

УДК 621.3

Е. В. Кузнецов, И. Ю. Хадкевич

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МУФТ СВОБОДНОГО ХОДА РЕАКТОРНЫХ КОЛЕС НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

UDC 621.3

E. V. Kuznetsov, I. Y. Khadkevich

INFLUENCE OF THE TECHNICAL CONDITION OF FREEWHEEL CLUTCHES OF REACTOR WHEELS ON CHARACTERISTICS OF THE HYDRODYNAMIC TORQUE CONVERTER

Аннотация

В статье представлена математическая модель гидротрансформатора, описывающая движение потока жидкости в круге циркуляции, позволяющая моделировать неисправности муфт свободного хода, такие как проскальзывание на режиме трансформации момента и заклинивание на режиме гидромуфты, влияющие на характеристики трансформатора.

Ключевые слова:

гидромеханическая трансмиссия, гидромеханическая передача, гидродинамический трансформатор, неисправность гидротрансформатора, муфта свободного хода, коэффициент трансформации, КПД гидротрансформатора, диагностирование, математическая модель.

Abstract

The article presents a mathematical model of the torque converter which describes fluid motion in the flow path and makes it possible to model failures of freewheel clutches, such as the slippage in the torque transformation mode and jamming in the hydraulic coupling which affect the characteristics of the torque converter.

Keywords:

hydromechanical transmission, hydro-shift transmission, hydrodynamic torque converter, torque converter malfunction, freewheel clutch, transformation ratio, torque converter efficiency, diagnosis, mathematical model.

Эффективность работы самоходной машины с гидромеханической трансмиссией (ГМТ) во многом зависит от технического состояния гидродинамического трансформатора (ГДТ). Он обеспечивает хорошие динамические характеристики машины при относительно плавном протекании переходных процессов, что объясняется отсутствием жёсткой кинематической связи ведущих и ведомых элементов ГДТ и значениями коэффициента трансформации $K_{тн} > 1$ в диапазоне передаточных отношений $i_{тн} = 0...0,7$.

Однако КПД гидротрансформатора при $i_{тн} = 0...0,4$ и $i_{тн} = 0,8...1,0$ довольно низкий. Это является значительным недостатком ГМТ при работе машины на установившихся режимах в указанных диапазонах. Экономически целесообразна длительная работа машины с ГМТ при КПД $> 0,75$, т. е. в так называемом эффективном диапазоне передаточных отношений, составляющем примерно $i_{тн}^{эф} = 0,4...0,8$.

Для расширения эффективного диапазона ГМТ применяют комплексный ГДТ. На режиме трансформации



крутящего момента муфта свободного хода (МСХ) фиксирует реакторное колесо ГДТ на трубчатой оси, закреплённой на картере, позволяя лопастной системе изменить направление потока жидкости для минимизации потерь напора на удар при входе в межлопастные каналы насосного колеса. При этом на реакторе ГДТ создаётся реактивный момент M_R , который увеличивает крутящий момент на турбинном валу M_T , а следовательно, и коэффициент трансформации. Наибольшей величины $K_{тн}$ достигает при неподвижной турбине (стоповый режим). По мере разгона турбинного вала скорость потока жидкости в круге циркуляции ГДТ изменяется, уменьшая M_R . Примерно при $i_{тн} > 0,65$ момент на реакторе изменяет своё направление, и коэффициент трансформации становится меньше 1. МСХ перестаёт удерживать реакторное колесо на своей оси, и оно начинает свободно вращаться вместе с переносным потоком жидкости, не изменяя его направления. Гидротрансформатор переходит на режим гидродинамической муфты (ГДМ), которая, как известно, при примерно одинаковых моментах на турбинном и насосном колёсах имеет более высокий КПД (0,97...0,98). Это расширяет эффективный рабочий диапазон комплексного ГДТ по сравнению с некомплексным.

Работа комплексного ГДТ во многом зависит от состояния МСХ. Неисправностями ее могут быть заклинивание (тогда ГДТ не переходит на режим гидромуфты) или отсутствие фиксации реакторного колеса (тогда ГДТ работает только в режиме гидромуфты). В обоих случаях существенно ухудшаются характеристики машины.

В ГДТ применяют два типа МСХ – роликовые и кулачковые. Оба типа имеют свои преимущества и недостатки. Так, в роликовой муфте свободного хода элементами стопорения являются ролики, но при этом одна из обойм (наружная или внутренняя) имеет сложную форму с

клиновыми канавками. В кулачковой муфте обе обоймы простой цилиндрической формы. Элементами стопорения являются кулачки, которые имеют сложную конфигурацию. Наиболее часто в комплексных ГДТ применяют роликовые муфты свободного хода. Например, карьерные самосвалы БелАЗ имеют ГДТ с роликовыми МСХ.

Контактные поверхности МСХ требуют хорошей смазки, что связано с высокими относительными скоростями роликов. Наружная обойма, как правило, вращается, а внутренняя неподвижна. В этом случае центробежная сила, воздействующая на стопорящие элементы, отжимает их от внутренней обоймы, уменьшая трение и износ. Основные элементы МСХ изготавливают из подшипниковых сталей ШХ 15 или ШХ 30 с закалкой до HRC 58...62. Тем не менее, выход их из строя происходит из-за повреждения поверхностей обойм в местах контакта (рис. 1) или роликов (рис. 2). Причина повреждений – выкрошивание (питтинг), бринеллирование. Это вызывает постоянное заклинивание или проскальзывание реактора. Но о техническом состоянии МСХ можно судить только по косвенным признакам, поскольку прямого доступа (без разборки ГДТ) к реакторному колесу и его трубчатой оси нет.

Для того чтобы установить, как указанные неисправности МСХ отразятся на характеристиках ГДТ, а также выбрать наиболее информативные диагностические параметры и синтезировать методику оценки технического состояния комплексного ГДТ, разработана математическая модель, описывающая движение потока жидкости в круге циркуляции ГДТ, т. е. в лопастной системе насосного, турбинного и реакторного колёс. Модель позволяет моделировать неисправности МСХ, такие как проскальзывание на режиме трансформации момента и заклинивание на режиме гидромуфты, и их влияние на характеристики машины (рис. 3).



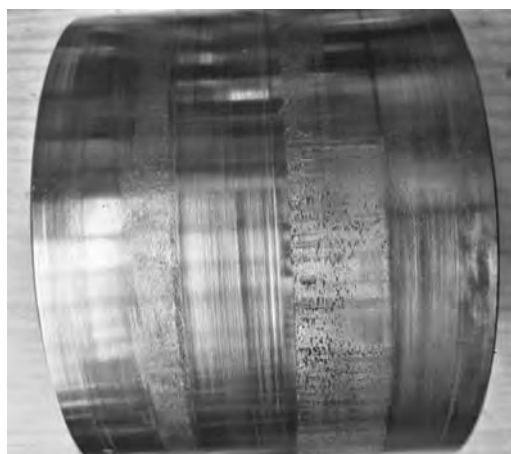


Рис. 1. Износ поверхности обоймы муфты свободного хода комплексного гидротрансформатора



Рис. 2. Следы питтинга на поверхностях роликов муфты свободного хода

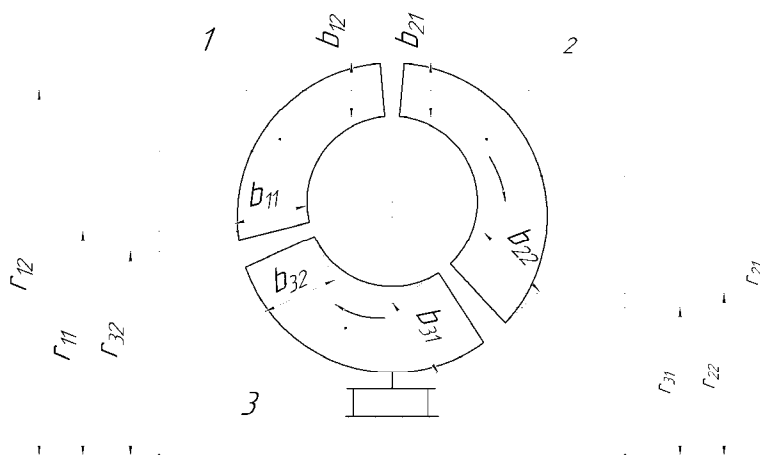


Рис. 3. Схема и геометрические параметры комплексного ГДТ: 1 – насосное колесо; 2 – турбинное колесо; 3 – реакторное колесо (колеса)



При вращении центробежного насосного колеса ГДТ с угловой скоростью ω_1 его лопатки воздействуют на рабочую жидкость, увеличивая скорость потока. При этом момент двигателя равен моменту на насосном колесе $M_d = M_n$. Жидкость из насосного колеса 1 поступает в турбинное 2 и заставляет его вращаться с угловой скоростью ω_2 , преодолевая момент сопротивления $M_T = M_c$. В межлопастных каналах турбины жидкость изменяет направление движения почти на 180° . Далее поток поступает в межлопастные каналы реактора 3, которые вызывают изменение направления движения жидкости в обратную сторону на такой же угол. Этим обеспечивается вход в межлопастные каналы насосного колеса с минимальными потерями на удар, которые являются преобладающими в ГДТ, помимо потерь на трение. В результате на реактивном колесе появляется момент M_R , который увеличивает M_T дополнительно к моменту от насосного колеса M_n , т. е. $M_T = M_n + M_R$.

В комплексных ГДТ переход с режима преобразования крутящего момента на режим ГДМ и наоборот осуществляется автоматически потоком жидкости, воздействующим на реактор,

вследствие чего расклинивается или заклинивается МСХ.

Основным режимом ГДТ является тяговый ($i_{тн} = 0 \dots 1$), когда мощность двигателя, подводимая к насосному колесу, передаётся турбинному и далее потребителю. Поэтому расчёт безразмерных характеристик сделан для данного режима.

Математическая модель ГДТ представлена уравнениями (1) для каждого лопастного колеса. При этом приняты допущения:

- 1) гидротрансформатор – трёхколёсный;
- 2) силы трения пропорциональны относительным скоростям;
- 3) гидромагистрали и стенки лопастных каналов абсолютно жёсткие, а рабочая жидкость несжимаема, т. к. давление не превышает 1 МПа.

Работа гидротрансформатора моделируется по классической методике [1], где предполагается, что все преобразующие свойства ГДТ определяются величиной расхода Q рабочей жидкости в профильной (меридиальной) плоскости. В свою очередь, данный расход Q зависит от динамического напора в каждом лопастном колесе:

$$H_d = \frac{\omega}{g} \left[r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1} + \frac{1}{Q} \left(\frac{d\omega}{dt} \sum_{i=1}^2 \int r_i^2 A_i dl_m + \frac{dQ}{dt} \sum_{i=1}^2 \int r_i ctg \beta_i dl_m \right) \right], \quad (1)$$

где ω – угловая скорость соответствующего лопастного колеса; g – ускорение свободного падения; r_2, r_1 – средние радиусы выхода из лопастного колеса и входа в него; c_{u2}, c_{u1} – окружные составляющие векторов скоростей во фронтальной плоскости лопастного колеса на выходе и на входе; A_i – площадь сечения межлопастного канала от входа до выхода; dl_m – приращение длины средней линии межлопастного канала в профильной плоскости; β_i – угол входа и выхода в межлопастной канал во фронтальной плоскости.

Также динамический напор оценивается формулой

$$H_d = \frac{M_i \omega}{\rho g Q}, \quad (2)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости; M_i – крутящий момент на i -м лопастном колесе.

Величина расхода Q зависит от угловых скоростей насоса ω_n и турбины ω_t . С помощью этих же параметров оцениваются коэффициенты трения ра-



бочей жидкости о межлопастные каналы и коэффициенты потерь напора на удар. Величины данных коэффициентов определяют скорости c_{u2} и c_{u1} . По зависимости (2) вычисляются крутящие моменты на лопастных колёсах гидротрансформатора.

На основе представленной модели разработана оригинальная программа (приложение) для ЭВМ, позволяющая получать безразмерные характеристики комплексного ГДТ.

Адекватность представленной модели подтверждена путем сравнения данных, полученных с помощью указанного компьютерного приложения, с экспериментальными данными при

исследованиях тракторов ДТ-175С и ВТ-200 Волгоградского тракторного завода, а также изделий с ГМТ других предприятий.

Теоретические исследования проводились путем моделирования работы ГДТ на ЭВМ. Задавались различные его параметры, характеристики жидкости, а также параметры управления.

В результате получены безразмерные характеристики комплексного ГДТ в его нормальном состоянии и при неисправной МСХ. Так, на рис. 4 и 5 представлены безразмерные характеристики нормально работающего комплексного гидротрансформатора ЛГ-400-70.

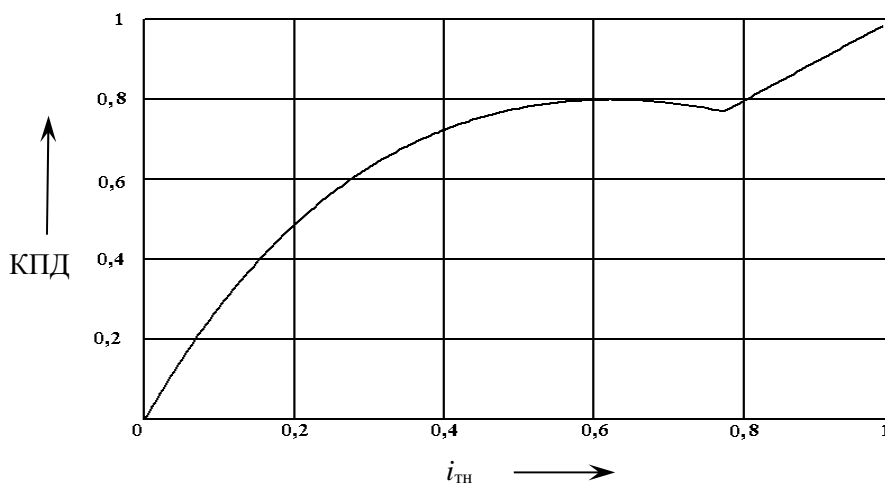


Рис. 4. Характеристика КПД исправного комплексного ГДТ

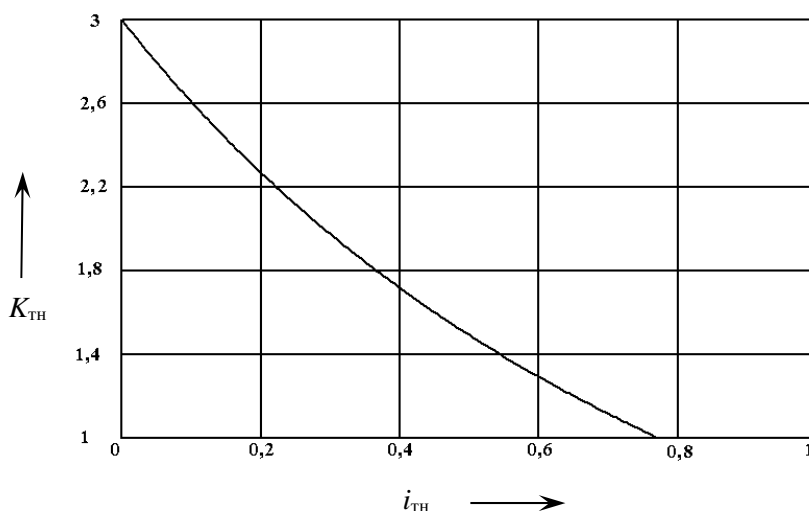


Рис. 5. Характеристика коэффициента трансформации исправного комплексного ГДТ



Моделирование неисправности ГДТ, когда реактор не блокируется МСХ, осуществлялось путем обнуления в математической модели динамического напора в реакторе $H_{дз} = 0$. Такая неисправность МСХ приводит к тому,

что комплексный ГДТ всё время работает в режиме ГДМ. При этом КПД равен передаточному отношению $i_{тн}$, а коэффициент трансформации $K_{тн}$ в это время равен единице (рис. 6).

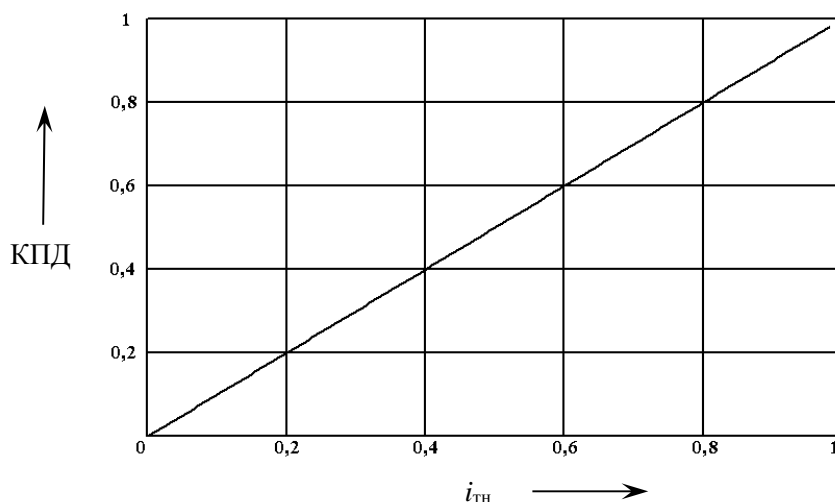


Рис. 6. Характеристика КПД ГДТ при отсутствии стопорения МСХ

Моделирование неисправности ГДТ, когда реактор постоянно неподвижен при заклинивании МСХ, производилось путем задания в компьютерной модели порога перехода на

режим ГДМ при $i_{тн} = 1$.

На рис. 7 и 8 представлены характеристики комплексного ГДТ при заклинивании МСХ.

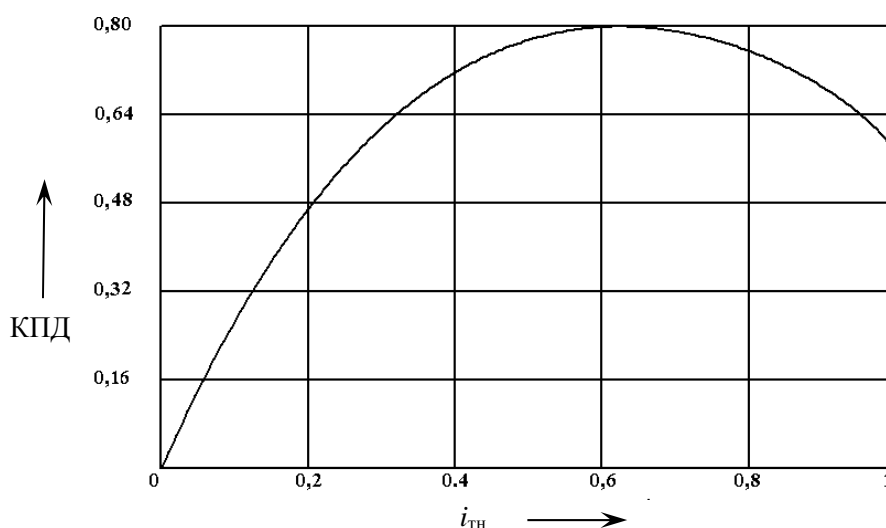


Рис. 7. Характеристика КПД ГДТ при постоянном заклинивании МСХ

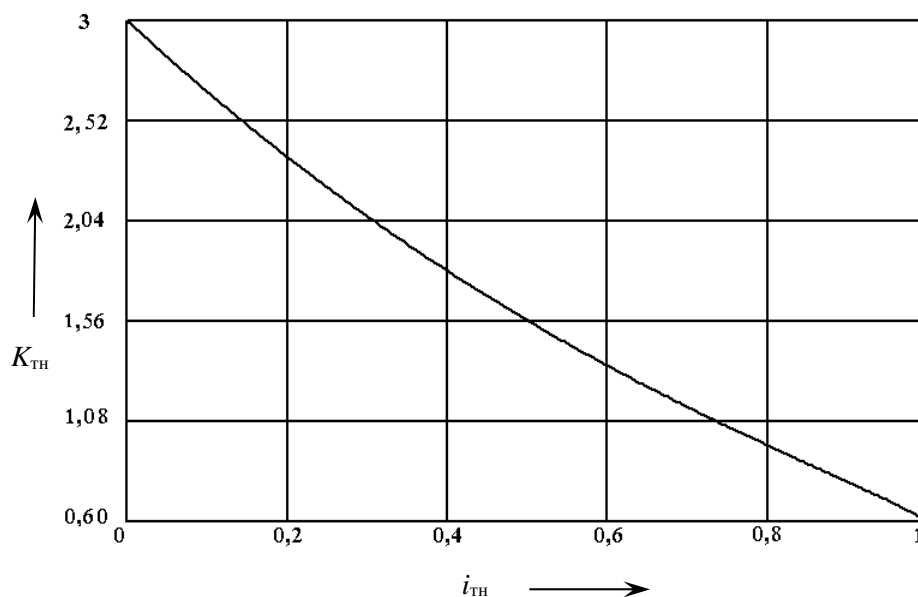


Рис. 8. Характеристика коэффициента трансформации ГДТ при заклинивании МСХ

Анализируя полученные характеристики, можно сделать вывод, что различные виды неисправностей МСХ по-разному отражаются на работе ГДТ и двигателя. Это даёт возможность идентифицировать неисправности при диагностике трансмиссии самоходной машины. Так, если за диагностический параметр принять коэффициент трансформации $K_{тн}$, то при исправном ГДТ на режиме трансформации момента $K_{тн} > 1$. При отсутствии фиксации реактора коэффициент трансформации всегда примерно равен единице, а при заклинивании МСХ и передаточном отношении более 0,7 $K_{тн} < 1$. Это проявляется в изменении нагрузки на двигатель за счёт различной прозрачности ГДТ.

На основании вышеизложенного предлагается оценку технического состояния МСХ комплексного гидротрансформатора проводить по следующей методике:

1) машина равномерно движется с принудительно заблокированным ГДТ с неизменной подачей топлива в двигатель и при этом фиксируется угловая скорость его вала;

2) производится разблокировка ГДТ.

Если МСХ исправна, то при значительной нагрузке на машину передаточное отношение станет меньше 0,7 и ГДТ перейдет на режим трансформации момента. За счёт прямой прозрачности ГДТ нагрузка на двигатель уменьшится и угловая скорость вала двигателя возрастет.

Если же угловая скорость коленчатого вала двигателя остается неизменной, то МСХ не стопорит реакторное колесо ГДТ и он работает в режиме ГДМ, т. е. не увеличивает момент.

В случае движения машины с малой нагрузкой после разблокировки ГДТ и постоянно зафиксированной МСХ гидротрансформатор не перейдет на режим гидромукты. Двигатель получит дополнительную нагрузку за счёт прозрачности ГДТ, и угловая скорость вала двигателя уменьшится.

Вывод

Теоретические исследования позволили синтезировать методику диагностики муфты свободного хода комплексного ГДТ без его разборки и применения сложных стендов. Суть мето-



дики заключается в задании тестового воздействия в виде блокировки/разблокировки ГДТ без изменения подачи

топлива в двигатель с контролем угловой скорости вала двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лаптев, Ю. Н.** Динамика гидромеханических передач / Ю. Н. Лаптев. – Москва: Машиностроение, 1983. – 104 с.
2. **Хадкевич, И. Ю.** Разработка алгоритмов и принципов оценки технического состояния гидротрансформатора / И. Ю. Хадкевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев, 2018. – С. 120.

Статья сдана в редакцию 20 сентября 2019 года

Евгений Владимирович Кузнецов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Ирина Юрьевна Хадкевич, инженер, Белорусско-Российский университет.

Evgeny Vladimirovich Kuznetsov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Irina Yuryevna Khadkevich, engineer, Belarusian-Russian University.

