

Э.Л. Греков, А.Я. Микитченко, В.И. Сорокин

АНАЛИЗ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ, ВЫПОЛНЕННЫМ ПО СИСТЕМЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (НПЧ-АД)

Анализируются различные структуры систем управления непосредственным преобразователем частоты. Исследования проведены на основе результатов физического моделирования. Рассматриваются регуляторы и структурные решения, обеспечивающие устойчивую работу привода на повышенных выходных частотах.

Системы с тиристорными непосредственными преобразователями частоты из-за простоты силовой схемы, естественной коммутации (ЕК), малой стоимости и высокой надежности имеют широкую область применения: от вентиляторов и насосов до подъемных установок и экскаваторов. Основным отличием и достоинством их перед многочисленными импортными преобразователями частоты на транзисторах является возможность отдавать механическую энергию в сеть, что особенно актуально в установках с активным моментом (подъемники). Это делает возможным также их использование в качестве преобразовательных установок малых электростанций (гидро- и ветростанций), работающих параллельно с сетью. Основным же недостатком НПЧ с ЕК является невозможность закрытия тиристора в нужный момент, что определяет специфические условия работы преобразователя: ограниченная верхняя граница регулируемой частоты, наличие субгармоник в выходных напряжениях и токе.

В данной статье рассматриваются три структуры управления непосредственным преобразователем частоты с разными обратными связями:

- по скорости (абсолютному скольжению);
- по ЭДС двигателя;
- по потоку двигателя.

При построении и рассмотрении структур преследовались следующие цели:

- максимальное упрощение систем управления (наибольшая дешевизна и простота в настройке);
- анализ работы перечисленных выше структур в диапазоне частот от 0 до максимально возможной в районе 50 Гц;
- проектирование структуры управления с целью достижения максимальной устойчивости работы НПЧ в области высоких частот.
- возможность создания моментов при частоте тока статора равной нулю (электрическое удержание груза в подъемных установках);

Обычно анализ проводится аналитическими методами. Однако математическое описание подоб-

ных структур весьма сложно (1) из-за наличия большого количества нелинейностей. В некоторых случаях (2) для получения математических зависимостей, поддающихся анализу, идут на упрощение законов управления. Более приемлемым подходом следует считать использование математических моделей и численных методов исследования. Но адекватность модели реальному объекту во многом зависит от тщательности воспроизведения особенностей фазных преобразователей, входящих в состав непосредственного преобразователя частоты, то есть особенностей силовой схемы, системы импульсно-фазового управления (СИФУ), логики работы комплектов. Математическая модель оказывается не проще реального объекта. Поэтому мы в своем исследовании склоняемся к физическому моделированию. Кроме указанной, имеется еще ряд причин в пользу такого подхода:

а) в своих исследованиях мы находимся на стадии выбора варианта для промышленного внедрения, и на этом этапе весьма важно присутствие при анализе максимально возможного количества факторов, влияющих на работу системы;

б) физическое моделирование обеспечивает максимальное присутствие реальных особенностей исследуемого объекта;

в) физическое моделирование электромеханических систем над математическим имеет одно бесспорное и крайне важное преимущество – это возможность восприятия звука. Электромагнитные и электромеханические шумы позволяют на слух безошибочно отделить добротную работу системы от аномальных и аварийных режимов.

Для того чтобы правильно ориентироваться в результатах этой работы, следует отметить основные особенности системы НПЧ-АД, общие для всех рассматриваемых структур. Преобразователь частоты выполнен на базе трехфазных преобразователей серии ПТЭМ-2Р производства АО «Рудоавтоматика», имеющих трехфазную нулевую реверсивную силовую схему с отдельным управлением. Импульсы управления СИФУ имеют длитель-

ность 120 эл. градусов. Преобразователи управляются сигналами синусоидальной формы регулируемой частоты и амплитуды. Нагрузка (обмотки двигателя) соединена в звезду, причем нулевая точка нагрузки с нулем трансформатора связи не имеет. В такой схеме увеличивается пульсность тока в нагрузке, улучшается форма тока – это создает потенциальную возможность расширения диапазонов регулирования как по частоте, так и по нагрузке. Однако, как минимум, всегда в работе находятся два фазных преобразователя и один из них может «продавливать» ток через другой, хотя ему пора уже выключиться. Две группы из разных фазных преобразователей образуют мост, одна из групп которого всегда зарегулирована – отсюда ощутимая потеря напряжения на нагрузке.

Надо отметить, что наличие субгармоник в выходном напряжении заставляет раскачиваться ротор АД с частотами, меньшими чем частота статора. Для уменьшения этого эффекта необходимо в самой структуре учитывать их влияние и компенсировать путем наложения субгармоники такой же частоты и противоположной по фазе. Выделение этих низкочастотных колебаний скорости возможно с помощью датчика скорости вращения (тахогенератора). Их компенсацию можно осуществить путем специально подобранных регуляторов пропорционально-интегрирующего (ПИ) и инерционно-форсирующего (ИФ) типов, которые могут без сдвига фаз пропускать «паразитные» колебания. Принципиальная схема таких регуляторов представлена на рисунке 1.

Передаточная функция, изображенного на рисунке 1 регулятора, в общем случае имеет вид:

$$W_p = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_3 * \left(\frac{1}{Cp} + R_2 \right)}{R_3 + R_2 + \frac{1}{Cp}} = \frac{R_3 * \frac{R_2 Cp + 1}{R_1}}{(R_3 + R_2) Cp + 1} = K_{\text{ИФ}} * \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (1)$$

где p – оператор дифференцирования,

$K_{\text{ИФ}}$ – коэффициент усиления ИФ регулятора,

T_1 – постоянная времени форсирующего звена,

T_2 – постоянная времени инерционного звена.

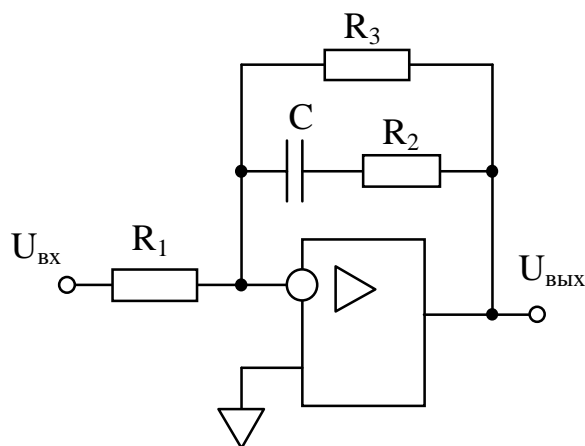


Рисунок 1. Принципиальная схема инерционно-форсирующего и ПИ-регуляторов.

При $R_3 = \infty$ получаем передаточную функцию ПИ-регулятора:

$$W_p^{\text{ПИ}} = \frac{1}{R_1} * \frac{R_2 Cp + 1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) Cp + \frac{1}{R_3}} = \frac{R_2}{R_1} * \frac{R_2 Cp + 1}{R_2 Cp} = K_{\text{ПИ}} * \frac{T_1 p + 1}{T_1 p}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ПИ}}$ – коэффициент усиления ПИ-регулятора.

Логарифмические характеристики данного типа регуляторов показаны на рисунке 2.

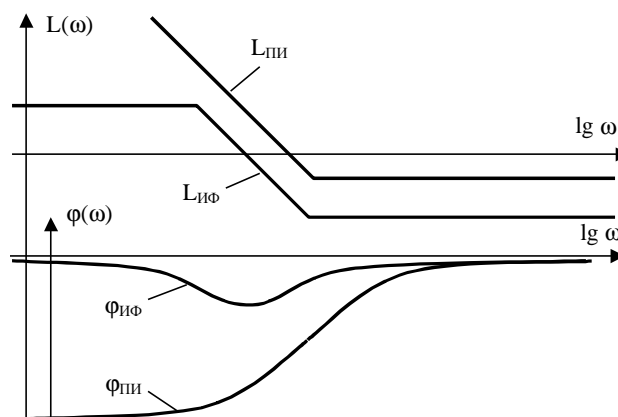


Рисунок 2. Логарифмические характеристики ПИ- и ИФ- регулятора.

Как видно из рисунка 2, ИФ- регулятор имеет более благоприятную для подавления субгармоник фазовую характеристику, которая имеет близкое к нулевому значение при малых частотах. В области высоких частот данный регулятор работает как

ПИ-регулятор. В свою очередь последний позволяет создавать астатические системы, что недостижимо с ИФ-регулятором.

Во всех рассматриваемых ниже структурах применяются оба эти регулятора, в зависимости от возможности их установки.

Для экспериментального исследования применялся асинхронный двигатель типа АИР-112М, $P_n=4$ кВт, $I_n=9.1$ А, $n_n=950$ об/мин.

Структура управления системы НПЧ-АД с обратной связью по скольжению показана на рисунке 3. Задание на частоту тока статора остается неизменным при постоянном сигнале задания $U_{зад}$. На вход регулятора скорости РС подается разница между напряжением задания (оно же является и скоростью холостого хода двигателя) и фактическим значением скорости вращения ротора, поступающим с тахогенератора ВР. Вычисленное таким образом скольжение является сигналом, определяющим активную составляющую тока статора I_a . Реактивная составляющая I_c жестко задана и не изменяется. Постоянные сигналы преобразуются в переменные с помощью генератора синусоидальных сигналов ГСС. Преобразователь фаз 2/3 преобразует сигналы двухфазной системы координат в трехфазную. Асинхронный двигатель питается от трех силовых преобразователей ТП1, ТП2, ТП3, охваченных отрицательной обратной связью по току (с помощью датчиков тока ДТ1, ДТ2, ДТ3). Так как при работе двигателя под нагрузкой скольжение есть всегда (а значит есть и ошибка регулирования), то астатическую систему в данной структуре применить нельзя, то есть регулятор скорости можно сделать только инерционно-форсирующим.

Механические характеристики данной структуры приведены на рисунке 4.

При исследовании можно указать следующие достоинства и недостатки:

а) достоинства:

- момент на валу двигателя создается вплоть до номинального (M_n) на частотах до 35 Гц;
- создание момента до $2 M_n$ при задании частоты тока статора равной нулю;
- создание моментов в генераторном режиме до M_n на частотах до 32 Гц.

б) недостатки:

- максимальный момент на валу двигателя падает (как в двигательном, так и в генераторном режимах) при увеличении частоты выходного напряжения НПЧ больше 35 Гц;
- требование наличия пристраиваемого тахогенератора в механической системе.

Структура с управлением по ЭДС двигателя показана на рисунке 5. Напряжение на фазах двигателя определяется с помощью датчиков напряжения ДН1, ДН2, ДН3. Синусоидальные сигналы ЭДС E_A, E_B, E_C рассчитываются с помощью блоков выделения ЭДС $E1, E2, E3$, которые реализуют следующее уравнение:

$$e(t) = u(t) - i(t) * R_1 - L_1 * \frac{di(t)}{dt}, \quad (3)$$

где R_1, L_1 – параметры цепи статора двигателя, $u(t)$ – мгновенное значение фазного напряжения двигателя, $i(t)$ – мгновенное значение тока фазы двигателя, измеренного с помощью датчиков тока ДТ1, ДТ2, ДТ3.

Далее полученные ЭДС преобразуются в двухфазные сигналы, и из них выделяется модуль $|E|$, который является сигналом обратной связи. В данной структуре можно применить статическую или астатическую настройки (ИФ- или ПИ-регулятор). Для повышения устойчивости работы на повышенных частотах (более 25 Гц) применяется также отрицательная связь по частоте:

$$\omega_1 = \omega_{зад} - \Delta\omega, \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ – выходной сигнал регулятора ЭДС.

Данная связь дополнительно раскачивает выходную частоту (а значит и ротор двигателя) но в противофазе относительно субгармонических составляющих выходного напряжения, таким образом уменьшая размах колебаний скорости вращения.

Остальные элементы структуры остались прежними.

Механические характеристики приведены на рисунке 6.

При исследовании данной структуры можно указать следующие достоинства и недостатки:

а) достоинства:

- нет дополнительной машины на валу ротора для измерения скорости вращения;
- регулирование ЭДС двигателя можно сделать без статической ошибки (астатическая система);
- получение максимальных моментов в области двигательного режима при высоких выходных частотах (более 25 Гц) не хуже чем в предыдущей системе;

– получение более высоких моментов (больше M_n) в области генераторного торможения и при частотах больше 25 Гц.

б) недостатки:

- малый максимальный момент на валу двигателя при задании выходной частоты, равной 0;

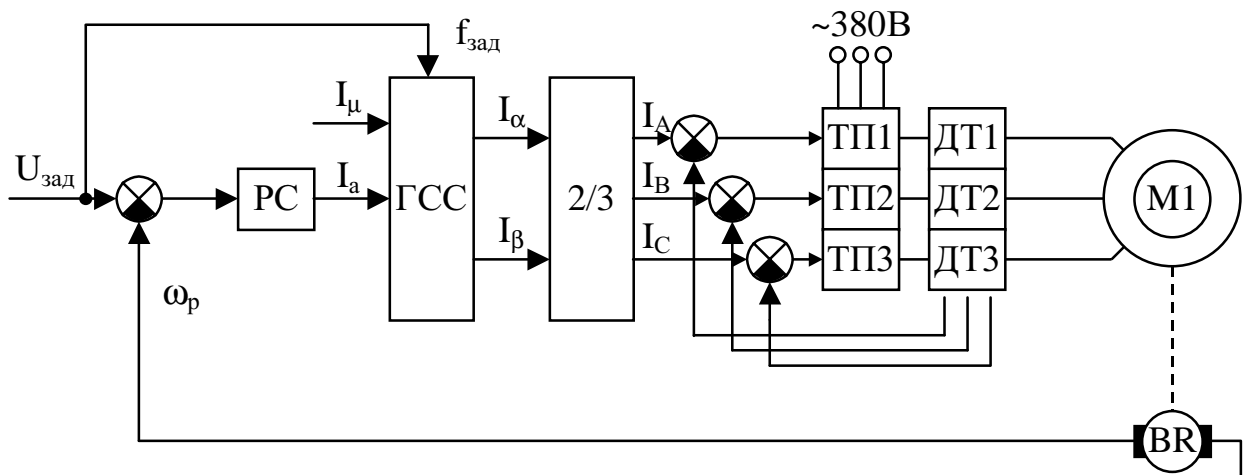


Рисунок 3. Структурная схема системы НПЧ-АД с управлением по абсолютному скольжению.

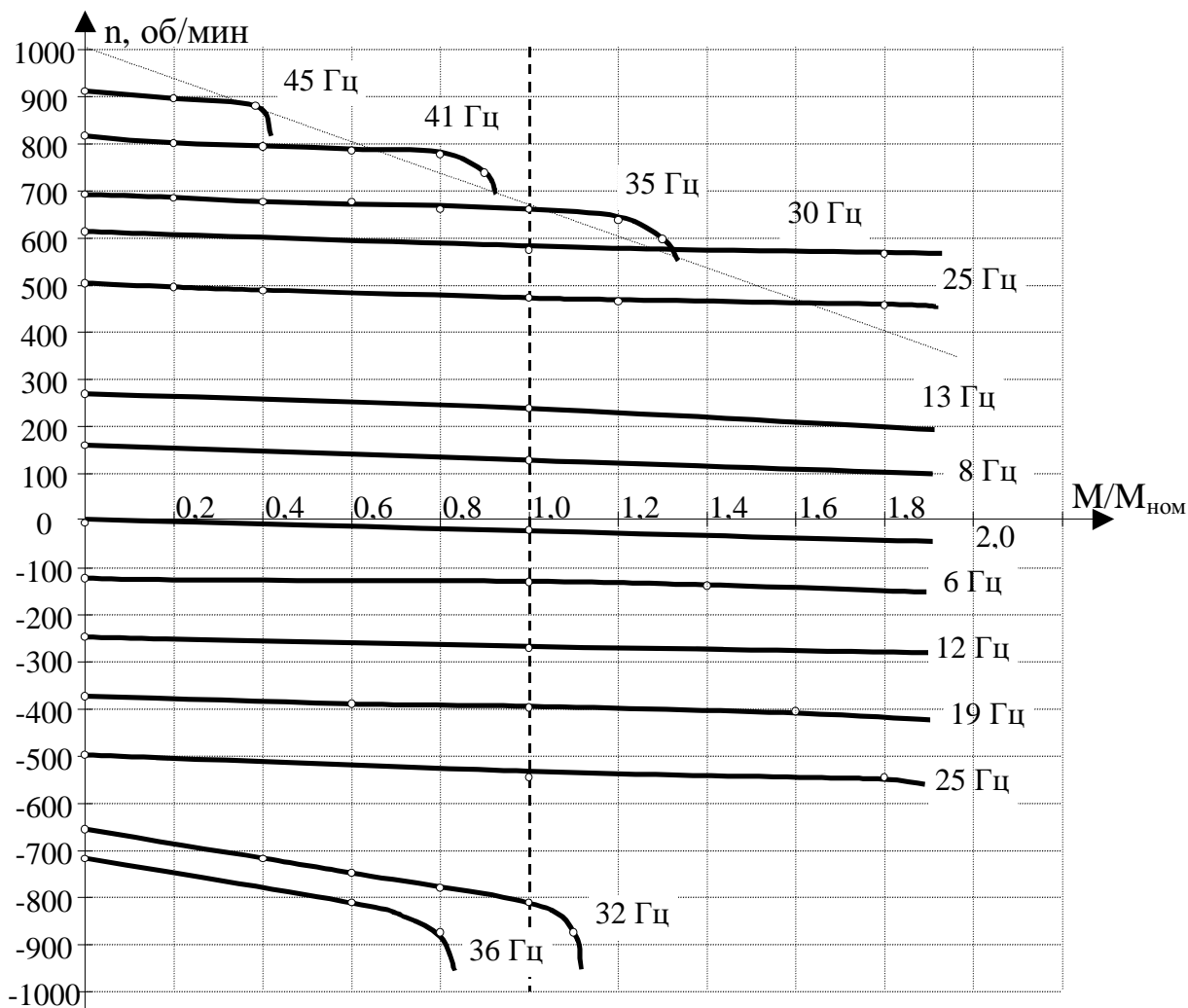


Рисунок 4. Механические характеристики НПЧ-АД при обратной связи по абсолютному скольжению.

– жесткость механических характеристик из-за влияния отрицательной связи по частоте меньше, чем в предыдущей структуре.

Структура управления по потоку показана на рисунке 7.

Она отличается от предыдущей следующим:

- наличием интеграторов для вычисления потокосцепления из сигналов ЭДС двигателя,
- постоянным заданием $\Psi_{\text{зад}}$, задающим уровень потокосцепления в машине,
- положительной связью по частоте ($\omega_1 = \omega_{\text{зад}} + \Delta\omega$).

Надо отметить, что вычисленное значение потокосцепления будет отличаться от реального вследствие ошибок вычисления ЭДС и интегратора. Более того, при значении выходной частоты, равной 0, вычисление потока будет неправильным из-за отсутствия ЭДС вращения.

Механические характеристики данной структуры представлены на рисунке 8.

Основными достоинствами и недостатками являются:

а) достоинства:

- нет дополнительной машины на валу ротора для измерения скорости вращения;
- регулирование ЭДС двигателя можно сделать без статической ошибки (астати́ческая система);
- жесткость механической характеристики не меньше аналогичного показателя при обратной связи по абсолютному скольжению;
- максимальный момент в двигательном режиме и при частоте более 25 Гц имеет значения, не хуже чем при первой структуре управления;
- максимальный момент в режиме генераторного торможения превышает $1.5 M_{\text{н}}$ во всем диапазоне регулирования частот (даже в районе 0 Гц);

б) недостатки:

- неудовлетворительная работа структуры в двигательном режиме при выходных частотах НПЧ около 0 Гц (малое значение или отсутствие момента на валу двигателя);

Из анализа каждой структуры можно сделать следующие выводы:

1) ни одна из рассмотренных структур не позволяет получить абсолютно жесткую механическую характеристику;

2) для получения больших моментов на валу двигателя при выходной частоте НПЧ около 0 Гц необходимо иметь реальную величину скорости вращения (тахогенератор) или потокосцепления (датчики Холла);

3) в области генераторного торможения все рассмотренные структуры имеют удовлетворительные механические характеристики. Наибольшую перегрузочную способность в этом квадранте имеет структура управления по потоку.

4) независимо от структуры управления максимальный момент механических характеристик в области двигательного режима уменьшается (меньше чем $M_{\text{н}}$) при регулировании выходной частоты более 35 Гц, что связано с особенностями работы НПЧ.

Последний вывод требует внимательного анализа, так как может явиться предметом нового подхода к решению проблемы расширения диапазона регулирования в электроприводе с непосредственным преобразователем частоты.

Дело том, что характер ограничения верхнего предела механических характеристик для всех рассматриваемых структур управления одинаков. Он не зависит от способа управления системой и связан с нехваткой запаса по напряжению преобразователя частоты.

С другой стороны известно, что двигатель в системе тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель на частоте 50 Гц развивает максимальный момент, примерно равный критическому в естественной схеме включения. В преобразователе частоты с автономным инвертором напряжения (АИН) асинхронный двигатель также именно в этом диапазоне 30-50 Гц развивает наибольшие моменты. И связано это с тем, что перед формированием переменного напряжения на двигателе сначала сетевое напряжение выпрямляется звеном постоянного тока практически до амплитудного значения. Из такого напряжения средствами ШИМ формируется достаточный уровень действующего напряжения, почти равный сетевому.

В нашем же случае с НПЧ форма анодного напряжения, синусоидальный сигнал управления и фаза между ними находятся в таком неудачном сочетании в этом диапазоне частот, что напряжения, приложенные к нагрузке, имеют значительные «выщерблены» по амплитуде, которые резко снижают их действующее значение. Поэтому, чтобы поднять напряжение до такого же уровня как в АИН, необходимо в этой зоне отказаться от синусоидальных сигналов управления фазными преобразователями, заменив их прямоугольными ступенчатыми периодическими функциями с регулируемой частотой и амплитудой (как в автономном инверторе тока (АИТ)), обеспечивающей в пределе максимальное значение выпрямленного напряжения для мостовой схемы.

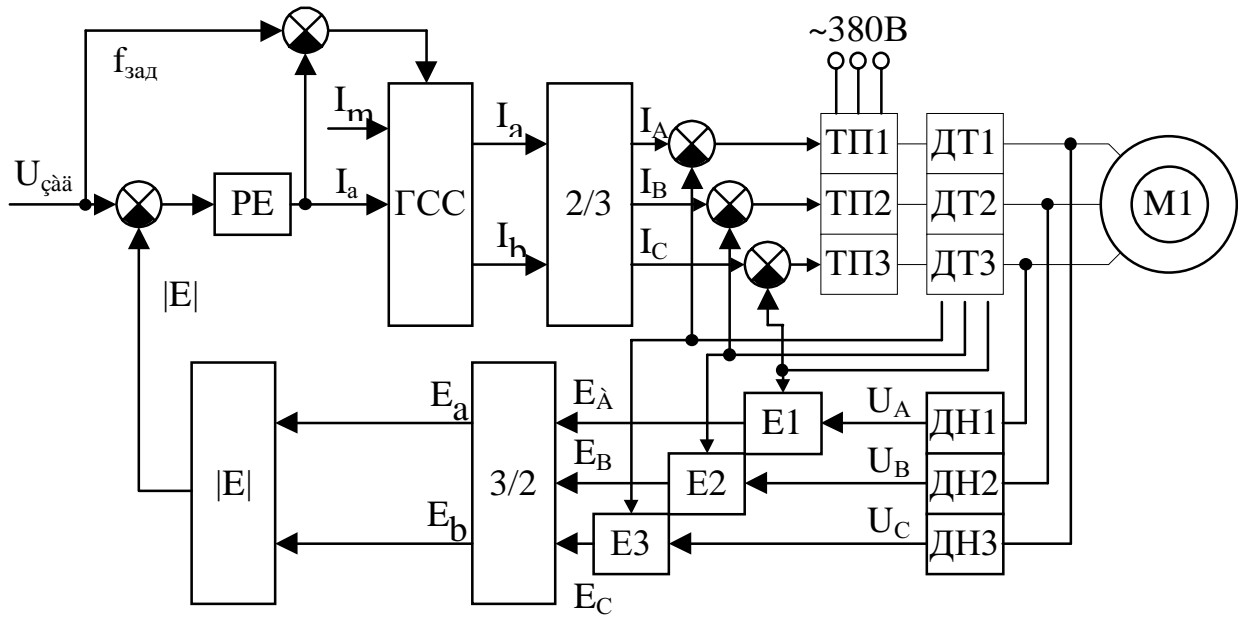


Рисунок 5. Структурная схема системы НПЧ-АД с управлением по ЭДС двигателя.

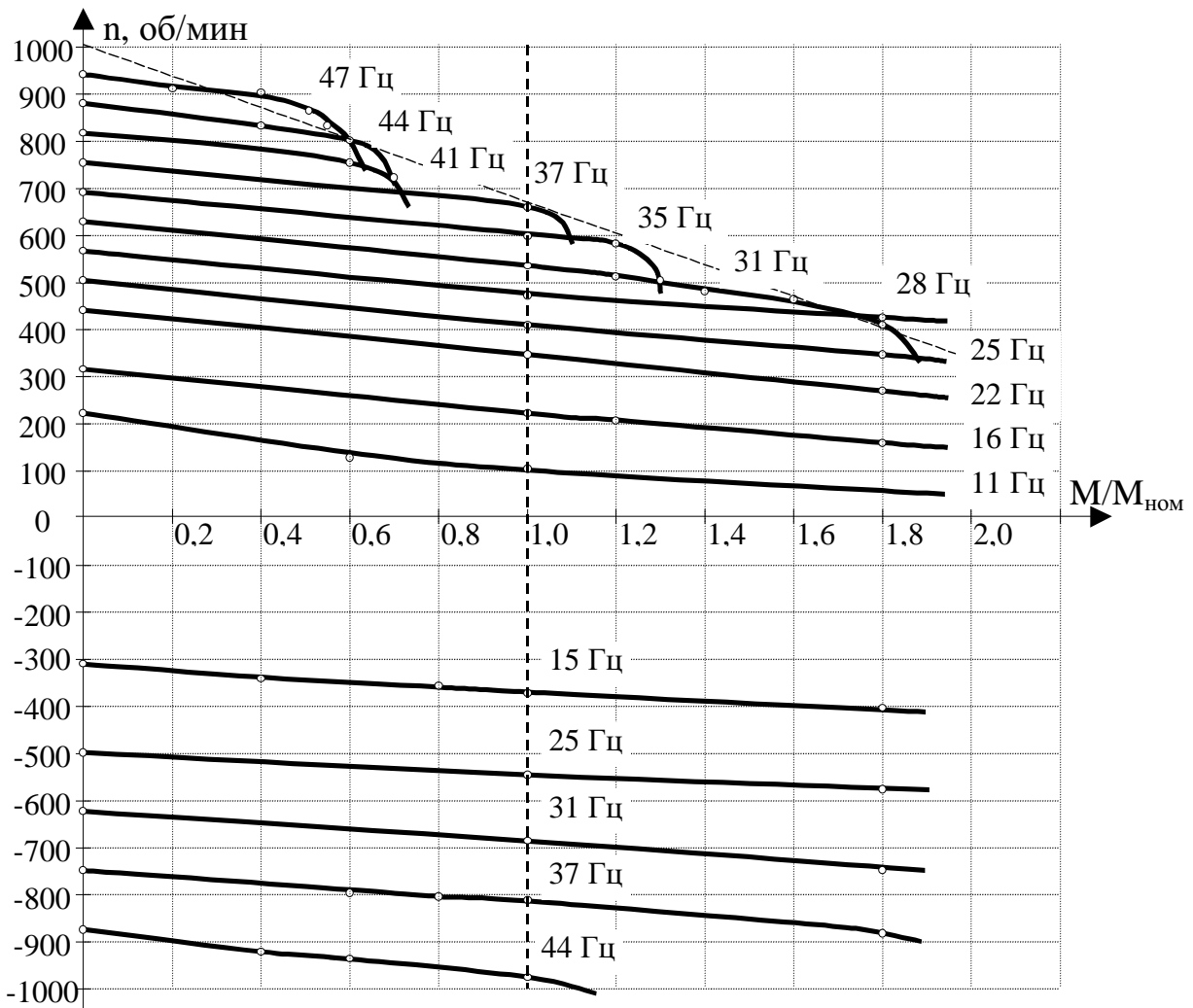


Рисунок 6. Механические характеристики НПЧ-АД при обратной связи по модулю ЭДС двигателя ($w_1 = w_{зад} - Dw$).

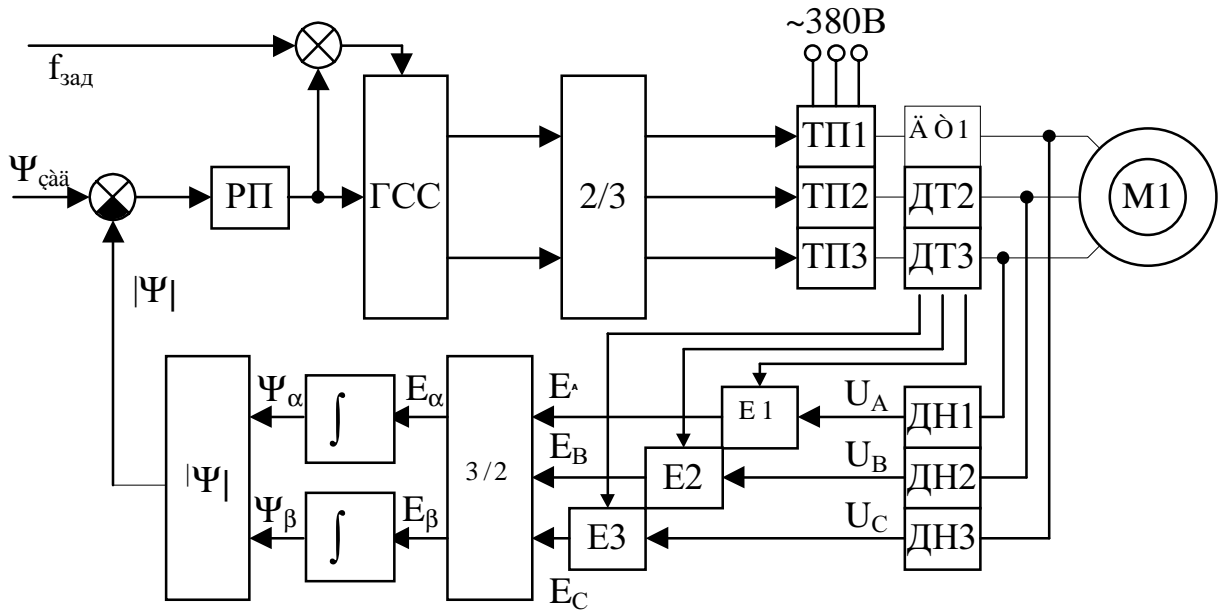


Рисунок 7. Структурная схема системы НПЧ-АД с управлением по потоку.

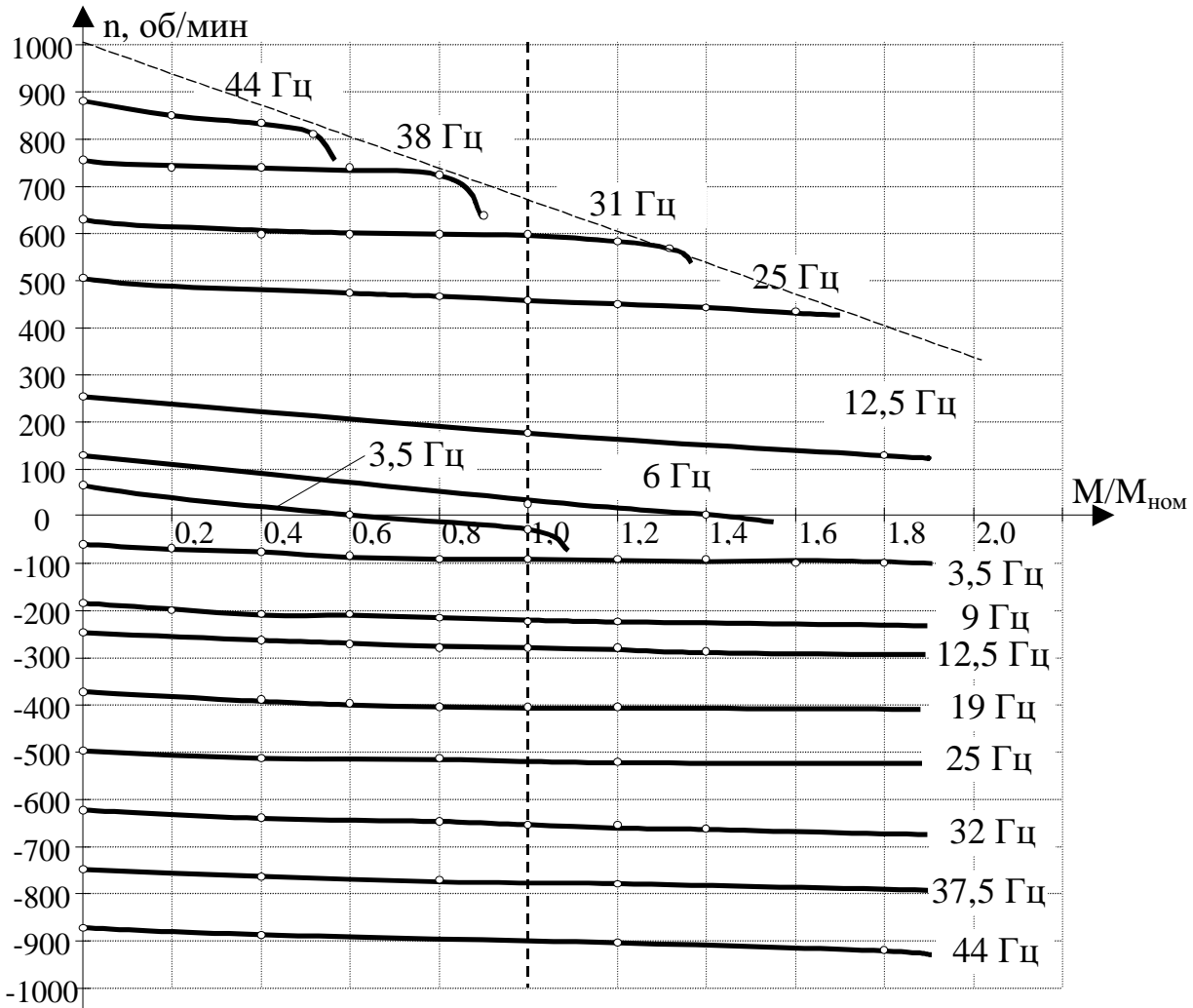


Рисунок 8. Механические характеристики НПЧ-АД при обратной связи по потоку ($w_1 = w_{зад} + Dw$).

Для уменьшения влияния субгармоник непосредственно около 50 Гц такое управление может потребовать организации искусственной коммутации (ИК) между группами преобразователя. Это позволило бы расширить диапазон регулирования НПЧ даже выше 50 Гц. Однако платой за это будет введение специальных мер по защите преобразователя и двигателя от перенапряжений, усложнение конструкции и управления.

Возможен иной подход – использование в этой зоне синхронной машины с датчиком положения, то есть системы вентильного двигателя. Известно,

что эта машина при достаточной частоте вращения способна создавать условия для опережающей коммутации без использования специальных узлов ИК. В пользу такой машины говорит ее склонность к колебаниям, а также ЛАЧХ динамической жесткости ее механической характеристики (1), которая в точности повторяет соответствующую характеристику ПИ-регулятора (смотрите рисунок 2) и, следовательно, при соответствующих настройках и использовании компенсации по частоте вращения, или э.д.с., структурно сможет обеспечить подавление субгармоник без специального регулятора.

Список использованной литературы:

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2 изд. перераб. – М: Энергоатомиздат, 1998.
2. Фираго Б.И. Непосредственные преобразователи частоты в электроприводе. – Мн: Университетское, 1990.