

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОБКАТОЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

**М.А. Прищепов,**

*проректор по научной работе – директор НИИМЭСХ БГАТУ, докт. техн. наук, доцент*

**Д.М. Иванов,**

*аспирант, каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ*

**В.В. Смоленчук,**

*инженер отдела по энергосбережению ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»*

*В статье сформулированы требования, предъявляемые к электроприводу стенов обкатки и испытания механических передач. Проведен анализ существующих и обоснованы наиболее перспективные системы электропривода, отвечающие указанным требованиям и являющиеся наиболее эффективными, как с энергетической, так и технологической точек зрения.*

*Ключевые слова: Стенды обкатки передач, электропривод стенов, требования к электроприводу, энергетическая и технологическая эффективность, системы электроприводов.*

*The article defines the requirements to the drive stands running in and testing of mechanical gear. The analysis of the existing electric drive systems has been carried out and the most promising electric drive systems that meet the above requirements both from the energy and technological points of view have been justified.*

*Keywords: the running gear stands, electric stands, the requirements to the drive, energy and technological efficiency, electric system.*

### Введение

В настоящее время в практической деятельности машиностроительных и ремонтных предприятий существует многообразие различных вариантов стенов для обкатки и испытания механических передач, которые в определенной мере могут обеспечивать технологический процесс обкатки и испытания передач. Для выявления наиболее эффективного варианта стенов из известных стенов, необходимо провести всесторонний анализ существующих и обоснование наиболее перспективных систем электропривода.

### Основная часть

Анализ существующих и обоснование наиболее перспективных систем электропривода будем производить исходя из основных технических требований, касающихся электропривода стенов, сформулированных на основании анализа стандартов к методам испытаний и оборудованию стенов, литературных источников, опыта работы ремонтных и машиностроительных предприятий. Стенды должны обеспечивать [1]:

- бесступенчатое регулирование скорости входного вала от нуля до номинальной и нагружение передачи путем изменения нагрузки на выходном валу;
- нагрузочное устройство должно обеспечивать регулирование величины тормозного момента от холостого хода до номинального момента без останова приводного двигателя в широком диапазоне изменения угловой скорости выходного вала испытываемой передачи;

- отсоединение и присоединение входного вала передачи к приводному двигателю во время его вращения;

- измерение угловых скоростей и крутящих моментов (мощностей) на входном и выходном валу механической передачи с погрешностью не более 2 %;

- возможность автоматизации обкатки и испытаний передач;

- режимы обкатки и испытания механических передач, как на холостом ходу, так и под нагрузкой, имитирующие движение транспортного средства с уклона, или его торможение двигателем внутреннего сгорания.

Стенды также должны быть надежными, экономичными и обеспечивать длительный режим работы, иметь допустимый уровень шума (не более 85 Дб).

Операцию обкатки механических передач, передающих крутящий момент, проводят без нагружения крутящим моментом и под нагрузкой, плавно или ступенчато приближаясь к номинальной. Важное значение имеет обкатка и испытание агрегатов под продолжительно действующей нагрузкой, позволяющая обеспечивать приработку сопряженных деталей, контролировать уровень шума и температуру агрегата. При этом требуются значительные затраты энергии на процесс обкатки. В этой связи актуальным является вопрос выбора принципиальной схемы стенов и его устройств, позволяющих обеспечивать снятие необходимых характеристик испытываемых передач и минимальные энергозатраты в процессе обкатки. Классификация возможных вариантов стенов для

обкатки и испытания механических передач по основным признакам представлена на рисунке 1 [1, 2].

Анализ известных конструкций стендов в соответствии с приведенными в классификации признаками показывает, что наиболее энергоэффективными являются стенды с замкнутым контуром нагружения, причем, предпочтение при этом необходимо отдать электрическому замкнутому контуру нагружения, так как при использовании в стенде электрического привода и тормозного устройства можно обеспечить полную рекуперацию энергии торможения по внутреннему или внешнему контуру от тормозного

устройства к электроприводу стенда. При этом электрические устройства легче поддаются автоматизации, что очень важно на современном этапе. Что же касается стендов с механическим замкнутым контуром нагружения, то их невозможно использовать для обкатки и испытания гидромеханических передач, кроме того, они требуют, вместе с дополнительными передачами, наличия четного количества передач, как правило, 2 или 4, для создания механического контура нагружения. Это значительно усложняет стенд и требует одновременного изменения передаточного отношения испытуемой и дополнительных передач.

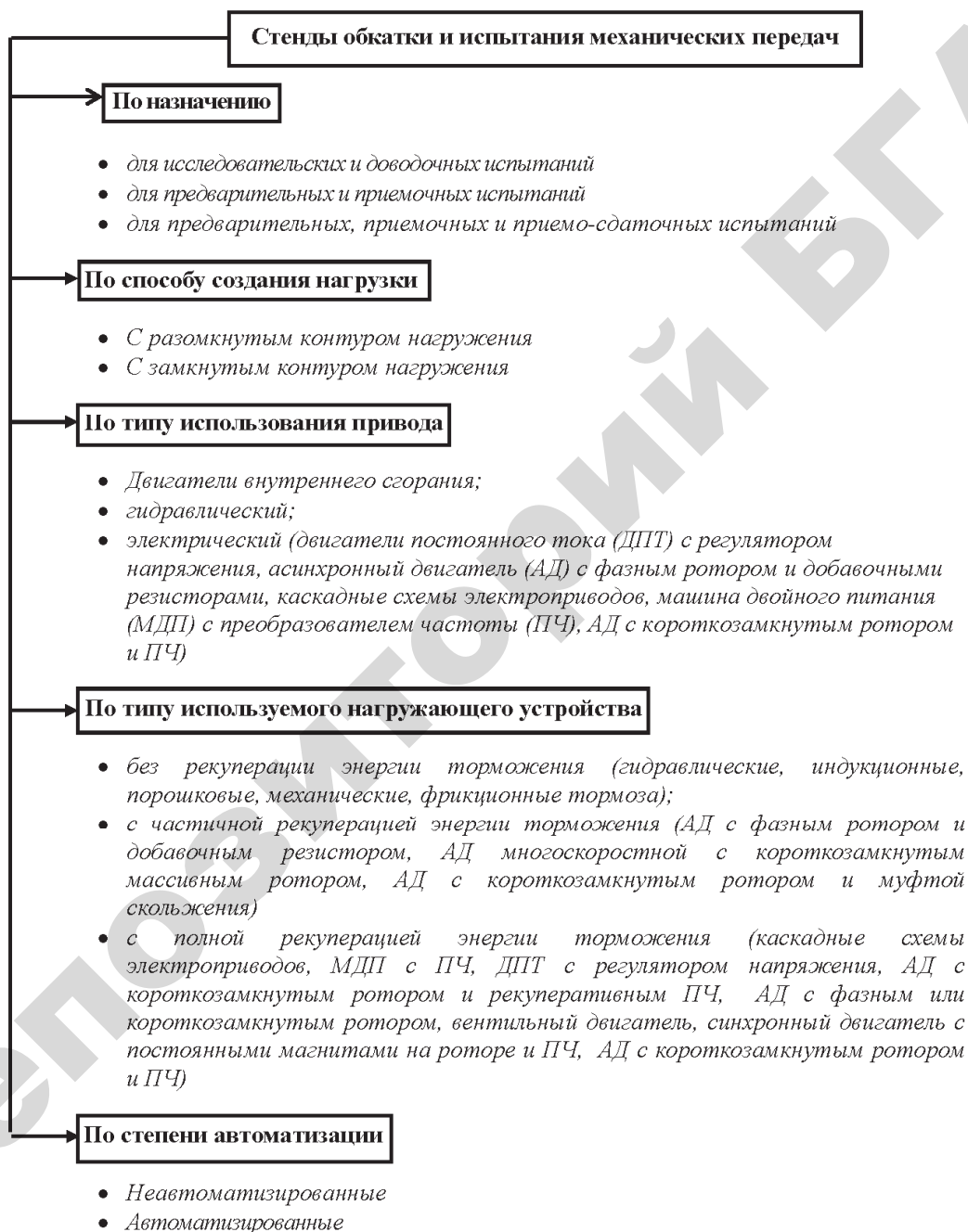


Рисунок 1. Классификация стендов для обкатки и испытания механических передач

Кроме этого, после каждого переключения передачи необходимо проводить процесс ее нагружения крутящим моментом, требующий дополнительных затрат времени и плохо поддающийся автоматизации.

Таким образом, в качестве привода и нагружающего устройства, с точки зрения энергоэффективности и возможности автоматизации технологического процесса обкатки передач, наиболее целесообразно использование электрического привода и электрического нагружающего устройства с полной рекуперацией энергии торможения и желателен по внутреннему контуру, так как в этом случае питающая сеть и преобразующая аппаратура имеют меньшую мощность, а, соответственно, и меньшие потери, чем при рекуперации по внешнему контуру. Следовательно, при дальнейшем анализе систем электропривода обкаточно-испытательных стендов механических передач по технологической эффективности, необходимо рассматривать системы, где в качестве электропривода могут использоваться ДПТ с регулятором напряжения, АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ, каскадные схемы электропривода, МДП с ПЧ, а в качестве нагружающего устройства: ДПТ с регулятором напряжения, АД с короткозамкнутым ротором и рекуперативным ПЧ, каскадные схемы электроприводов, МДП с ПЧ, АД с фазным или короткозамкнутым ротором, вентильный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе и ПЧ, АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ.

Из литературных источников известно значительное количество стендов, например [3...9], где в качестве электроприводных двигателей используются двигатели постоянного тока и, как правило, независимого возбуждения.

Указанные двигатели обеспечивают при относительно высоких энергетических характеристиках плавное бесступенчатое регулирование скорости входного вала передачи от нуля до заданной при постоянстве приводного момента в зоне регулирования напряжения на якоре и постоянстве мощности привода в зоне регулирования потока возбуждения. Недостаток указанного привода заключается в использовании дорогого и ненадежного ДПТ, а также нестандартных блоков согласования и регулирования напряжения, на которых существуют значительные потери энергии при работе стенда в нагрузочном режиме.

Известны также каскадные схемы электроприводов АД с фазным ротором [10]. Несмотря на то, что они позволяют полезно электрически или электромеханически использовать энергию скольжения, повышая при этом эффективность электропривода, их целесообразно применять при относительно небольших диапазонах регулирования скорости: 0,9...0,5 синхронной скорости магнитного поля статора двигателя. Кроме того, каскадные электроприводы требуют использования более дорогого и менее надежного АД с фазным ротором и независимо от того, как в них реализуется энергия скольжения, электрически или электромеханически, дополнительного использования электромашинных, вентильно-машинных и вентильных преобразователей, что значительно усложняет его устройство и управление. Указан-

ный недостаток относительно небольшого диапазона регулирования скорости в определенной степени может быть устранен в машине двойного питания (МДП). Подсоединяя статор асинхронного двигателя с фазным ротором к питающей сети переменного тока с неизменным напряжением и частотой, а в его ротор, подавая напряжение с изменяемой частотой и амплитудой, можно плавно регулировать угловую скорость двигателя. При изменении чередования фаз напряжения, вводимого в цепь ротора и использовании в цепи ротора преобразователя частоты с непосредственной связью и естественной коммутацией вентилей, у которых наибольшее значение частоты на его выходе не превышает половины частоты питающего напряжения, минимальная угловая скорость при регулировании МДП вниз от синхронной составит 0,5 синхронной, а максимальная при регулировании МДП вверх – 1,5 синхронной.

В течение двух последних десятилетий в обкаточно-испытательных стендах механических передач в качестве их электропривода все чаще начинают использоваться АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ питающего напряжения [11...16]. Это обусловлено многократным снижением за этот период стоимости ПЧ в связи с появлением новой элементной базы – современных силовых транзисторов, позволивших также упростить их устройство и улучшить удельные массогабаритные показатели. При этом указанный привод, как и привод с ДПТ, обеспечивает высокие энергетические характеристики, плавное бесступенчатое регулирование в широком диапазоне скорости при двухзонном регулировании ( $M=\text{const}$  и  $P=\text{const}$ ), имеет более простой, дешевый и надежный АД с короткозамкнутым ротором и не требует использования нестандартного оборудования. Что касается использования в качестве электропривода стендов АД с фазным ротором и добавочными резисторами, то необходимо отметить, что такой привод обеспечивает невысокие энергетические показатели на искусственных характеристиках за счет потерь в резисторах и относительно небольшой диапазон регулирования скорости. Таким образом, высокими энергетическими показателями и широким диапазоном регулирования скорости, удовлетворяющим технологическим требованиям обкатки и испытания передач, обладают электроприводы ДПТ с регулятором напряжения [3...9] и АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ [11...16].

При анализе возможных вариантов нагружающих электромеханических устройств будем исходить вначале из их возможности нагружения передачи, то есть возможности устройства создавать нагрузку на выходном валу передачи в широких диапазонах скоростей и моментов, а затем оценивать их энергетическую эффективность с учетом возможности создания внутреннего контура рекуперации энергии торможения от тормозного устройства к электроприводу стенда, что, как указывалось выше, является наиболее предпочтительным.

Если говорить о каскадных схемах нагружающих электромеханических устройств, то есть схемах вентильно-машинного электрического каскада с промежуточным звеном постоянного тока, вентильно-машинного электромеханического каскада, асин-

хронно-вентильного каскада [10, 17], то необходимо отметить, что в этих схемах двигатель может работать в двигательном режиме при скорости, ниже синхронной, в режиме генераторного торможения, параллельно с сетью при скорости только выше синхронной. При этом энергия скольжения рекуперирована в сеть. Двигатель не может работать в генераторном режиме при скорости ниже синхронной и двигательном режиме при сверхсинхронной скорости, когда энергия должна поступать из сети в ротор [10]. Следовательно, в таком нагружающем устройстве скоростной диапазон, где возможно создание регулируемой нагрузки, весьма невелик.

Генераторный режим рекуперативного торможения при скорости, ниже и выше синхронной, может быть реализован в МДП [10, 11]. Подсоединяя статор АД с фазным ротором к питающей сети переменного тока с неизменным напряжением и частотой, а в ротор его, подавая напряжение с изменяемой частотой и амплитудой, а также изменяя чередование фаз, можно плавно регулировать угловую скорость двигателя в диапазоне от 0,5 до 1,5 синхронной скорости магнитного поля статора, и при этом обеспечивать генераторный режим при подсинхронной и сверхсинхронной угловой скорости [10]. Несмотря на то, что регулирование во всем диапазоне плавное экономичное, поскольку энергия скольжения за вычетом потерь в цепи ротора и в преобразователе возвращается в сеть, МДП не обеспечивает полностью необходимых технологических режимов обкатки и испытания передач.

Известно использование в качестве нагружающего устройства ДПТ с регулятором напряжения [7...9, 18]. При этом возможны варианты стенда с рекуперацией энергии торможения по внутреннему контуру, то есть, когда возврат энергии осуществляется в привод – такой же ДПТ. В данном варианте две машины постоянного тока включены по схеме взаимной нагрузки и подключены к одному тиристорному преобразователю напряжения. Управление моментом осуществляется за счет изменения потока возбуждения нагрузочной машины [7, 8]. Поток возбуждения двигателя при этом постоянен и ниже номинального. Возможен также вариант, когда энергия торможения рекуперирована в сеть через тиристорный преобразователь – инвертер [9, 18]. Управление моментом нагружения может осуществляться либо изменением напряжения якоря нагрузочной машины, когда оба ДПТ работают при постоянном номинальном значении потока возбуждения, либо изменением потока возбуждения генератора (нагружающего устройства), когда двигатель работает при постоянном номинальном значении потока возбуждения, а генератор – при постоянном, ниже номинального, напряжении на якоре. Оба варианта систем электропривода имеют высокую энергетическую и технологическую эффективность, но предпочтение необходимо отдать схеме взаимной нагрузки при подключении обоих ДПТ к одному регулятору напряжения. Данная схема проще, не требует наличия инвертора, мощного регулятора напряжения и обладает минимальными потерями в преобразующих

устройствах, однако требует двух дорогостоящих и ненадежных машин постоянного тока.

В качестве нагружающего устройства возможно использование АД, как с фазным [5], так и короткозамкнутым ротором [3, 4, 6], работающим в генераторном режиме. При этом АД с короткозамкнутым ротором работает в генераторном режиме торможения, при скорости, выше синхронной в узком диапазоне скоростей, а АД с фазным ротором, работая в режиме синхронного генератора, обеспечивает торможение, хоть и в более широком диапазоне скоростей, но с различной эффективностью торможения.

Применение в качестве нагружающего устройства все больше появляющихся на современном рынке электроприводов вентильных двигателей или синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе и ПЧ [15] обусловлено целым рядом их достоинств, таких, как высокие энергетические показатели (КПД выше 90%), широкий диапазон изменения частоты вращения и нагрузочной способности по моменту, отсутствие скользящих электрических контактов, возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде. Однако несмотря на то, что эти двигатели объединяют в себе лучшие качества двигателей переменного и постоянного тока, они обладают высокой стоимостью ввиду использования дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора, сложной структурой и управлением. Поэтому в настоящий период времени эти обстоятельства сдерживают их широкое применение в стендах обкатки и испытания передач, пока эти двигатели используются только в дорогостоящих системах с повышенными требованиями по точности и надежности.

Наиболее надежными, приемлемыми по стоимости и обладающими высокими энергетическими и технологическими характеристиками являются стенды обкатки и испытания передач, в которых в качестве нагружающего устройства используются АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ [12, 13, 16, 19] при этом ПЧ с автономным инвертором рекуперации может обеспечивать рекуперацию электрической энергии торможения непосредственно в сеть. В таких системах электропривода рекуперация электрической энергии от тормозной машины к приводной осуществляется по внешнему контуру. При этом в качестве электропривода в стенде может равнозначно использоваться как ДПТ с регулятором напряжения, так и АД с короткозамкнутым ротором и ПЧ. Наиболее энергоэффективными системами электроприводов стендов являются стенды, в которых в качестве приводного и тормозного двигателей используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, статорные обмотки которых питаются от одного [12, 13, 16] или отдельных [19] преобразователей частоты. Определенный интерес представляет система электропривода стенда, где в качестве нагружающего устройства используется АД с короткозамкнутым ротором и вращающимся вокруг него статором, описанная в источниках [12, 13] и приведенная на рисунках 2 и 3.

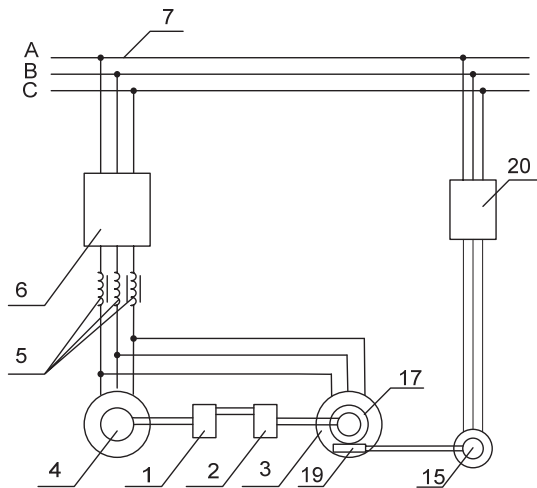


Рисунок 2. Схема стенда для испытания и обкатки передач, в котором в качестве приводного и тормозного двигателя используются АД с короткозамкнутым ротором, а статорные обмотки питаются от одного ПЧ [12, 13]

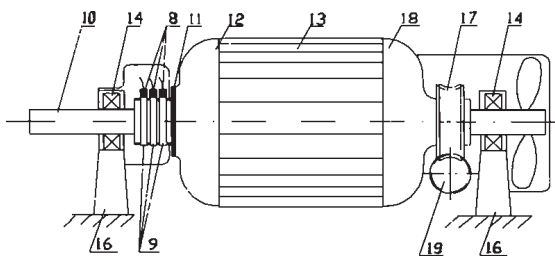


Рисунок 3. Конструкция тормозного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и вращающимся вокруг него статором [12, 13]

Стенд содержит станину (на рисунках не показана) с установленной на ней испытываемой передачей 1, кинематически соединенной ведомым валом передачи через последовательно соединенную дополнительную 2 аналогичную передачу, при этом выходные валы испытываемой 1 и дополнительной 2 передач соединены вместе с тормозным асинхронным двигателем 3 и ведущим валом с приводным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором 4, статорная обмотка которого через дроссель 5 и преобразователь частоты 6 подключена к питающей сети 7, при этом тормозной асинхронный двигатель 3 выполнен с короткозамкнутым ротором, а статорная обмотка через токоподводящие щетки 8 и контактные кольца 9, закрепленные соосно валу 10 двигателя 3 на изоляционной втулке 11 одного из подшипниковых щитов 12 статора, подключена к выходу преобразователя частоты 6 приводного двигателя 4 после дросселя 5 согласно в направлении его вращения, при этом корпус статора 13 тормозного двигателя 3 выполнен вращающимся на подшипниках 14 в направлении, противоположном вращению ротора, дополнительным электродвигателем 15 через самотормозящую механическую передачу на собственном валу 10, в свою очередь установленном в подшипниковых опорах 16,

жестко закрепленных на станине стенда, причем самотормозящая механическая передача выполнена червячной, при этом червячное колесо 17 закреплено соосно валу 10 тормозного двигателя 3 на другом из его подшипниковых щитов 18, а червяк 19 кинематически соединен с валом дополнительного электродвигателя 15, жестко закрепленного на станине стенда и подключенного к сети 7 через регулятор частоты вращения 20. В качестве дополнительного электродвигателя 15 может использоваться двигатель, как постоянного, так и переменного тока с соответствующим регулятором частоты вращения. В качестве приводного 4 и тормозного 3 асинхронных двигателей используют двигатели с одинаковой номинальной частотой вращения, так как при результирующем передаточном отношении встречно-последовательно соединенных обкатываемой передачи 1 с аналогичной дополнительной 2, равно единице, требуется минимальная частота вращения статора 13 тормозного асинхронного двигателя 3 и затрачивается минимальная мощность на его вращение.

Работает стенд следующим образом. Вначале напряжение от трехфазной сети 7 переменного тока через преобразователь частоты 6 и дроссель 5 подается на статорные обмотки, как приводного 4, так и тормозного 3 асинхронных двигателей, которые кинематически соединены с ведущими валами соответственно испытываемой передачи 1 и дополнительной передачи 2. Так как суммарное передаточное отношение встречно-последовательно соединенных обкатываемой 1 и дополнительной 2 передач равно единице, а частота вращения приводного 4 и тормозного 3 двигателей одинакова, согласно по направлению вращения и определяется частотой питающего напряжения на выходе частотного преобразователя 6, то испытываемая передача 1 работает на холостом ходу. Для испытания передачи 1 под нагрузкой через регулятор частоты вращения 20 подключается к трехфазной сети 7 дополнительный двигатель 15, вал которого кинематически соединен с червяком 19 и червячным колесом 17, приводя во вращение статор 13 тормозного двигателя 3 в направлении, противоположном направлению вращения его ротора, тем самым уменьшая синхронную частоту вращения магнитного поля статора 13 тормозного двигателя 3. Таким образом, при изменении частоты вращения статора 13 от нуля в сторону увеличения асинхронный тормозной двигатель 3 от двигательного режима переходит к идеальному холостому, а затем к генераторному режиму с рекуперацией электрической энергии торможения от асинхронного тормозного двигателя 3 к приводному двигателю 4, тем самым изменяя тормозной момент на валу передачи 1.

Изменение режимов нагружения передачи 1, т.е. частоты вращения и тормозного момента, осуществляют, соответственно, преобразователем частоты 6 и регулятором частоты вращения 20 дополнительного двигателя 15. При этом частота вращения статора 13 тормозного двигателя 3 с некоторым допущением будет изменяться от нуля до произведения синхронной частоты вращения магнитного поля статора 13

тормозного двигателя 3 на сумму его скольжений, критического и номинального, а максимальная мощность, затрачиваемая дополнительным двигателем 15 на вращение статора 13 тормозного двигателя 3, будет равна произведению момента критического тормозного двигателя 3 на полученную скорость. При аналогичном вращении статора 13 тормозного двигателя 3 в направлении вращения его ротора процесс нагружения передачи 1 изменится на обратный, приводным станет двигатель 3, а тормозным – двигатель 4, и соответственно изменится направление рекуперации электрической энергии.

Предлагаемая схема стенда позволяет осуществлять нагружение передачи в широком диапазоне момента нагрузки и частот вращения, использовать тормозной двигатель в качестве приводного и наоборот, обеспечивать рекуперацию электрической энергии непосредственно от тормозного двигателя к приводному, что, в свою очередь, обеспечивает возможность использования маломощного преобразователя частоты 6 и минимальные потери энергии при обкатке передачи 1 под нагрузкой.

Однако практическая реализация такого стенда весьма затруднительна в связи с тем, что в нем используется специальный, серийно не выпускаемый асинхронный двигатель, с короткозамкнутым ротором и вращающимся статором, со скользящими электрическими контактами, представленный на рисунке 3, а также хоть и маломощный, дополнительный асинхронный частотно-регулируемый электропривод, обеспечивающий вращение статора нагружающей машины.

На практике наиболее проста реализация равнозначного по энергетическим и технологическим характеристикам стенда обкатки передач, описанного в источнике [19]. Схема такого стенда представлена на рисунке 4.

Аналогично, как и в предыдущем стенде, имеется станина (на рисунке не показана) с установленной на ней испытуемой передачей 1, кинематически соединенной ведомым валом через последовательно соединенную дополнительную 2 аналогичную передачу, при этом выходные валы испытуемой 1 и дополнительной 2 передачи соединены вместе с тормозным асинхронным двигателем 3 и ведущим валом с приводным асинхронным двигателем также с короткозамкнутым ротором 4, статорная обмотка которого через дроссель 5 и преобразователь частоты 6, состоящий из инвертора 7, неуправляемого выпрямителя 8 и сглаживающего конденсатора 9, подключена к питающей сети 10. Аналогично статорная обмотка тормозного двигателя 3 через дроссель 11 и преобразователь частоты 12, состоящий из инвертора 13, неуправляемого выпрямителя 14 и сглаживающего конденсатора 15, подключена к питающей сети 10. При этом между выходами выпрямителей 8 и 14 образованы общие шины постоянного напряжения, в разрыв одной из которых установлен амперметр 16, обеспечивающие рекуперацию электрической энергии от тормозной машины к приводной.

Работает стенд следующим образом. Перед включением приводного 4 и тормозного 5 двигателей

на пультах управления ПЧ 6, 12 задают минимальную угловую скорость. Затем подают питание на статоры двигателей 3 и 4 от сети 10 через ПЧ 6 и 12. При этом оба двигателя вращаются с одной скоростью. Так как суммарное передаточное отношение встречно-последовательно соединенных обкатываемой 1 и дополнительной 2 передач равно единице, а частота вращения приводного и тормозного двигателей одинакова по величине и направлению, то испытываемая передача 1 работает на холостом ходу. Для испытания передачи 1 под нагрузкой при устанавливаемой скорости необходимо уменьшить частоту напряжения питания на выходе ПЧ 12 или увеличить на выходе ПЧ 6. При этом тормозной двигатель 3 войдет в генераторный режим и по шинам постоянного тока будет рекуперировать электрическую энергию к приводному 4. Таким образом, генераторное торможение с рекуперацией энергии можно осуществлять и на другой скорости в широком диапазоне скоростей и моментов, при этом функции тормозного двигателя можно передавать приводному двигателю. Данная система электропривода имеет хорошие энергетические и технологические характеристики и не требует специального серийно не выпускаемого оборудования. В электроприводе используются широко распространенные и надежные АД с короткозамкнутым ротором, серийно выпускаемые ПЧ, обеспечивающие высокую степень защиты оборудования от аварийных режимов работы.

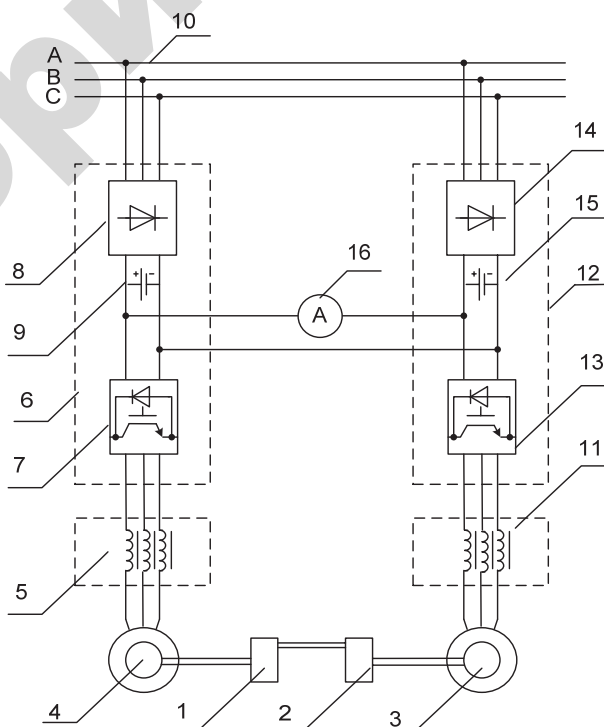


Рисунок 4. Схема стенда для испытания и обкатки передач, в котором в качестве приводного и тормозного двигателя используются АД с короткозамкнутым ротором, а статорные обмотки питаются от отдельных ПЧ

**Заключение**

1. Анализ известных конструкций стенов обкатки и испытания механических передач показывает, что наиболее энергоэффективными являются стенды с замкнутым контуром нагружения, причем предпочтение при этом необходимо отдать стендам с электрическим замкнутым контуром нагружения, так как при использовании в стенде электрического привода и тормозного устройства можно обеспечить полную рекуперацию энергии торможения по внутреннему или внешнему контуру от тормозного устройства к электроприводу стенда. При этом электрические устройства легче поддаются автоматизации, что очень важно на современном этапе развития производства.

2. В связи с появлением новой элементной базы современных силовых транзисторов, в настоящий период значительно снизилась стоимость преобразователей частоты, что повлекло за собой широкое использование частотно-регулируемого асинхронного электропривода, вытесняя при этом менее эффективный и надежный привод постоянного тока.

3. Система связанного двухдвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с рекуперацией электрической энергии по шинам постоянного от тормозной машины к приводной в настоящие время является наиболее эффективной в стендах обкатки и испытания механических передач, как с энергетической, так и технологической точек зрения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Прищепов, М.А. Обоснование применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода для стенов обкатки и испытания механических передач / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: матер. Междунар. науч.-практич. конф., г. Минск, 23-24 октября 2014 г.; в 2 ч. – Ч. 2 / под ред. И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2014. – С. 159-162.

2. Хватов, С.В. Принципы построения электрических нагружающих устройств / С.В. Хватов, В.Г. Титов // Автоматизированный электропривод; под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 338-341.

3. Стенд для испытания передач: а.с. 624132 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> G 01M 13/02 / Л.А. Калинин, П.Т. Шипуль. – № 2459715/25-28; заявл. 09.03.77; опубл. 15.09.78 // Бюл. №34. – 3 с. : ил.

4. Стенд для испытания передач: а.с. 922568 СССР, М.Кл.<sup>3</sup> G 01M13/02/ Л.А. Калинин, П.Т. Шипуль, М.А. Прищепов. – № 2891128/25-28; заявл. 07.03.80; опубл. 23.04.82 // Бюл. № 15. – 3 с. : ил.

5. Стенд для испытания передач: а.с. 947677 СССР, М.Кл.<sup>3</sup> G 01M13/02/ Л.А. Калинин, П.Т. Шипуль, М.А. Прищепов, В.А. Чуркин. – № 3215062/25-28; заявл. 12.12.80; опубл. 30.07.82 // Бюл. № 28. – 4 с.: ил.

6. Стенд для обкатки и испытания передач: а.с. 1330489 СССР, М.Кл.<sup>4</sup> G 01M13/02 / Л.А. Калинин,

Г.И. Янукович, П.Т. Шипуль, А.П. Сердешнов, В.П. Счастный, В.В. Гурин. – № 3994621/25-28; заявл. 20.12.85; опубл. 15.08.87 // Бюл. № 30. – 3 с.: ил.

7. Стенд для испытания передач: а.с 1177710 СССР, М.Кл.<sup>4</sup> G 01M13/02 / М.З. Варшавский. – № 3707461/25-28; заявл. 07.03.84; опубл. 07.09.85 // Бюл. № 33. – 2 с. : ил.

8. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда: пат. 5370 Респ. Беларусь, М.Кл.<sup>7</sup> H 02P 5/00 / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев; № а 19990246; заявл. 17.03.1999; опубл. 30.09.03. – 4 с.: ил.

9. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда: пат. 5694 Респ. Беларусь, М.Кл.<sup>7</sup> H 02P 5/00 / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев; № а 19990325; заявл. 04.06.99; опубл. 30.12.03. – 4 с.: ил.

10. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. – 6-изд. пер. и доп. / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

11. Способ испытания механических передач в электрическом стенде: а.с 1295255 СССР, М.Кл.<sup>4</sup> G 01M13/02/ А.И. Школьников, В.П. Кормухов. – № 4277066/25-28; заявл. 06.07.87; опубл. 30.11.89 // Бюл. № 44. – 4 с. : ил.

12. Способ испытания и обкатки механических передач трансмиссии транспортного средства при нагружении с рекуперацией энергии торможения на электрическом стенде: пат. 17066 Респ. Беларусь / М.А. Прищепов, В.В. Гурин, В.В. Смоленчук, Е.М. Прищепова. – № а 20101670; заявл. 23.11.10; опубл. 30.04.2013. – 5 с.: ил.

13. Стенд для испытания механических передач путем электрического нагружения с рекуперацией электрической энергии торможения: пат. 17466 Респ. Беларусь, МПК G01M 13/02 / М.А. Прищепов, В.В. Гурин, В.В. Смоленчук, Е.М. Прищепова. – № а 20110422; заявл. 2011.04.06; опубл. 30.08.2013. – 4 с.: ил.

14. Резонансный стенд для исследования валов на кручении: пат. 2247348 РФ, МПК G01M 13/02 / В.И. Лемешко, Г.В. Багров, А.И. Ивахин, Д.А. Хохлов, Ю.И. Фокин, В.И. Травиничев. – № 2003119893/28; заявл. 30.06.2003; опубл. 27.02.2005.

15. Электромеханический стенд для испытания силовых передач: заявка РФ № 2013140650, МПК G01M 13/02 / Г.М. Иванов, О.И. Осипов, А.Е. Наживин, В.И. Новиков. – № 2013140650/28; заявл. 04.09.13, опубл. 20.04.15 // Бюл. № 11.

16. Стенд для испытания механической передачи путем электрического нагружения с рекуперацией электрической энергии торможения от тормозной машины к приводной (варианты): пат. 19758 Респ. Беларусь, МПК G01M 13/02 / М.А. Прищепов, В.В. Гурин, В.В. Смоленчук, Е.М. Прищепова, Т.Г. Базулина. – № а 20130167; заявл. 11.02.2013; опубл. 30.12.2015. – 6 с.: ил.

17. Нагрузочное устройство: пат. 16927 Респ. Беларусь, МПК G01M15/00 / В.С. Захаренко, И.В. Дорошенко, В.А. Савельев. – № а 201101749; заявл. 12.03. 10; опубл. 30.08.12. – 5 с. : ил.

18. Захаренко, В.С. Инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий: автореф... дис. канд. техн. наук / В.С. Захаренко; Гомельский гос. технич. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2000. – 21 с.

19. Способ управления взаимосвязанными электроприводами с рекуперацией электрической энер-

гии: пат. 19919 Респ. Беларусь, заявка № а 20131163, МПК Н 02Р 5/74 / М.А. Прищепов, В.В. Гурин, Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов. – № а 20131163; заявл.08.10.2013; опубл. 28.02.2016 – 4 с. с ил.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.02.2016

УДК 621.35

## УДАЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ГИДРОЦИКЛОНЕ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

**А.В. Крутов,**

*доцент каф. электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**М.А. Бойко,**

*ст. преподаватель каф. электротехники БГАТУ*

*В работе рассматривается пример аналитического описания процесса очистки сточных вод в комбинированных силовых полях.*

*Ключевые слова: стоки, гидроциклон, электрическое поле, магнитное поле, комбинация силовых полей, отделение суспензии.*

*In the article an example of analytical description of the wastewater treatment process in combined force field is examined.*

*Keywords: drains, hydrocyclone, the electric field, magnetic field, the combination of force field, department suspension.*

### Введение

В сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь на мойку автотракторной техники и различных сельхозмашин затрачиваются значительные объемы воды. Кроме того, образованные при этом сточные воды содержат, как правило, различные минеральные загрязнения, нефтепродукты, синтетические моющие средства в дозах, превышающих предельно допустимые концентрации.

Очистка нефтесодержащих стоков с применением электрокоагуляции, электрофлотации в электромагнитных гидроциклонах позволяет повысить степень обеззараживания таких стоков и обеспечить замкнутое водоснабжение, рациональное использование водных ресурсов, снижение вредного воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду. Гидроциклоны до сих пор недостаточно полно используются для проведения процессов разделения несмешивающихся жидкостей (эмульсий). Это обусловлено более сложным механизмом процесса сепарации, а также отсутствием достаточно достоверных методов их инженерного расчета. На практике встречается множество эмпирических формул для расчета гидроциклонов, полученных по результатам различных опытов. Эмпирические зависимости получают, как правило, для конкретных конструкций и условий, а это ограничивает их применение в других отличающихся конструкциях и условиях. Подобное касается и расчета магнитной индукции электромагнитного гидроциклона. Для интенсификации и повышения каче-

ства очистки авторами использовано воздействие неоднородных электрических и магнитных полей на поток очищаемой жидкости в низконапорном трехпродуктовом гидроциклоне. Работы по математическому моделированию процесса сепарации в гидроциклонах под воздействием однородного магнитного поля проводились Б.А. Авдеевым, В. М. Разиным и другими [1-3]. Цель данной работы – получить аналитическое описание процесса очистки стоков от суспензии в гидроциклоне с неоднородными электрическими и магнитными полями, вывести формулу определения магнитной индукции для использования при проектировании очистных устройств подобного типа.

### Основная часть

Для отделения частиц нефтепродуктов и других эмульсий и суспензий, содержащихся в сточных водах постов мойки автотракторной техники, в гидроциклонах используется вращение жидкости, возникающее в результате тангенциального входа потока в рабочий объем аппарата. Интенсифицировать этот процесс и повысить степень очистки можно применив воздействие неоднородных электрических и магнитных полей постоянного тока на поток очищаемой воды. Конструкция такого трехпродуктового электромагнитного гидроциклона приведена на рис. 1.

Обрабатываемая сточная вода под давлением поступает через патрубок подачи очищаемой воды 6 с открытым электромагнитным клапаном в камеру электрофлотокоагуляции, которая сверху ограничена