволяющих в АД формировать магнитное поле, частота вращения которого имеет постоянную составляющую, равную частоте вращения ротора с учетом составляющей скольжения от постоянной составляющей момента нагрузки, и колебательную составляющую, синхронную с колебательной составляющей скольжения от колебательной составляющей нагрузочного момента. Обобщенная структурная схема инвариантной системы частотно-токового управления асинхронным электродвигателем приведена на рис.1.

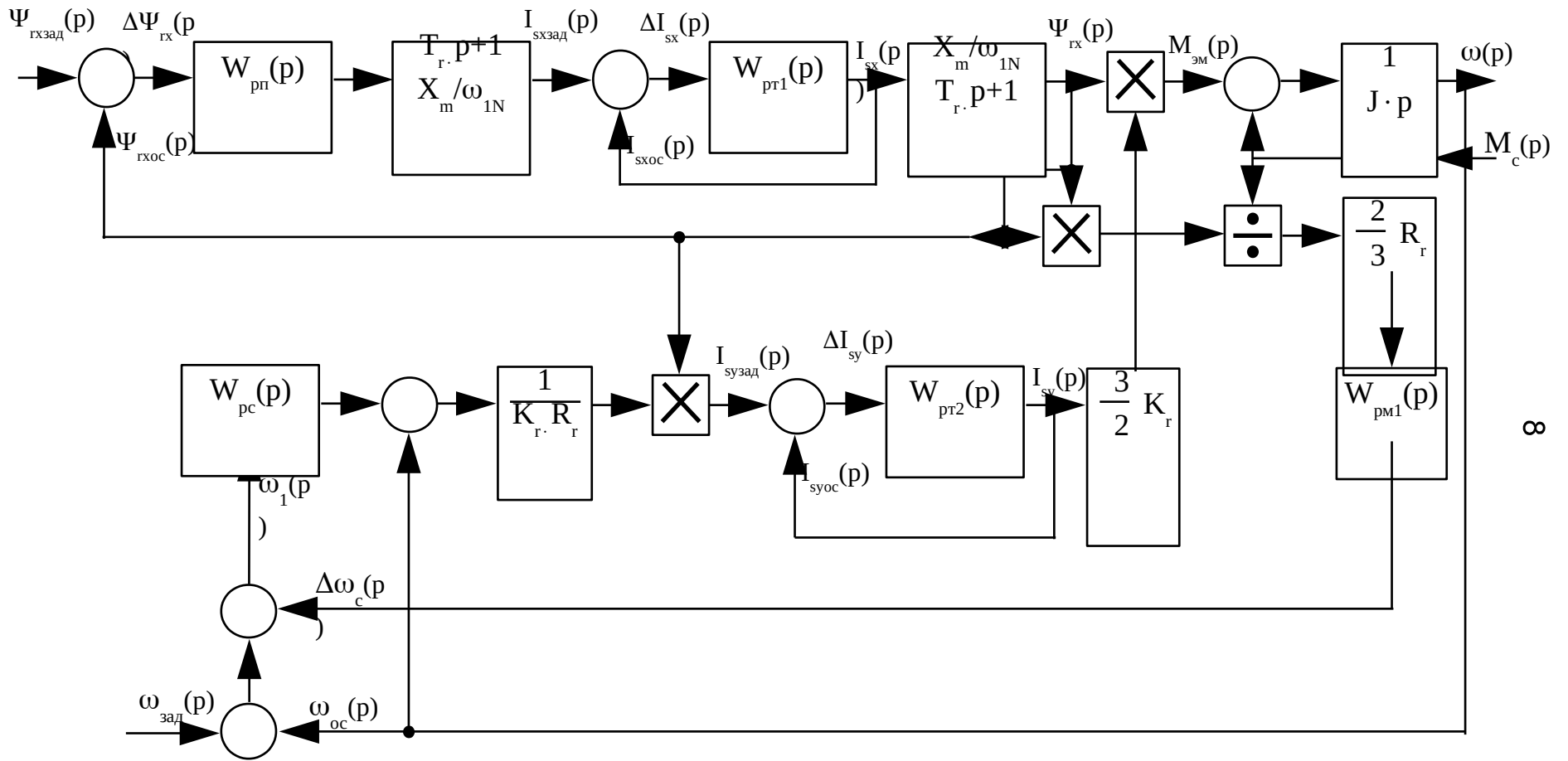


Рис.1. Структурная схема инвариантной системы частотно-токового управления асинхронным электродвигателем.

При ее анализе получено, что регуляторы потока $W_{рп}(p)$, токов $W_{р\tau_1}(p)$ и $W_{р\tau_2}(p)$ и скорости $W_{рс}(p)$, следует синтезировать астатическими. Регулятор момента $W_{рм}(p)$ надо синтезировать так, чтобы его передаточная функция равнялась обратной величине произведения передаточных функций звеньев, расположенных в контуре регулирования момента

$$W_{рм}(p) = \frac{1}{\frac{K_r R_r}{\Psi_{rN}} \cdot W_{рс}(p) \cdot \Phi_T(p)} ,$$

где $\Phi_T(p)$ - передаточная функция замкнутого контура регулирования тока;

Ψ_{rN} - номинальное потокосцепление ротора.

При синтезе регуляторов необходимо учитывать, чтобы быстродействие канала стабилизации потокосцепления ротора было выше, чем быстродействие канала управления частотой вращения.

В третьей главе проведен анализ физической реализуемости рассматриваемого принципа компенсации влияния момента. Выявлено, что абсолютная инвариантность к колебательному моменту нагрузки не достижима, но тем не менее в установившемся режиме абсолютная инвариантность обеспечивается.

Для повышения стабилизации скорости, предложена реализация параллельно-последовательных инвариантных регуляторов тока, позволяющая получить более высокое качество инвариантных систем за счет выполнения регуляторами более сложных, чем обычно, функций управления, когда они компенсируют не только большие постоянные времени, но и T_μ -инерционности предыдущего контура.

При настройке регулятора на технический оптимум передаточная функция регулятора тока будет

$$W_{р\tau_2}(p) = \frac{T_{\tau\pi 2} \cdot p + 1}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} ,$$

где $T_{\tau\pi 2}$ - постоянная времени преобразователя, а передаточная функция замкнутого контура регулирования тока $i_{sy}(p)$ имеет вид

$$\Phi_T(p) = \frac{1/K_{ост2}}{2 \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1) + 1} , \quad (3)$$

где T_μ - малая постоянная времени;

$K_{ост2}$ - коэффициент обратной связи по составляющей тока i_{sy} .

Традиционный адаптивный подход основан на включении элементов адаптации без вмешательства в исходную схему. С этой точки зрения инвариантная оптимизация выражается в том, что к внутреннему контуру тока пристраиваются внешние контуры с регуляторами.

Если исходить из задач компенсации возмущений, то в качестве желаемого процесса целесообразно принять ту же функцию оптимизации на технический оптимум (3). Тогда передаточная функция последовательного регулятора в контуре тока $W_{пр2.1}(p)$ будет

$$W_{пр2.1}(p) = \frac{K_{ост2} \left\{ 2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1) + 1 \right\}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \quad (4)$$

Таким образом реализуется динамический повторитель и образуется двухконтурная система регулирования тока.

Следуя этому, для усиления эффекта стабилизации процесса регулирования тока можно ввести второй, третий, четвертый и т.д. контуры регулирования с регуляторами $W_{пр2.2}(p)$, $W_{пр2.3}(p)$, ... $W_{пр2.n}(p)$ (4), как показано на структурной схеме рис.2.

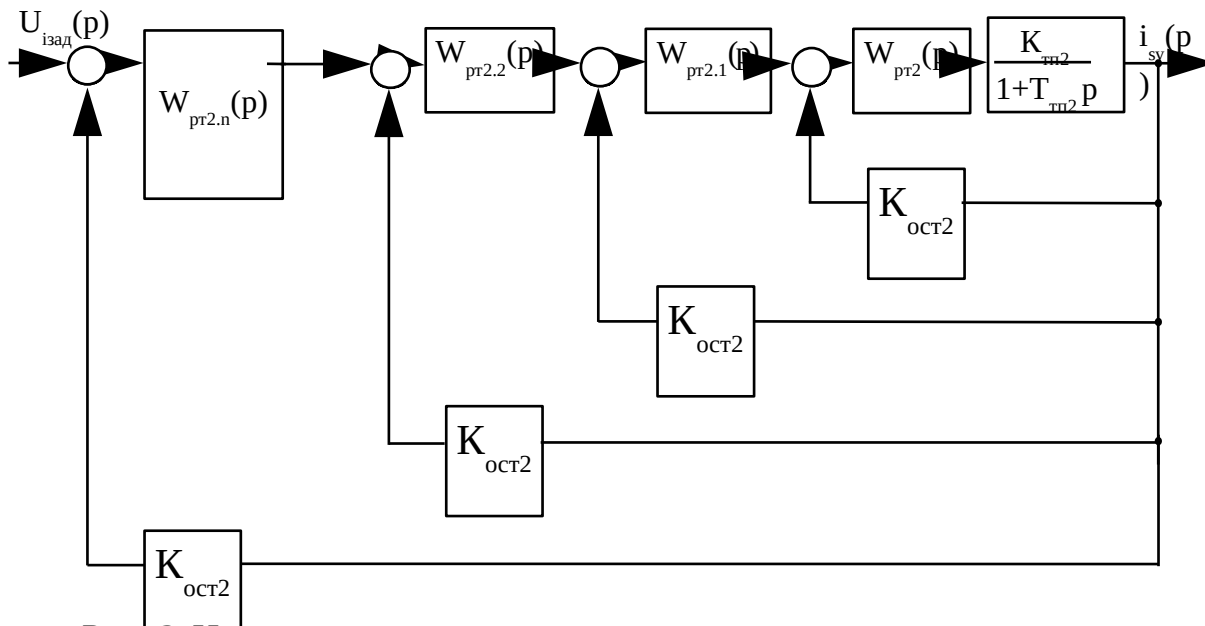


Рис.2. Инвариантная оптимизация внутреннего контура тока. Эффективность оптимизации контура тока с помощью внешних каналов регулирования скорости. контуров иллюстрируется переходными характеристиками исходного внутреннего контура тока (1), двухконтурной (2), трехконтурной (3) и т.д. систем инвариантного регулирования тока (рис.3).

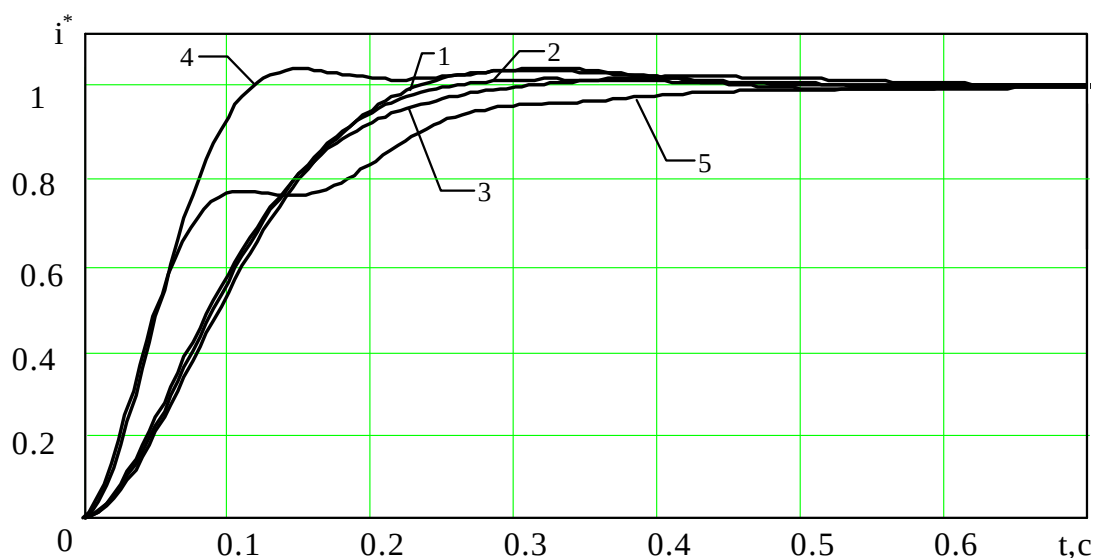


Рис.3. Переходные процессы контура тока при последовательной инвариантной оптимизации.

Получено, что оптимальные показатели качества переходных процессов при колебательной нагрузке будут при включении четырех контуров последовательно-параллельной коррекции. Дальнейшее увеличение числа контуров (пять, шесть и т.д.) не приводит к дальнейшему улучшению стабилизации скорости, более того при этом ухудшаются энергетические показатели качества.

Уменьшение подверженности контура тока действию возмущений возможно достигнуть, вводя в контур параллельную коррекцию. Для этого вместо постоянной $2T_{\mu}$ в регулятор тока введем постоянную времени αT_{μ}

$$W_{pT2}(p) = \frac{T_{п2} \cdot p + 1}{\alpha \cdot T_{\mu} \cdot p (T_{\mu} \cdot p + 1)},$$

выбрав $\alpha < 2$, что равносильно увеличению коэффициента усиления прямого канала контура тока в $K_d = 2/\alpha$ раз. Демпфирование динамического процесса осуществляется дифференцирующим звеном $T_{кр}$ в цепи обратной связи по току (рис.4).

В таком контуре управления можно сохранить характер процесса, но получить большее быстродействие. По мере уменьшения α быстродействие увеличивается и начиная с $\alpha = 0,25$ практически полностью компенсируется отклонение значения тока от оптимального, перерегулирование отсутствует, быстродействие контура тока возрастает более чем в 2 раза.

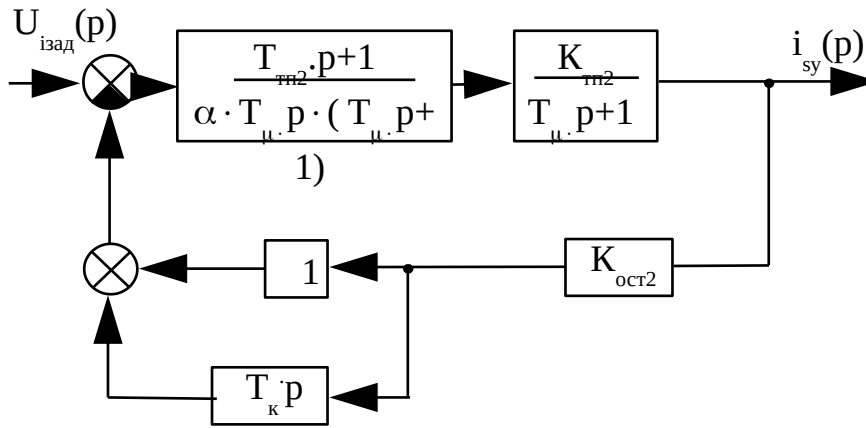


Рис.4. Инвариантная оптимизация с последовательно-параллельной коррекцией контура тока при $\alpha = var$.

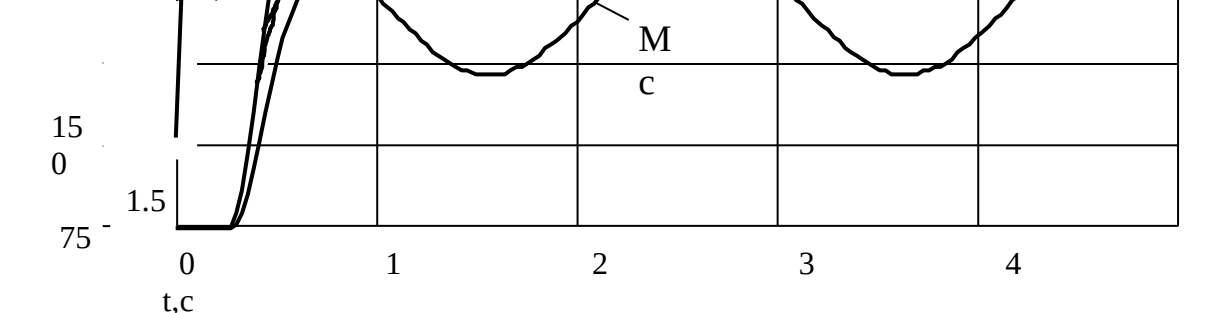
Предел быстродействия ограничивается только значением некомпенсируемой постоянной времени T_μ , которая обеспечивает устойчивый режим работы ключей преобразователя.

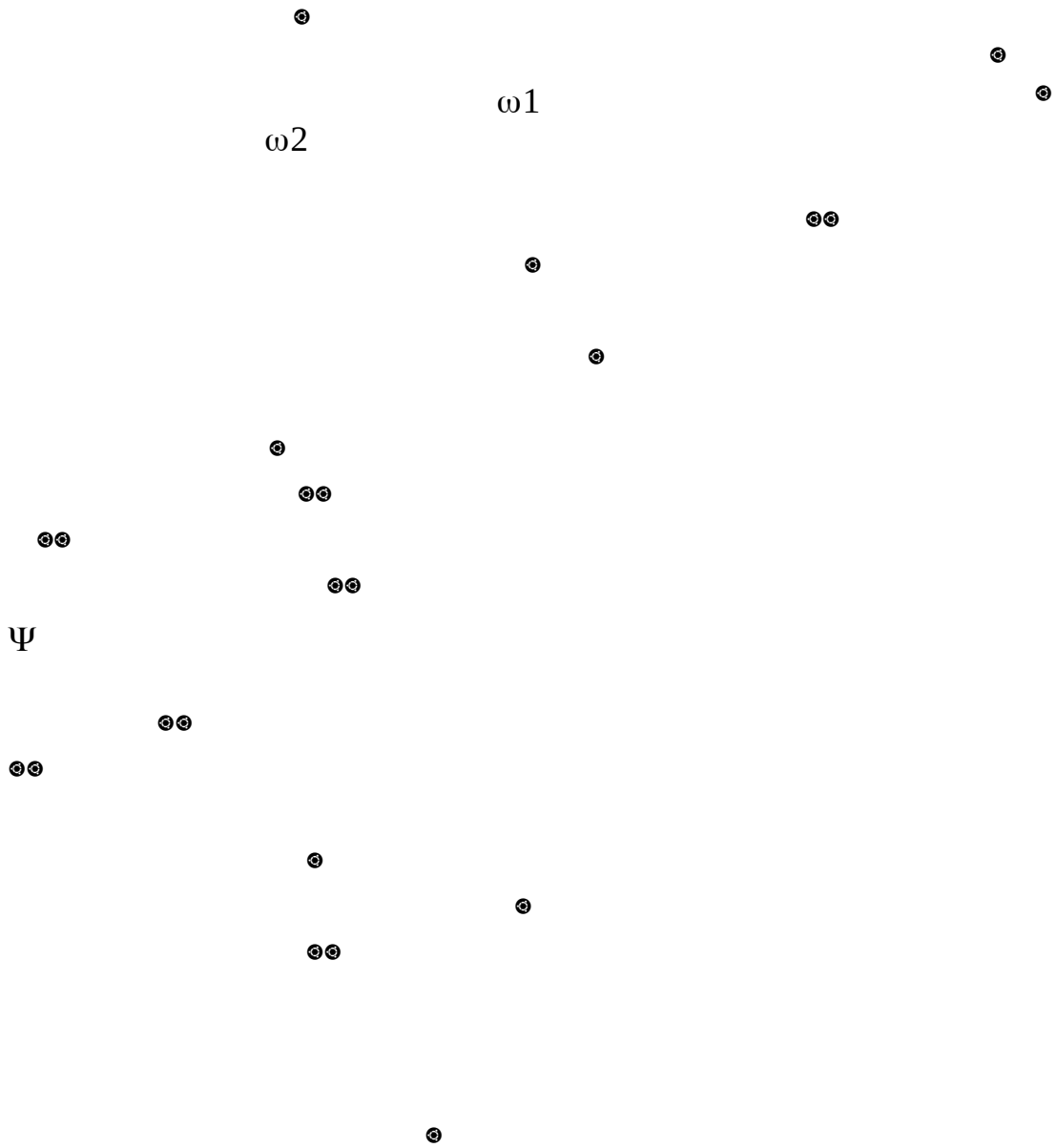
Инвариантные системы подчиненного регулирования тока обеспечивает более эффективную компенсацию возмущений, чем классический контур тока с настройкой по техническому оптимуму. При этом достигается высокое быстродействие, которое не зависит от числа контуров регулирования.

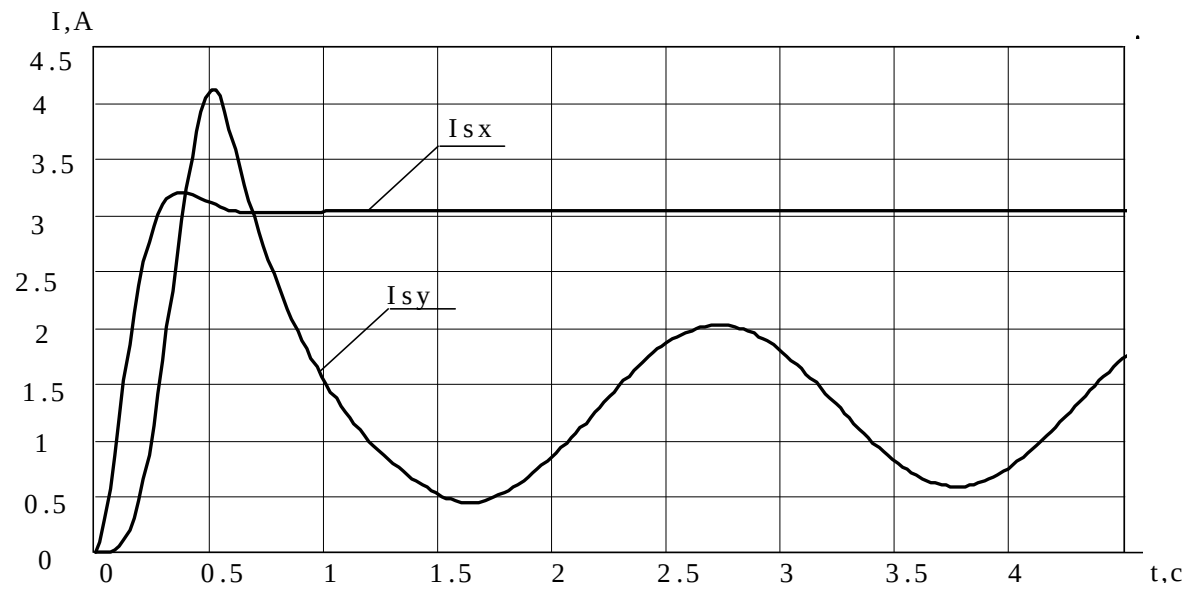
В четвертой главе проведен численный анализ, подтверждающий работоспособность и эффективность разработанных структур ЧТАЭП. При реализации предложенной в работе компенсации возмущений от колебательного момента только за счет положительной обратной связи, колебания скорости снижаются до 7-8% от заданного номинального значения(рис.5).

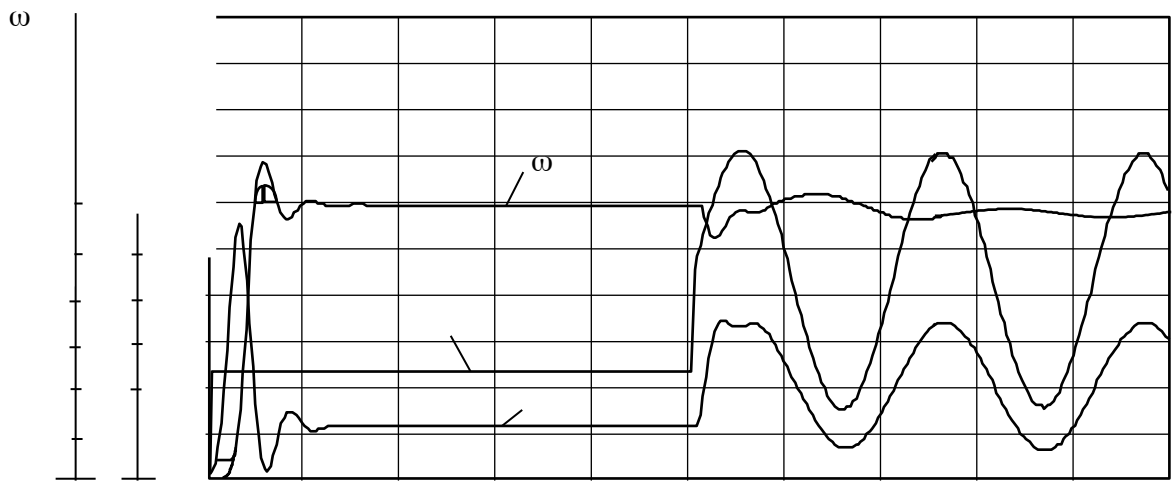
За счет дополнительного использования предложенных методов инвариантной последовательно-параллельной оптимизации, колеба-

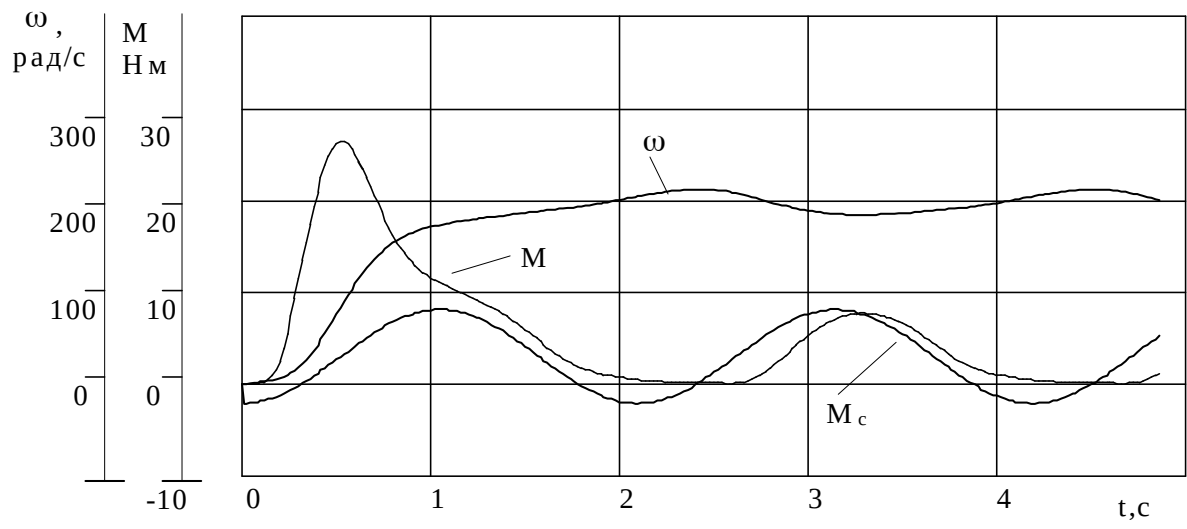
ния ω , ω_1 (Мс) скорости электродвигателя удается снизить до 0.7-1.5% от номинального значения. Лучшее поддержание скорости обеспечивается тем, что система управления током реализует сигнал заданной частоты, активно повторяющий форму кривой колебательного мо-

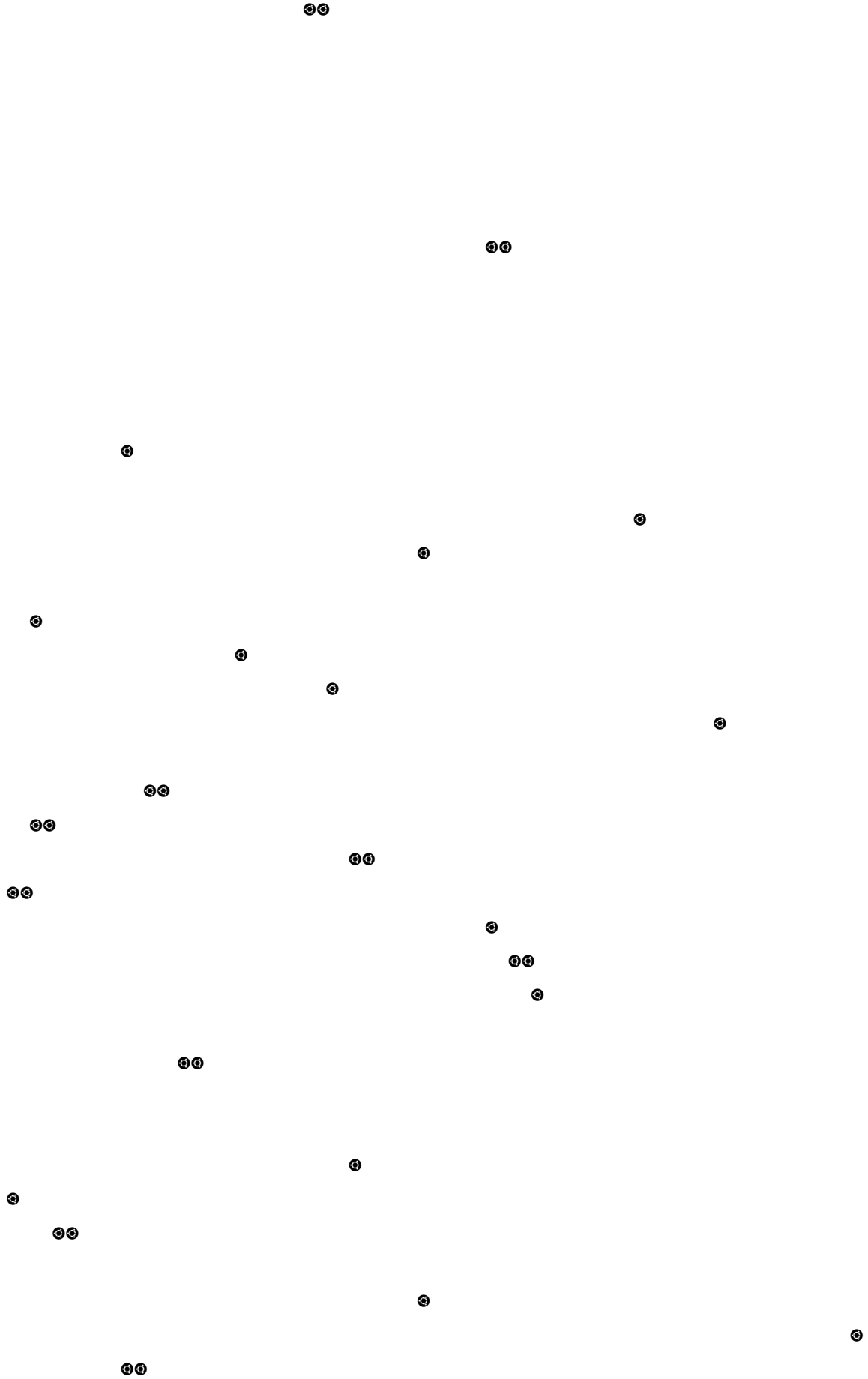




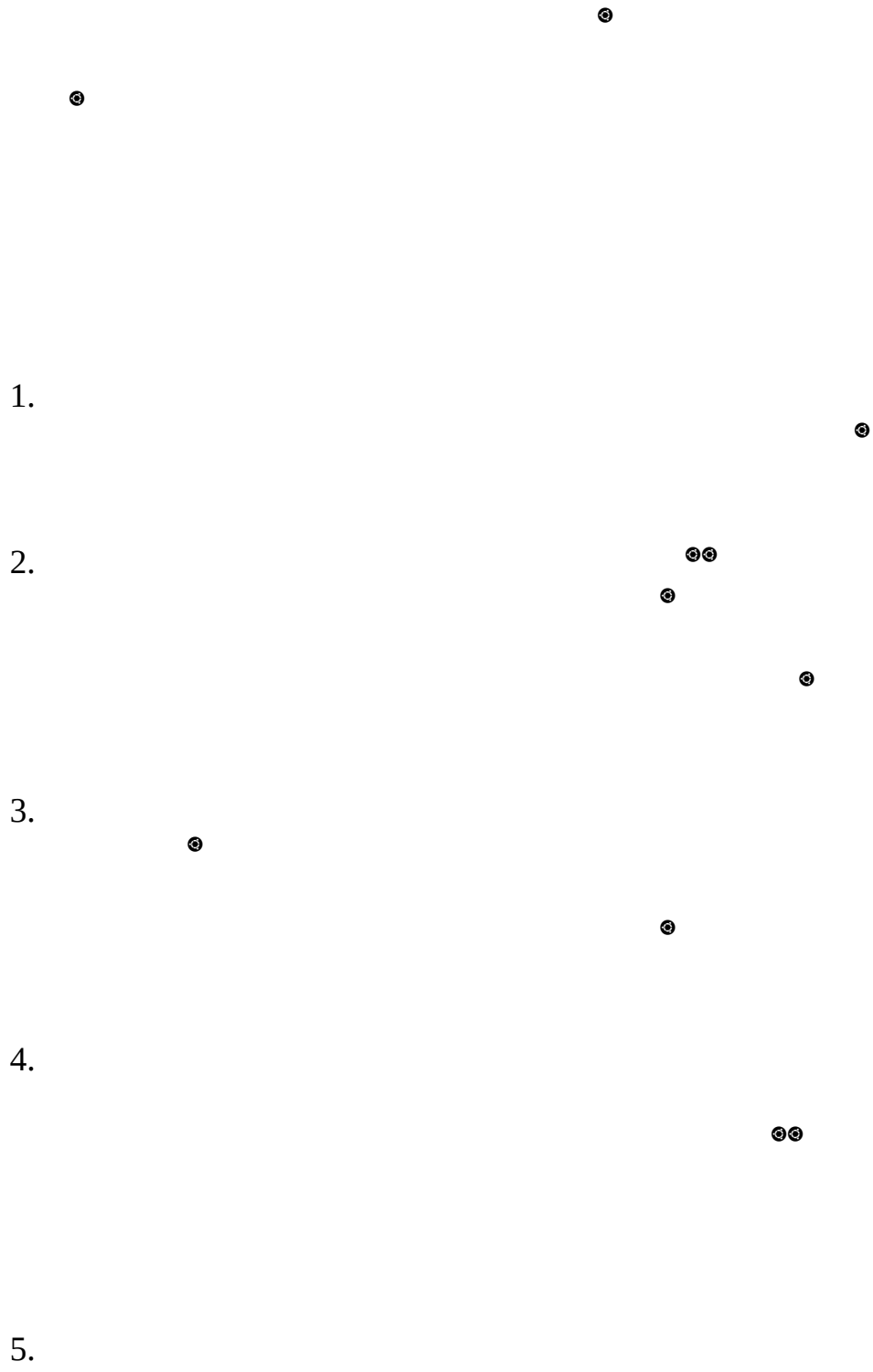












6.



7.



8.



④

④④④④

④

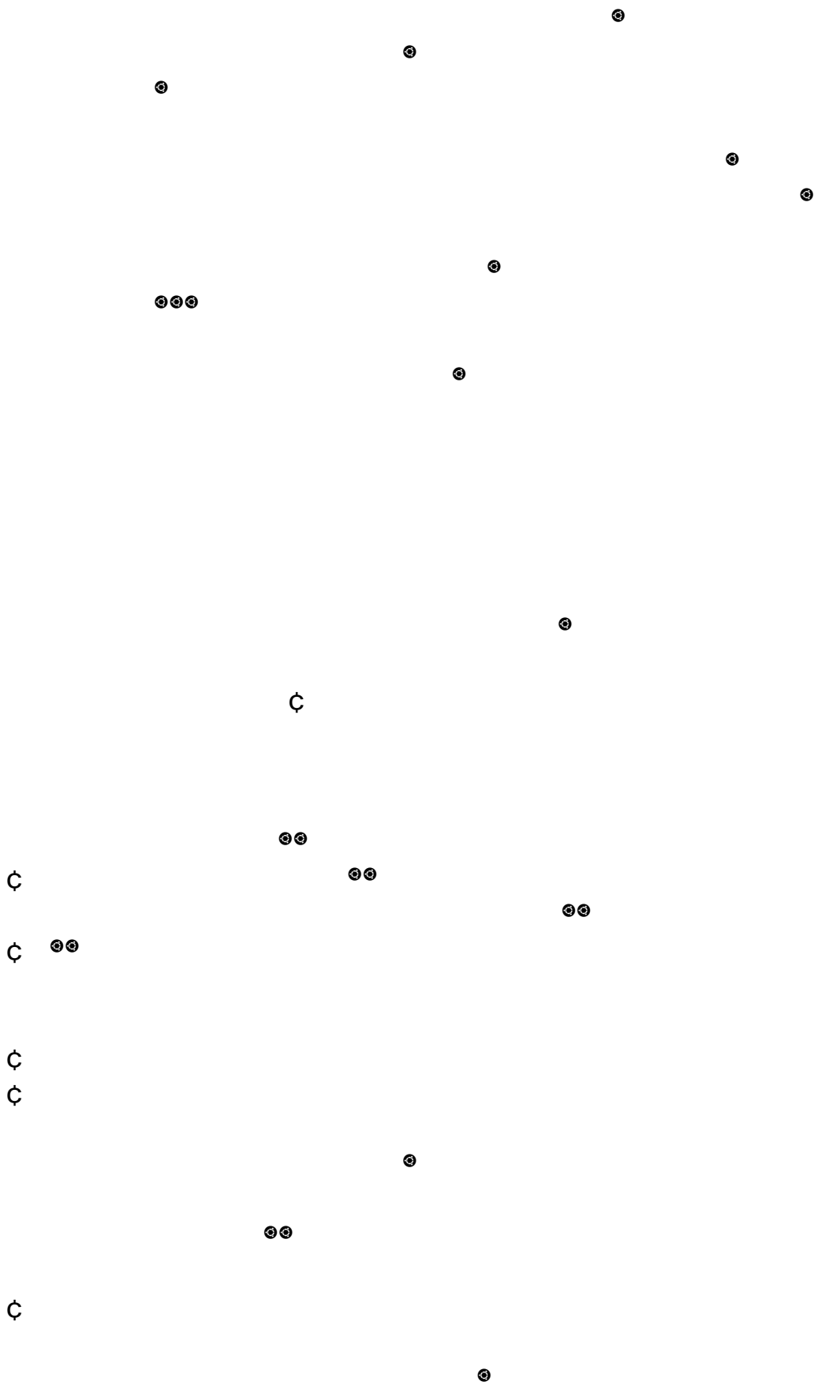
④④

④

④

④

④



⊗⊗

⊗

Ç

⊗⊗

Ç

⊗

⊗⊗

Ç

⊗

⊗

Ç

⊗

Ç

⊗

⊗

Ç

⊗

⊗



☺☺☺