

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

Обобщенная функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением приведена на рис. 1. На схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

Δf_{IK}^* , ΔU_{IK}^* – компенсационные сигналы управления соответственно в канале регулирования частоты и напряжения;

ω – фактическое значение угловой скорости вращения электродвигателя (ротора);

ЗИС – задатчик интенсивности скорости с линейной или S-образной характеристикой;

РС – регулятор скорости;

ФНУ1 – формирователь напряжений управления двухфазным асинхронным двигателем

$$U_{\alpha}^* = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t), \quad U_{\beta}^* = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi f_1 \cdot t);$$

ФНУ2 – преобразователь напряжений управления двухфазным двигателем в напряжения управления трехфазным двигателем.

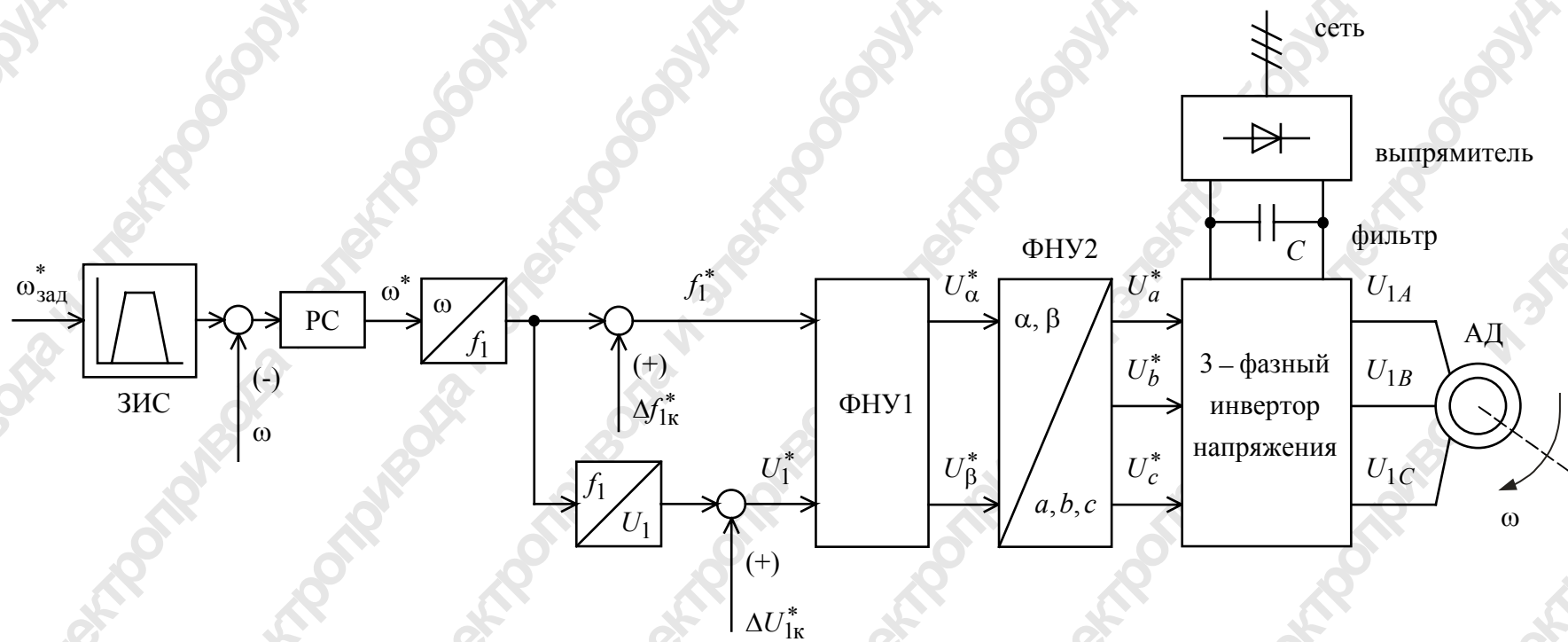


Рис. 1. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

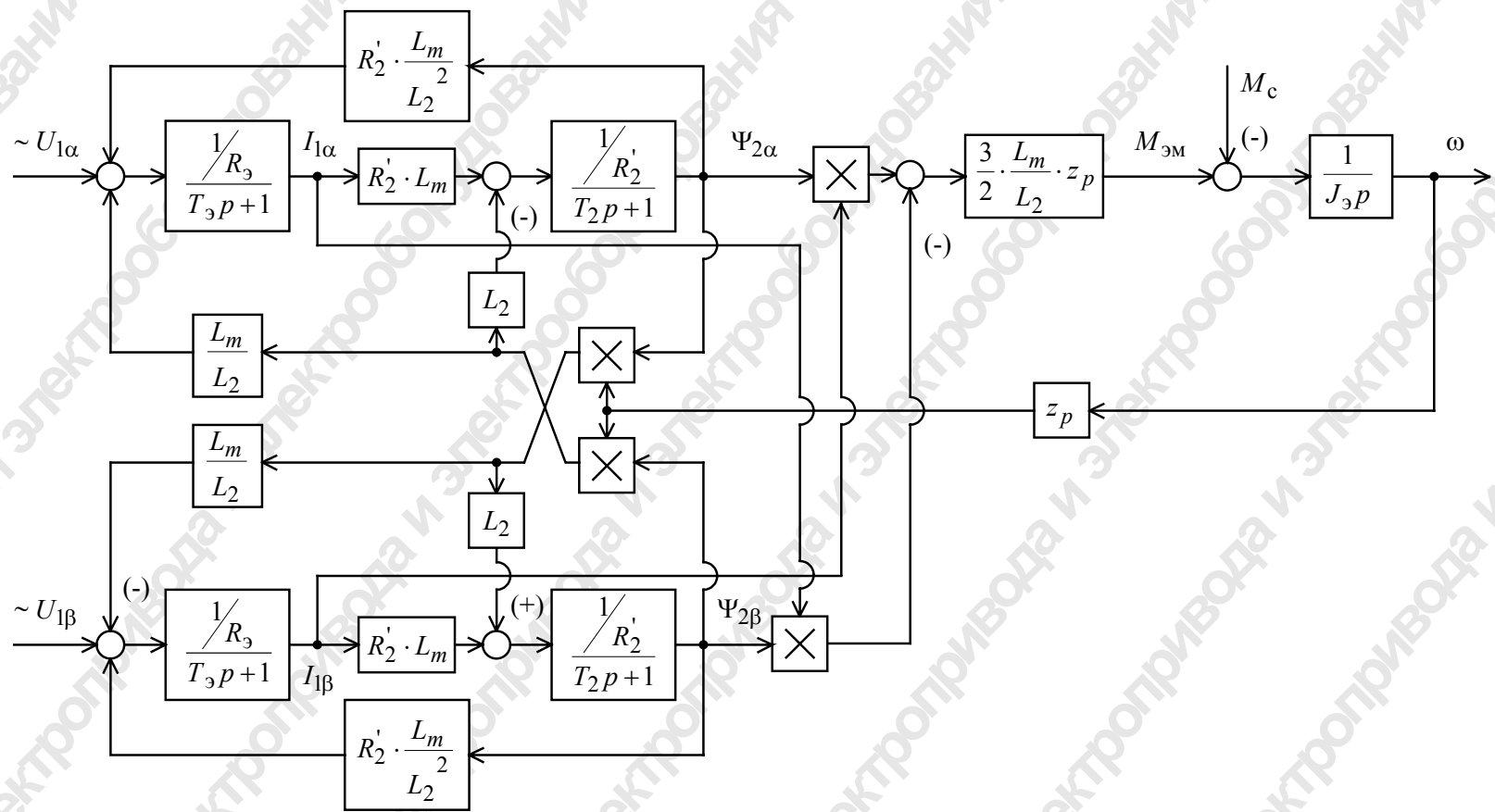


Рис. 2. Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β

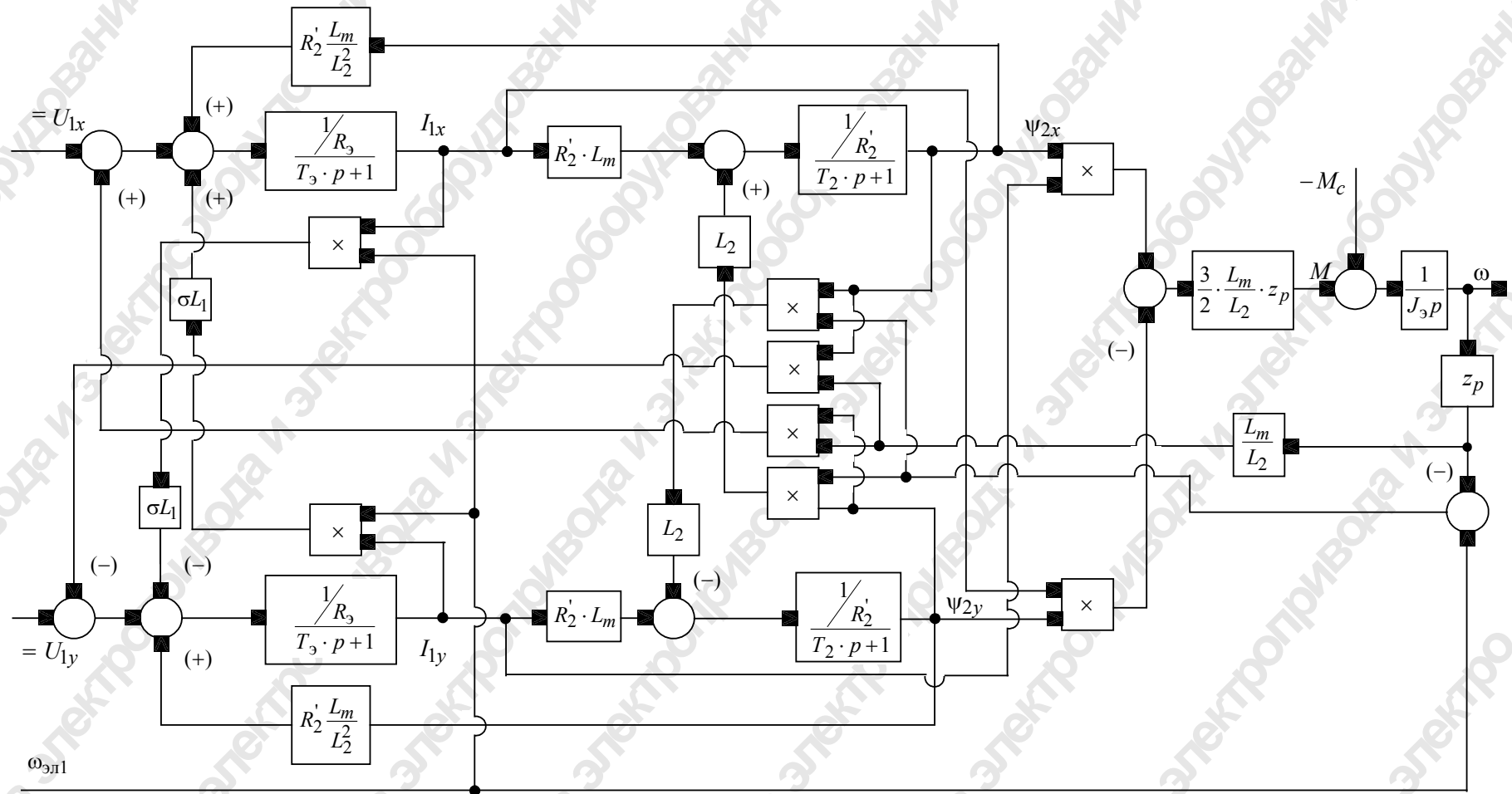


Рис. 3. Структурная схема асинхронного двигателя во вращающейся со скоростью $\omega_{\text{эл1}}$ произвольно ориентированной системе координат x, y

На рис. 4 и 5 приведены функциональные схемы систем управления электроприводов со скалярным управлением фирмы *Siemens*.

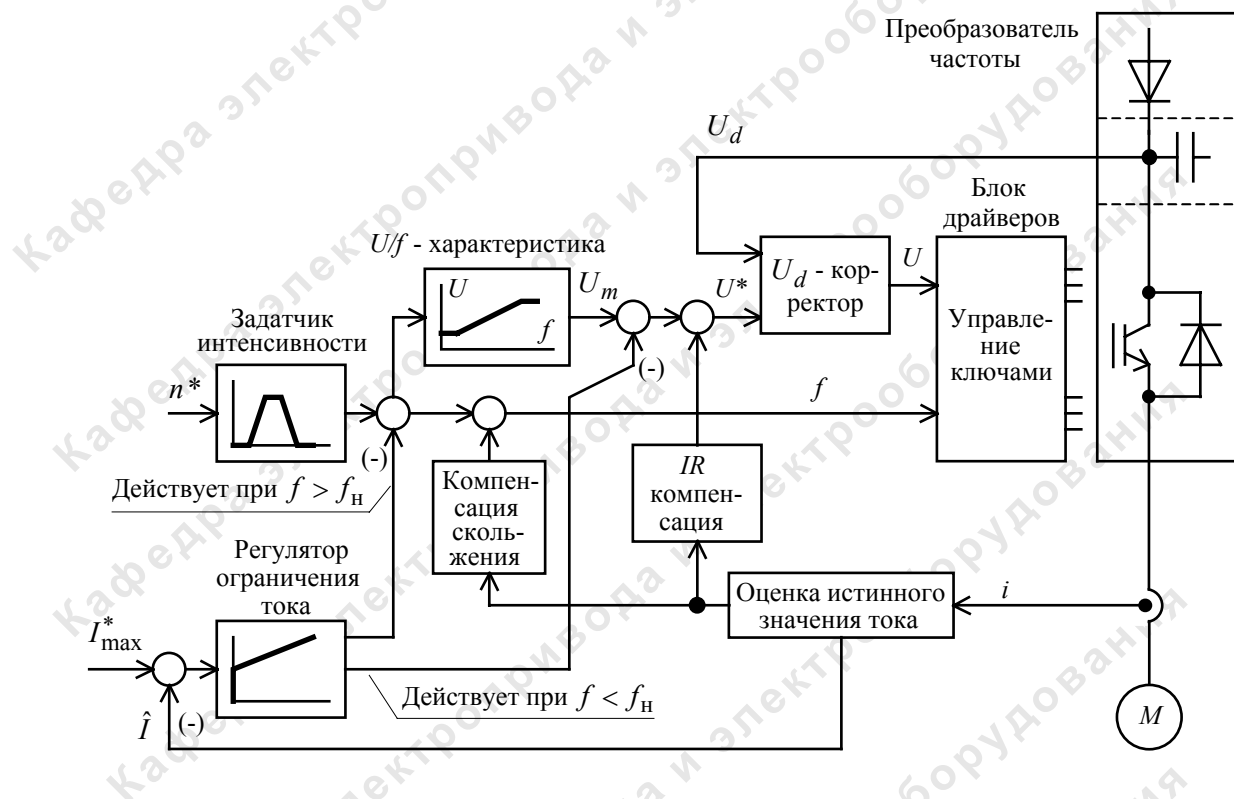


Рис. 4. Функциональная схема асинхронного электропривода со скалярным частотным управлением без датчика скорости

Закон частотного регулирования U/f при скалярном управлении выбирается в зависимости от характера нагрузки производственного механизма. Закон управления с линейной зависимостью между напряжением и частотой ($U_1/f_1 = const$) реализуются в преобразователях частоты для приводов производственных механизмов с постоянным моментом нагрузки. Поддержание постоянства отношения $U_1/f_1 = const$ обеспечивает постоянство потокосцепления и критического момента двигателя во всем диапазоне регулирования скорости изменением частоты. Однако это справедливо лишь при пренебрежимо малом активном сопротивлении обмотки статора, практически же при уменьшении частоты уменьшается и максимальный момент двигателя. В простейшем случае для повышения момента двигателя на малых скоростях вращения в преобразователях предусмотрена функция повышения начального значения выходного напряжения (начального

напряжения вольт-частотной характеристики), применяются модули U_d -коррекции и IR -компенсации (рис. 4). В результате достигается компенсация уменьшения момента двигателя для нагрузок с постоянным моментом сопротивления (например, конвейеры, поршневые компрессоры и насосы) или достигается увеличение пускового момента двигателя для нагрузок с высоким моментом трогания (например, экструдеры). Для регулируемых электроприводов центробежных насосов и вентиляторов используется квадратичная зависимость напряжения от частоты ($U_1/f_1^2 = \text{const}$). За счёт большего снижения напряжения двигателя при уменьшении частоты достигается уменьшение потребляемой электроприводом энергии.

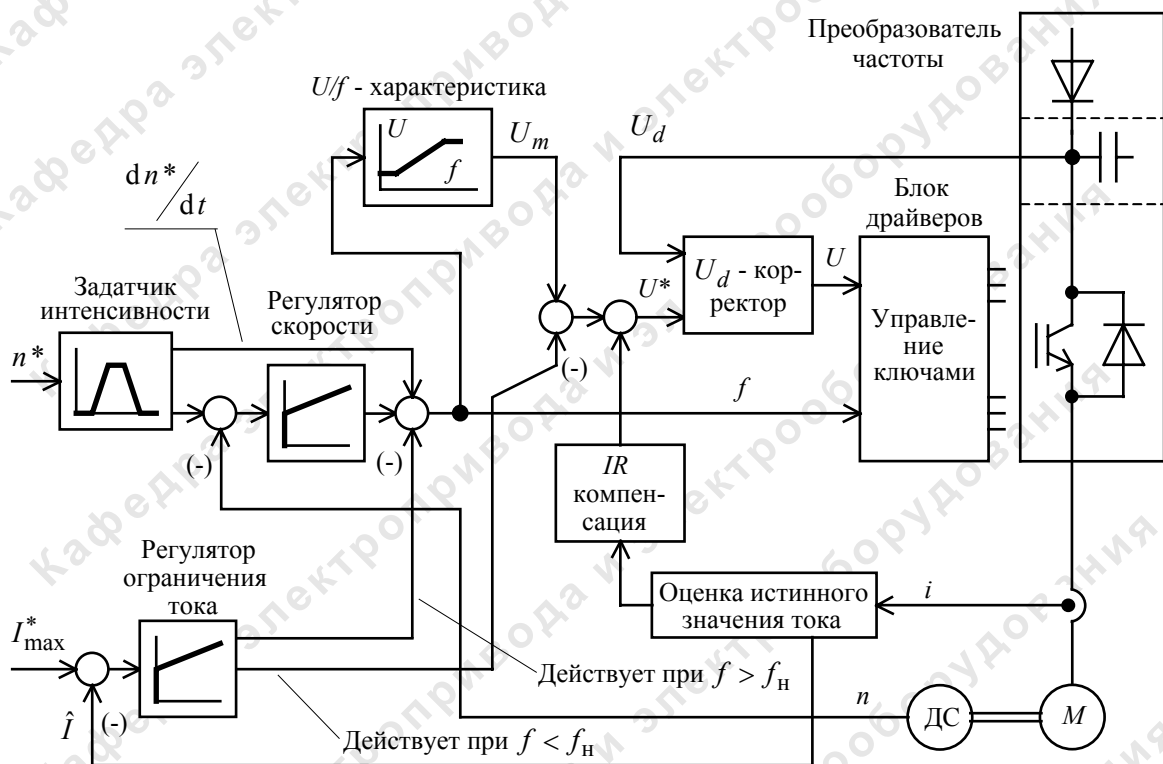


Рис. 5. Функциональная схема асинхронного электропривода со скалярным частотным управлением с датчиком скорости

Из-за ограниченной жесткости рабочей части механических характеристик асинхронных двигателей диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах частотно-регулируемого асинхронного электропривода не может быть более 1:10. Для расширения диапазона регулирования до 20 применяют компенсационные сигналы по скорости

(скольжению) – модуль компенсации скольжения КС (рис. 4), до 100 – замкнутый контур регулирования с регулятором скорости РС и обратной связью по скорости с датчиком и регулятором скорости (рис. 5).

Для ограничения момента двигателя в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки, применяется задатчик интенсивности (ЗИС) с линейной или *S*-образной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости. В электроприводах механизмов, для которых большие кратковременные перегрузки и стопорение двигателя являются рабочими режимами, дополнительно предусматривается система ограничения максимального допустимого тока электропривода с датчиком тока и регулятором тока. Выходной сигнал регулятора тока должен так воздействовать на напряжение и частоту статора, чтобы одновременно с ограничением тока происходило и ограничение момента двигателя на допустимом уровне.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением может быть и двухзонным, когда при частоте (скорости вращения) выше номинальной напряжение двигателя остаётся постоянным, равным номинальному напряжению. Длительно допустимый и кратковременно допустимый моменты двигателя в этом случае должны быть уменьшены на верхних скоростях.

Преобразователи частоты со скалярным управлением могут использоваться в многодвигательных электроприводах (без обратной связи по скорости) для управления параллельно включенными двигателями. Однако в этом случае необходимо будет решить проблемы распределения нагрузок механически взаимосвязанных двигателей и предотвращения перегрузки отдельных не связанных между собой двигателей.

Системы *IR*-компенсации и компенсации скольжения представляют собой нелинейные положительные обратные связи и их применение необходимо только в области малых скоростей двигателя. Ограничение тока двигателя с помощью датчика и регулятора тока необходимо в системах электроприводов, в которых возможны кратковременные перегрузки. Это исключит аварийное отключение привода средствами защитной аппаратуры. Применение систем управления с датчиками и регуляторами скорости в электроприводах со скалярным управлением представляется нецелесообразным вообще, а тем более для двигателей с самовентиляцией.

Можно рекомендовать в приводах длительного режима работы с постоянной скоростью и диапазоном регулирования скорости не больше

1:10 и без особых требований к динамике применение простейших структур и законов частотного управления.

– при вентиляторном характере нагрузки разомкнутые структуры регулирования с квадратичным законом управления $\frac{U}{f^2} = const$ и

возможно с корректировкой вольт-частотной характеристики в интервале малых частот;

– при постоянной нагрузке разомкнутые структуры с линейным законом управления $\frac{U}{f} = const$ с корректировкой вольт-частотной характеристики и возможно IR -компенсации в области малых частот.

Для систем регулируемых электроприводов при диапазоне регулирования скорости более 1:10 или с жесткими требованиями к динамике более целесообразно применять системы векторного управления без датчиков скорости.

Для имитационного моделирования асинхронного электропривода со скалярным управлением используется структурная схема двухфазной модели асинхронного двигателя, составленная в неподвижной системе координат (рис. 2) или во вращающейся системе координат (рис. 3). В первом случае сигналами управления модели являются синусоидальные напряжения обмоток статора двухфазной машины, у которых может изменяться амплитуда $U_{1\alpha m} = U_{1\beta m} = \sqrt{2} \cdot U_1$ и частота f_1 . Во втором случае входными сигналами модели двигателя являются напряжения постоянного тока $U_{1x} = U_{1y} = U_1$ и угловая скорость вращения системы координат $\omega_{кс} = \omega_{эл1} = 2\pi \cdot f_1$.

Системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Системы векторного частотного управления асинхронным двигателем базируются на представлении физических переменных двигателя пространственными векторами, у которых могут изменяться как модули, так и положение в пространстве. Основой для реализации системы управления частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с векторным управлением является структурная схема силового канала, приведённая на рис. 6, составленная на основе двухфазной модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$ (рис. 7).

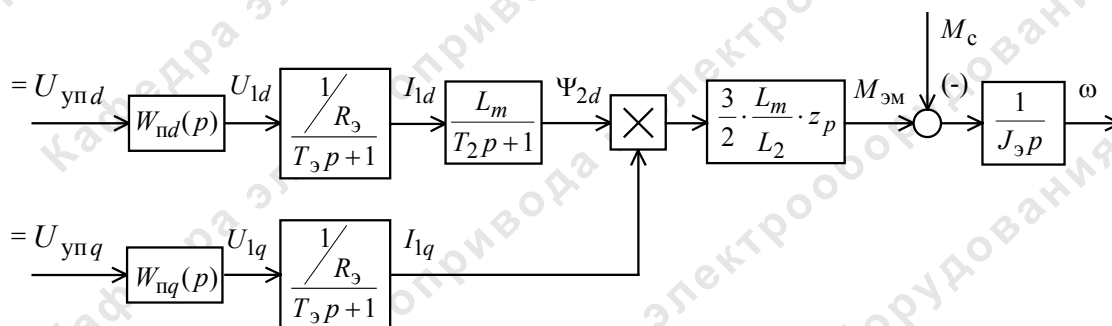


Рис. 6. Структурная схема силового канала преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель во вращающейся системе координат d, q, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и компенсации внутренних обратных связей

В соответствии со структурной схемой рис. 6 при частотно-векторном управлении имеется два управляющих воздействия силовой частью системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель:

– напряжение управления постоянного тока преобразователем U_{1d} , которое формирует ток I_{1d} , являющийся проекцией вектора тока статора \vec{I}_1 на ось d , которая совпадает с направлением вектора потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$;

– напряжение управления постоянного тока преобразователем U_{1q} , которое формирует ток I_{1q} , являющийся проекцией вектора тока статора \vec{I}_1 на ось q координатной системы d, q .

Изменением напряжения U_{1d} можно управлять значением потокосцепления ротора, поддерживая его на заданном уровне $|\vec{\Psi}_2| = \text{const}$ или изменяя в соответствии с заданной зависимостью $|\vec{\Psi}_2| = f(\omega)$.

Напряжением U_{1q} можно управлять значением тока I_{1q} , которое при постоянстве потокосцепления ротора $|\vec{\Psi}_2| = \text{const}$ однозначно определяет электромагнитный момент двигателя $M_{эм}$, поддерживая равенство $M_{эм} = M_c$ в установившихся режимах и $M_{эм} = M_{эм \text{ макс}}$ в пуско-тормозных режимах.

Таким образом, при векторном управлении имеется два независимых канала управления двухфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, что обеспечивает полную аналогию управляемости асинхронного электропривода электроприводу постоянного тока с двигателем независимого возбуждения. Это значит, что принципиально может быть реализована система управления асинхронным электроприводом, совершенно аналогичная системе управления двухзонного электропривода постоянного тока и содержащая две взаимосвязанных, но независимо управляемых системы регулирования:

– САР скорости с внешним контуром регулирования скорости двигателя ω и внутренним подчиненным контуром регулирования тока I_{1q} (электромагнитного момента);

– САР потокосцепления ротора с внешним контуром регулирования потокосцепления ротора Ψ_{2d} и внутренним подчиненным контуром регулирования тока I_{1d}

$$\sqrt{I_{1d}^2 + I_{1q}^2} = \text{mod } \vec{I}_1 = I_{1m} = \sqrt{2} \cdot I_1,$$

где I_1 – действующее значение фазного тока статора.

Поскольку система векторного частотного управления асинхронного электропривода предусматривает регулирование переменных двухфазной машины, то для практической реализации эквивалентного управления физическими переменными трехфазного двигателя в составе сис-

темы управления электропривода должны быть устройства, осуществляющие преобразование переменных трехфазного двигателя в переменные двухфазного и наоборот в соответствии с формулами прямого и обратного преобразования.

Таким образом, управление асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором ведётся с помощью одной статорной (чаще всего трёхфазной) обмотки, ток которой формирует и магнитное поле и определяет вращающий момент. Управлять необходимо модулем и положением вектора тока статора относительно вектора потокосцепления ротора. Это сводится к управлению амплитудой и фазой токов статорных обмоток. Для организации такого управления необходимо иметь информацию о модуле и положении вектора потокосцепления ротора и моменте нагрузки на валу двигателя. Это требует применения специальных электродвигателей, оснащенных датчиками потока, установленными в воздушном зазоре машины, и датчиком скорости вращения на валу двигателя. В такой конфигурации асинхронный электропривод с векторным управлением становится сопоставим с приводом постоянного тока. Но в составе большинства стандартных асинхронных электродвигателей названные датчики отсутствуют, поскольку их введение неизбежно ведёт к усложнению конструкции двигателя и существенному повышению его стоимости.

Современные технологии векторного управления позволяют обойти эти затруднения путём использования математической адаптивной модели двигателя. При этом система управления приводом должна с высокой точностью измерять значения выходных токов и напряжений преобразователя и с высокой скоростью вести расчет параметров двигателя, точно моделировать процессы в двигателе и в конечном результате рассчитывать управления преобразователем.

Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рис. 8.

На схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

– РС, РЧ, РТ – регуляторы скорости, потокосцепления и составляющих тока статора I_{1d} и I_{1q} ;

– УПК1, УПК2 – устройства преобразования координат, соответственно, прямого и обратного.

Для того, чтобы обеспечить независимое управление потокосцеплением ротора и электромагнитным моментом (скоростью) двигателя, необходимо во вращающейся системе координат исключить взаимное влияние САР потокосцепления и САР скорости, характеризуемое в структурной схеме рис. 7 наличием перекрестных обратных связей. Эта задача решается, как правило, блоком компенсации внутренних ЭДС двигателя.

Обратные связи по потокосцеплению и скорости могут быть выполнены с датчиками потока и скорости и без датчиков. В последнем случае значения потокосцепления и скорости находятся расчетным путем на основании эталонной модели электродвигателя. Датчики фазных токов двигателя (практически достаточно двух) аналогового типа, поэтому в измерительной цепи устанавливаются сглаживающие фильтры и АЦП. Полоса пропускания фильтров должна быть больше максимальной частоты питающего напряжения двигателя $f_{1\max}$.

Наличие фильтров в цепях измерения токов электродвигателя определяет инерционность обратных связей по току САУ электропривода. Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит с несущей частотой инвертора $f_{\text{ШИМ}}$ и дополнительного запаздывания в контуры регулирования токов не вносит. Однако АЦП вносит квантование сигналов обратной связи по уровню, которое определяется разрядностью преобразователя.

Информация о потокосцеплении $\bar{\Psi}_2$ может быть получена путем измерения магнитного потока $\bar{\Psi}_m$ в воздушном зазоре машины с помощью встроенных датчиков магнитного потока (например, датчиков Холла), размещенных по осям α, β неподвижной системы координат, и фазных токов обмотки статора i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} .

Скорость вращения электродвигателя измеряется с помощью импульсных датчиков. Значение скорости определяется числом импульсов датчика за интервал измерения. Это определяет постоянное запаздывание в цепи обратной связи по скорости, равное интервалу измерения.

В бездатчиковых системах векторного управления скорость двигателя определяется расчетным путем на основании модели двигателя.

Наличие фильтров в цепях измерения токов электродвигателя определяет инерционность обратных связей по току САУ электропривода. Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит с несущей частотой инвертора $f_{\text{ШИМ}}$ и дополнительного запаздывания в контуры

регулирования токов не вносит. Однако АЦП вносит квантование сигналов обратной связи по уровню, которое определяется разрядностью преобразователя.

Информация о потокосцеплении $\overline{\Psi}_2$ может быть получена путем измерения магнитного потока $\overline{\Psi}_m$ в воздушном зазоре машины с помощью встроенных датчиков магнитного потока (например, датчиков Холла), размещенных по осям α, β неподвижной системы координат, и фазных токов обмотки статора i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} .

Скорость вращения электродвигателя измеряется с помощью импульсных датчиков. Значение скорости определяется числом импульсов датчика за интервал измерения. Это определяет постоянное запаздывание в цепи обратной связи по скорости, равное интервалу измерения.

В бездатчиковых системах векторного управления скорость двигателя определяется расчетным путем на основании модели двигателя.

На рис. 9 и 10 приведены обобщенные функциональные схемы систем управления электроприводов с векторным управлением фирмы *Siemens*.

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением без обратной связи по скорости может обеспечить диапазон регулирования скорости в зоне работы электропривода с постоянным значением потокосцепления $|\overline{\Psi}_2| = \text{const}$ не превышающий $1:(10 \div 20)$, с обратной связью по скорости, но без датчика скорости – до $1:100$, а с датчиком скорости – до $1:1000$.

Векторное управление не может быть использовано для группы двигателей, включенных параллельно и питающихся от общего преобразователя, однако в преобразователях частоты с векторным управлением предусматривается возможность синхронизированного управления индивидуальными электроприводами многодвигательных механизмов, взаимосвязанных механически по нагрузке или через обрабатываемый материал, по принципу “ведущий – ведомый”.

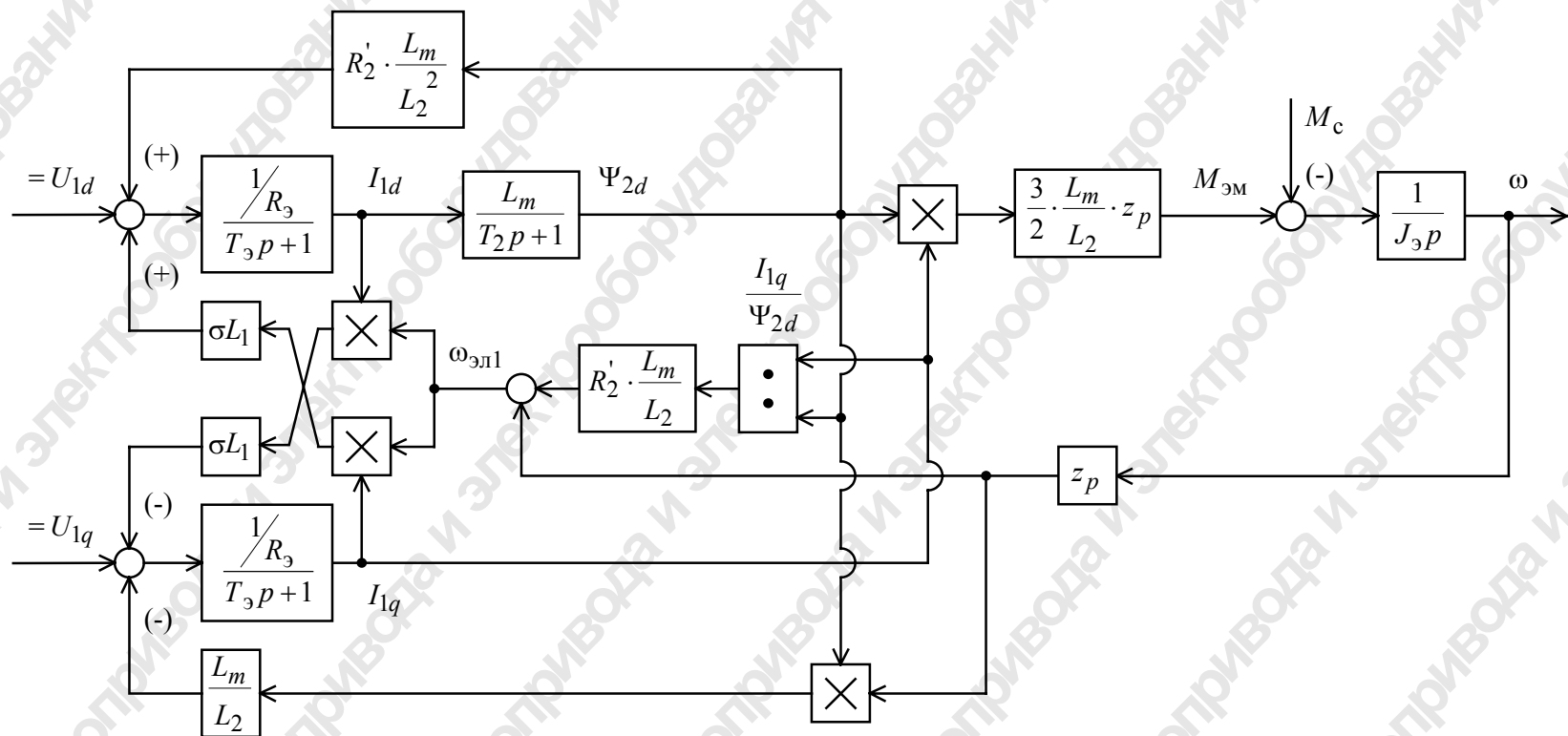


Рис. 7. Структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат d, q, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора

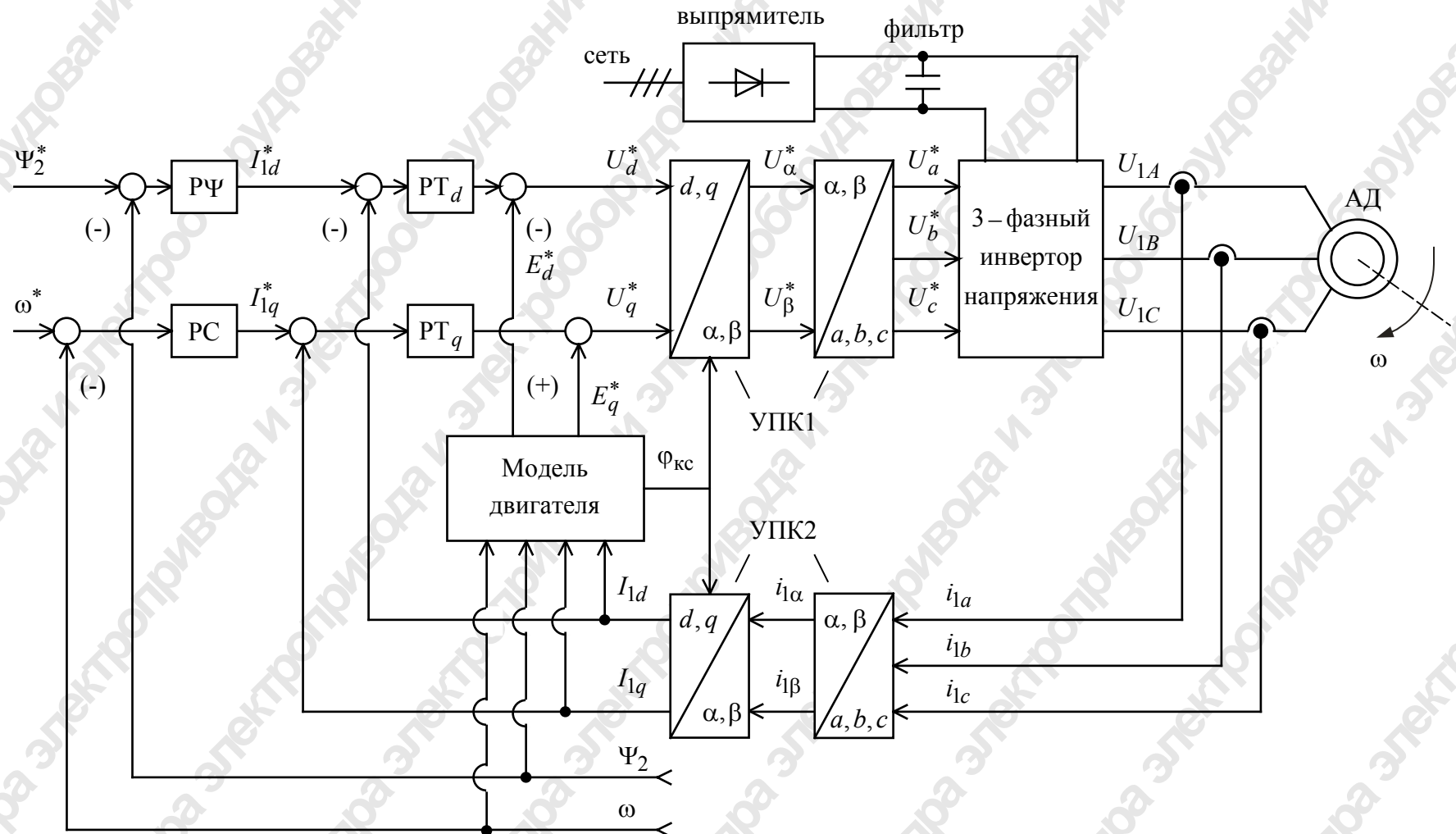


Рис. 8. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

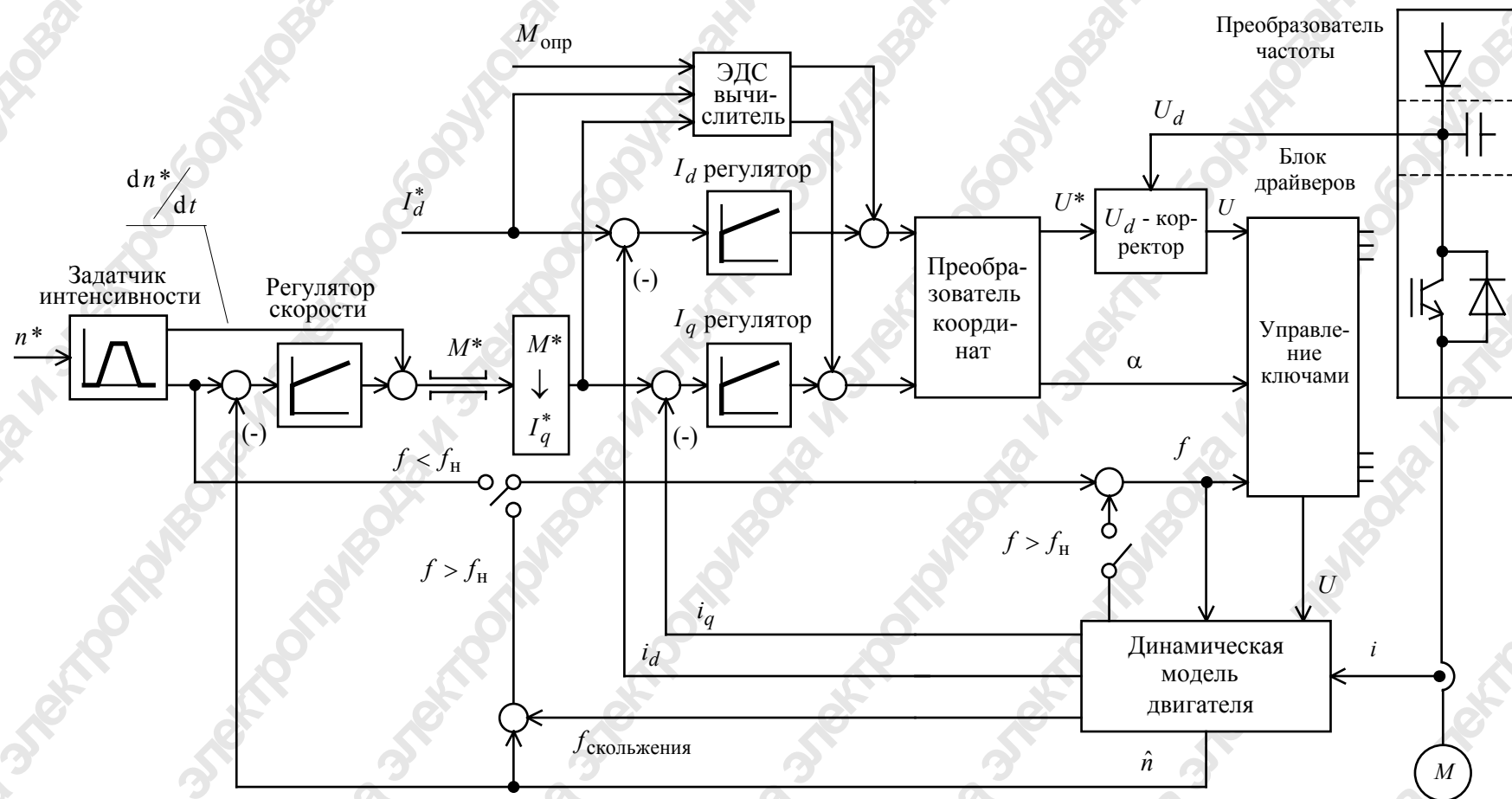


Рис. 9. Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным частотным управлением без датчика скорости

