

Basic characteristic determination of infinitely variable transmissions

Ljubomir Tsonov, Todor Todorov

Summary: *The purpose of this study is to facilitate designers test beds and researchers of mechanical pulse transmission (MPT) in their choice of appropriate torque meters and devices for creating and torque measurement.*

Specific requirements of MPT to the torque meters are indicated and what types torque meters are suitable for experimental studies are scribed.

Key Words: *infinitely variable transmissions; torque meters.*

Определяне на основните характеристики на механични импулсни предавки

Любомир Цонов, Тодор Тодоров

Резюме: *Целта на публикацията е да улесни конструкторите на изпитателни стендове, както и изследователите на механични импулсни предавки (МИП), при изборът им на подходящи торсиометри и устройства за създаване и измерване на въртящ момент.*

Посочени са специфичните изисквания на МИП към торсиометрите, описани са основните типове торсиометри, подходящи за експериментални изследвания

Ключови думи: *механични импулсни предавки, торсиометри.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на науката, технологиите и електронно-изчислителната техника, аналитичните методи на изследване на механични системи с помощта на математически модели добиват все по голяма популярност. При сложни механични системи включително механични импулсни предавки (МИП), директното създаване на математически модели е трудоемко, сложно, недостатъчно точно и не винаги възможно. В такива случаи необходимостта от точна и пълна информация за описване и извършване на идентификация на механични системи [1] предполага извършването на редица изследвания.

Експерименталните изследвания са критерий за истинността на всеки процес и позволяват да бъдат оценявани и сравнявани резултатите от теоретичните изследвания, точността и приложимостта на даден математичен модел. Експерименталните изследвания позволяват да се извърши диагностика на състоянието на МИП и да се определи степента на надеждност.

2. ОСОБЕНОСТИ НА МИП

Най-кратко описание на устройството на МИП може да се направи, като предавката се разглежда като генератор на трептения с регулируема или нерегулируема амплитуда и механизъм за едноразходен ход, преобразуващ трептенията на водещия вал в едноразходно пулсиращо движение на водения вал. Както показва и името им, МИП предават въртящия момент на импулси, отделни порции. Импулсите се променят по амплитуда и продължителност във времето. Честотата на импулсите е постоянна за отделната предавка и зависи от входящата честота на въртене. МИП са пулсиращи, едноразходни и необратими (не е възможно да се смени мястото на входа и изхода. При различна посока на въртене на входящия вал,

изходящия вал винаги се върти в една и съща посока, която може да се промени, само ако се смени посоката на заклъняване на механизъм за еднопосочен ход.

При използване на МИП в транспортни средства, като част от трансмисията, адаптираща характеристиката на двигателя към транспортното средство, се изисква импулсите да имат възможно най-малка амплитуда, съответно най-голяма плавност на движението.

МИП са особено подходящи при задвижване на някои металорежещи машини, понеже пулсациите на предавания въртящ момент значително подобряват режима на рязане [2].

Характеристиките на импулсите се променят не само в предавката, но и от неравномерността на входящия момент (например задвижване от ДВГ) и неравномерността на съпротивителния момент (натоварващи устройства с пулсиращ спирачен момент).

Честотата на сработване на механизма за еднопосочен ход е съизмерима с честотата на въртене на входящия вал, обикновено 25 Hz, но по данни на [3] може да достигне 200 Hz, при микрохрапови механизми за еднопосочен ход, а предавания пиков момент превишава средния 7-8 пъти за инерционни МИП с храпов механизъм за еднопосочен ход [4]. За неинерционни или още наречени твърди МИП [5], използвани в транспортни средства превишаването на пиковия момент над средния може да е по малко от 7 пъти, докато в специално синтезирани за работа с някои технологични машини може да надвишава 10 пъти. Честотата на пулсиране на изходящия въртящ момент на предавката е няколко пъти по висока от честотата на сработване на отделния механизъм за еднопосочен ход, тъй като предавката има няколко броя успоредно работещите механизми.

3. ИЗИСКВАНИЯ КЪМ СТЕНДОВЕТЕ И ИЗМЕРИТЕЛНИТЕ УСТРОЙСТВА

Особеностите в МИП налагат специфични изисквания към експериментални изследвания, извършвани на стенд и в натура върху самия машинен агрегат. На стенд се определят: коефициент на полезно действие и промяната му с изменение на натоварването и честотата на въртене; предаваната мощност, средната и максималните стойности на въртящия момент; неравномерността на изходящата честота на въртене, съответно пулсациите на въртящия момент; промяната на предавателното отношение с промяна на въртящия момент. Експериментът позволява да се извърши диагностика и да се определи степента на надеждност на МИП. При диагностика се следи за „нормалната“ работа, т.е. за регулярното включване и изключване на механизма за еднопосочен ход за цикъл. За извършване на диагностика и прогнозиране е необходимо да се измерва скоростта и ускорението на водещите и водените елементи, приведени към работните повърхнини на механизма за еднопосочен ход, съпротивителния момент и инерционните моменти на водените елементи [6].

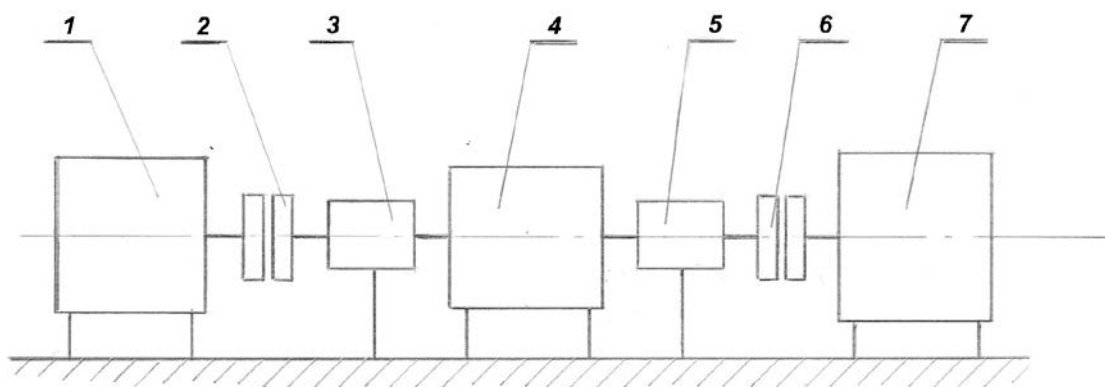
Понеже МИП са необратими, и предавателното им отношение не е постоянно, стендът върху който ще се провеждат изпитания може да работи само по отворен контур. За да се снимат описаните вече характеристики, е необходимо да се измерва въртящия момент на входа и изхода на МИП. Изходящият въртящ момент от МИП е пулсиращ, затова при изследване на равномерността на хода, трябва да се разглеждат елементите на цялата кинематична верига (двигател, съединител на двигателя, предавката, съединител на натоварващото устройство, самото натоварващо устройство и всички последователно свързани измерителни устройства). Наличието на еластични елементи в кинематичната верига, подложени на импулсно, пулсиращо натоварване създава условия за усукващо трептене и при преминаване през резонансно положение, моментната стойност може значително да превиши средната стойност на въртящия момент. Примерна схема на стенд е показана на фиг.1.

Двигателят (1) е свързан с МИП (4), чрез съединител (2) и торсиометър (сензор за въртящ момент и честота на въртене) (3), а МИП (4) е свързана с натоварващото устройство (7), посредством торсиометър (сензорът за въртящ момент и честота на въртене) (5) и съединителя (6).

В стенда двигателят (1) трябва да е регулируем, което ще позволи измерванията да се направят за различна входна честота на въртене. Използването на електродвигател гарантира достатъчна плавност на въртящия момент. За натоварващо устройство следва да се избере такова което да гарантира плавност на спирачния момент и при много ниска честота на въртене, достигаща теоретично до нула, на практика до 0,083-0,166 Hz, (5-10 об/мин). и има възможност за регулиране на спирачния момент.

Торсиометрите (5) и (6), трябва да са с голяма коравина на измервателния вал и да са закрепени твърдо или с гарантирано силово затваряне, към валовете на МИП. Така те ще могат да работят в целия честотен диапазон, без да предизвикват трептения.

Съединителите също трябва да бъдат избирани внимателно. Подходящи са съединители, позволяващи пет степени на свобода и с голяма коравина по оста на въртене.



Фиг.1. Схема на стенд за експериментални изпитания на МИП.

4. ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ

4.1. Измерване на въртящият момент развиван от електродвигателя

Моментът развиван от електродвигателя може да бъде измерен по много начини.

4.1.1. Чрез пендел електродвигател

Статорът на електродвигателя е лагериран, така, че да може да се завърти под действието на реактивния момент в обратна посока на посоката на въртене на ротора. Измерването става с калибрирани тежести, поставени на определено разстояние върху лост, неподвижно закрепен към статора или с динамометър измерващ силата между лоста и неподвижна опора. Между статора и неподвижната опора може да бъде поставен торсиометър. Този начин на измерване не е подходящ за измерване на пулсиращ момент, а при измерване на статичен момент се измерва и триенето в лагерите.

4.1.2. Чрез ротационен торсиометър

Торсиометърът се поставя между вала на електродвигателя и изпитваната МИП. Подходящ е за измерване на пулсиращ момент, понеже структурната схема на измерване е с най-малки отклонения. Поставя се с входящия фланец към входящия вал на МИП.

4.1.3. Базирано на различни принципи

В [8] са разгледани принципите на:

1. Математическа симулация.
2. Математическо изчисляване, базирано на взаимно измерване на поток.
3. Динамометрични измервания.
4. Преобразуватели на въртящ момент в електромотора.
5. Определяне кривата на въртящия момент.
6. Ротационни безконтактни акселерометри.
7. Чрез пиезоелектрични акселерометри.

4.2. Създаване и измерване на съпротивителен момент

Създаването на съпротивителен момент се извършва от натоварващи устройства, спирачки, електрически генератори, помпи и други.

Измерването се извършва основно по два метода [8], като трябва да се каже, че има и други специфични за натоварващото устройство.

4.2.1. Измерване чрез спирачки

Този метод се използва за измерване на средната стойност на спирачния момент, най-вече при изпитване на ДВГ. Спирачките които се използват според принципа на действие са механични, хидравлични, електрически, въздушни и комбинирани. Те създават регулируем спирачен момент, който се стреми да завърти корпуса на спирачката по посока на въртенето. Върху корпуса на спирачката е закрепен лост. Измерването на въртящия момент става по начина, описан в т. 4.1.1.

Механичните спирачки са с най-проста конструкция, като натоварващия момента се създава следствие на силите на триене. При ниски скорости на триене, каквито са скоростите при МИП, има опасност от настъпване на така наречения „стик-слип“ ефект. Тази опасност е по-малка при праховите ел. магнитни спирачки.

Хидравличните спирачки са два вида, обемни и динамични.

Обемните могат да създават спирачен момент при съвсем ниски честоти на въртене, почти до нула и стойността му е достатъчно голяма. При някои от тях създадения момент е пулсиращ, но с подходяща хидравлична схема и други мероприятия, недостатъкът се премахва.

Подходящи за натоварване на МИП са обемните хидравлични и праховите електрически спирачки, без да се използва измерителната им част.

Общ недостатък на хидродинамичните, постояннотоковите, променливотоковите, индукционните (вихротокови или хистерезисни), пневматичните спирачки и различни ел. генератори е, че създават достатъчно голям спирачен момент едва при по-висока честота на въртене.

4.2.2. Измерване чрез торсиометри

Торсиометърът е монтиран между МИП и натоварващото устройство.

Натоварващото устройство е без измерителна част, като корпусът му е неподвижно закрепен към основата. Тези торсиометри измерват моментната стойност на пулсиращия момент. За намиране на средната стойност, измерените стойности се обработват с компютърна система или се изчисляват като средна стойност между максимален и минимален момент.

4.2.3. Други методи

Като пример може да се посочи измерването на момента при обемна хидравлична спирачка, чрез налягането и честотата на въртене или измерването на ток и напрежение при натоварващ ел. генератор. При тези методи се мери средна стойност на момента.

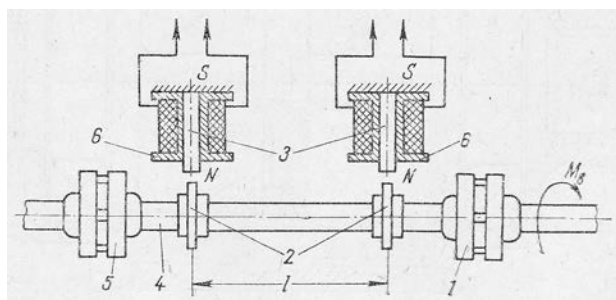
4.3. Торсиометри

Торсиометрите са наричани също торсионни устройства за въртящ момент, торсионни динамометри, трансмисионни динамометри, преобразователи на въртящ момент, датчици или сензори за въртящ (усукващ) момент. Съществуват два типа, за неподвижни валове (Reaction Torque Sensor), реакционен сензор за въртящ момент и за въртящи се валове (Rotary Torque Sensor), ротационен сензор за въртящ момент. За пулсиращ момент, както е при МИП, подходящи са ротационните, които са поставени пред натоварващото устройство, тъй като масата му ще промени или филтрира пулсациите. Поради високата си собствена честота, ротационните торсиометри могат да се смятат за безинерционни при измерване на средната и променливата стойности на момента. Измерването на момента се свежда до измерване на деформацията от усукване на вал или специален еластичен елемент, разположен в кинематичната верига. Според начина на измерване на деформацията торсиометрите се разделят на две групи:

1. Торсиометри за измерване на ъгъла на завъртане между две сечения на измервателния вал на разстояние едно от друго.

2. Торсиометри, при които се измерва местната деформация на измерителния вал.

При торсиометри от първата група, ъгълът на относително завъртане на две напречни сечения от измерителния вал, в зоната на еластичност е линейно пропорционален на въртящия момент. Максималният ъгъл на усукване се определя от максималната стойност на допустимото усукващо напрежение за съответния материал. Измерването на ъгълът се извършва по много начини. На фиг.2., е показан торсиометър с фазово-импулсен индукционен първичен преобразовател [8]. На валът (4), са монтирани неподвижно пръстените (2), които са от



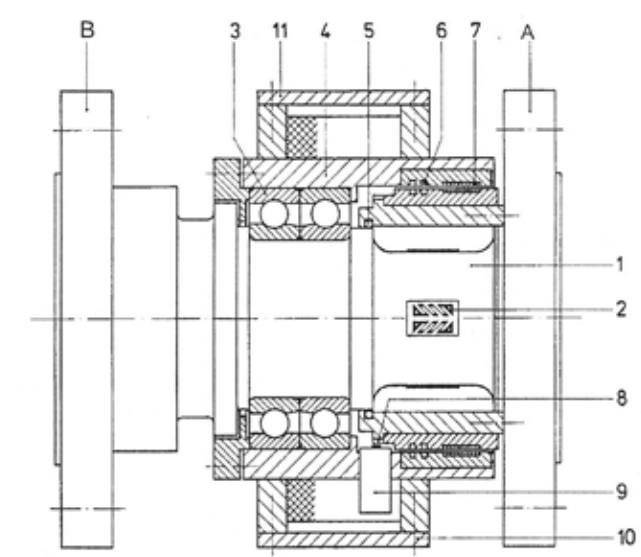
Фиг.2. Торсиометър с фазово-импулсен индукционен първичен преобразовател.

магнитно мек материал и са назъбени по периферията. Зъбите на дисковете са точно ориентирани един срещу друг. Срецу всеки диск неподвижно се закрепени постоянните магнити (3) и бобините (6). При преминаването на зъбите на дисковете покрай постоянните магнити (3), в бобините (6), възникват електрически импулси пропорционални на честотата на въртене. При усукване, зъбите от двата диска се разминават, следователно и електрическите импулси ще са изместени във времето. Сигналите се обработват в електронно устройство, което отчита фазовото изместване. Измерваният момент

е пропорционален на фазата на изместване, по-голяма фазова разлика, по-голям въртящ момент. Фазовата разлика може да бъде измерена и с фото-електричен преобразувател. Съществува голямо разнообразие на торсиометри в тази група, които ползват първични преобразуватели изградени на различни принципи, например капацитивни, струни, пиезоелектрически и други. Чувствителността на торсиометърът, без промяна на материала, от който е изработен вала, се повишава като се увеличи разстоянието между дисковете или се намали диаметъра на вала. При такива промени се увеличава еластичността на вала и се понижава честотата при която могат да настъпят трептения с голяма амплитуда. При тази група

тензометри е необходимо да се провери, в каква степен преобразувателят работи като еластична пружина.

Към втората група тензометри, с измерване на местната деформация на еластичен елемент, наречени също директни, се отнасят тензорезисторните, термоеластичните, магнитоеластичните, работещите по метода на рентгеновата тензометрия и по други методи. На фиг.3.е показан безконтактен тензометричен торсиометър. С буква (А) е означен фланецът, който трябва да се монтира към входящият или изходящия вал, на МИП. Така се намалява



Фиг.3. Безконтактен тензометричен торсиометър със сензор за честота на въртене.

структурната грешка при измерване. С (1) е означен торсионния вал, върху който са залепени тензорезисторите (2). Корпусът (4), със съединителят (11), които не се въртят, чрез лагерите (3), са монтирани върху вала (1). Пръстенът (5), предпазва тензорезисторите от замърсяване. Чрез капацитивния предавател (6), са предава информацията от тензорезисторите (2), които се захранват чрез индуктивния преобразовател (7). Назъбеният диск (8), заедно с индуктивния преобразовател (9), образуват сензор за измерване на честота на въртене. Съществуват торсиометри, при които захранването и сигналът от измерването се предават чрез колектор и четки. Те не са препоръчват, особено при продължителни изпитания.

Торсиометърът показан на фиг. 2., е напълно подходящ за вграждане в стенд за изпитване на МИП. Валове на

тензометричните торсиометри са достатъчно корави, следователно с висока собствена честота, за да се считат за безинерционни, както при измерване на средна, така и на променлива във времето стойност на въртящия момент.

Торсиометрите базирани на методите на термоеластичността, измерват само променлив момент. Базираните на метода на магнитоеластичността измерват средна стойност и променлива, устойчиви са на претоварване и работят в голям честотен диапазон. Подходящи са за експериментални изследвания на МИП, също и за натурни изпитания. Във „Формула-1“ се използват за управление на двигателя и КЕРС системата. Без контактни са. Издържат на голямо претоварване. Субстанцията, която променя магнитните си свойства, под действие на усукващия момент, се поставя непосредствено върху работните валове на трансмисията. Все още са нови за пазара и се предлагат в ограничени количества.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1. Относно изборът на торсиометри.

За експериментални изследвания на МИП са подходящи ротационни торсиометри, (Rotary Torque Sensor), които измерват постоянната и променливата част на въртящия момент, позволяват претоварване по цялата скала от 500 до 1000% и имат голяма коравина на измерителния вал, такава че да се държат като без инерционни. Предпочитани са тези с директно измерване на напрежението и комбинираните със сензор за измерване на честота на въртене.

5.2. Относно мястото и начина на монтаж на торсиометрите.

Торсиометрите се монтират на входящия и изходящия валове на МИП, директно чрез геометрична или гарантирана силова връзка, или като се използват съединители с пет степени на подвижност и голяма коравина по оста на предаване на въртящия момент.

5.3. Относно изборът на натоварващо устройство.

Натоварващото устройство трябва да създава равномерен съпротивителен момент, с възможност за регулирането му от нула до максимум, в целия диапазон на промяна на честотата на въртене. Подходящи са обемните хидравлични спирачки свързани в схеми позволяващи равномерен съпротивителен момент.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите, от които са представени в настоящата публикация са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов М., Вригазов А., Неделчев И. Теория на механизмите и машините. Д.И „Техника“, София, 1980.
2. Мальцев В. Ф. Механические импульсные передачи. И-во „Машиностроение“, Москва, 1978.
3. Леонов А.И. Микрохраповые механизмы свободного хода. И-во „Машиностроение“, Москва, 1982.
4. Быкова Татьяна Евгеньевна, Основание выбора конструктивных параметров импульсных передач на основе исследований ударных процессов в храповых механизмах блочного типа. Автореферат, к.т.н., Ковров, 2012. <http://dksta.ru/kgta/learn/dissov.php>
5. Есипенко Я.И. Механические вариаторы скорости., Г. И-во технической литературы УССР, Киев, 1961.
6. Карабан В.Г., Зотова Л.И. Особенности диагностики бесступенчатых импульсных передач автоматических систем. Волгоградский государственный технический университет, <http://www.sworld.com.ua/konfer25/592.htm>
7. Skala Bohumil, The torque measurement based on various principles. University of West Bohemia in Pilsen, 2004., <http://www.iel.waw.pl/strony/wydawnictwo/zal/220/03.pdf>
8. Генов Г.Д., Иванов Ц.Й., Пилев Д.И., Изпитване на двигател с вътрешно горене. Д.И-во „Техника“, София, 1985.

КОРЕСПОНДЕНЦИЯ

Любомир Цонов
ТУ София, бул. „Климент Охридски“ №8, лаб. 4209
tsonov@tu-sofia.bg

Тодор Тодоров
ТУ София, бул. „Климент Охридски“ №8, каб.4528
tst@tu-sofia.bg