

МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЕНЗОРИ, СПЕЦИФИЧНИ ЗА СЪВРЕМЕННИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

Васил Димитров
vdimitroff@abv.bg

**ВТУ „Тодор Каблешков“ – София,
ул. Гео Милев“ 158, София 1574
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** системи за автоматично управление, токови трансдусери, измервателни усилватели, енкодери*

***Резюме:** Съвременните електрически транспортни средства (ЕТС) се изграждат на базата на енергоефективни асинхронни задвижвания с микропроцесорни системи за управление, контрол и защита. Прилагането на векторно управление обезпечава широк диапазон на регулиране на скоростта независимо от натоварването, ниски пулсации на момента, оптимални стойности на енергийните показатели (фактор на мощността, коефициент на полезно действие, хармонични изкривявания). За реализацията на векторното управление е необходимо съответното информационно осигуряване – към системата за управление трябва да се подава информация в реално време за действителните стойности на параметрите на задвижването, най-важните от които са скорост, ток и напрежение. В настоящия доклад са разгледани сензори, специфични за такива приложения – токов трансдусер, измервателен усилвател и ротационен енкодер. Разработена е методика за провеждане на изпитания с цел определяне на оптималната стойност на коефициента на преобразуване.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Сензорите са устройства, използвани в системите за автоматично управление, с чиято помощ се получава информация за контролирана величина чрез преобразуването ѝ в електрически унифицирани сигнали [1, 2]. Входната величина на сензора може да бъде с различна физична природа: механична (линейно и ъглово преместване, скорост, ускорение, тегло, налягане и др.), електрическа (съпротивление, магнитна проницаемост и др.), топлинна, светлинна и др. Изходната величина е постоянен или променлив ток или напрежение с изменяща се амплитуда, честота, фазова разлика, брой импулси, продължителност и т.н. За измерване и обработка на изходната електрическа величина обикновено се прилагат аналогови методи или аналого-цифрови преобразуватели и компютърна обработка на информацията.

Функционалната зависимост на изходната величина (y) от входната величина (x) представлява статичната характеристика на сензора $y=f(x)$. Тази зависимост е желателно да бъде линейна, но в повечето случаи тя е нелинейна и притежава хистерезис (магнитен, дължащ се на механични луфтове, триене и др.). Следователно,

изходната величина не е еднозначно определена от входната, а зависи от посоката на изменение и има два клона (при увеличение и намаление на входната величина x). За всяка стойност на x разликата между двата клона на характеристиката определя грешка на сензора. Често тази нееднозначност се премахва чрез приемане на една осреднена характеристика, а за намаляване на допусканата при това грешка се поставя изискването за стесняване на хистерезиса. От линейната (работната) област на осреднената характеристика се определя номиналният коефициент на преобразуване на сензора: $K = y/x$.

СПЕЦИФИЧНИ СЕНЗОРИ В СЪВРЕМЕННИТЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

Сензорите, прилагани в съвременните електрически транспортни средства (ЕТС), трябва да притежават висока точност и бързодействие, да са съвместими със системата за управление на електрозадвижването, да осигуряват ниски стойности на грешката от преобразуване в необходимия диапазон на изменение на контролираната величина, да имат линейна входно-изходна характеристика без хистерезис [3, 4]. За информационно осигуряване при реализацията на векторното управление е необходимо към управляващото устройство (микропроцесор) да се подава информация в реално време за действителните стойности на параметрите на задвижването, най-важните от които са скорост, ток и напрежение [5].

За измерване скоростта на движение в съвременните ЕТС се използват предимно инкрементални ротационни енкодери. Работят на принципа на оптоелектронно сканиране на разделителен диск, монтиран на въртящата се ос. На диска има пътечка с тъмни и светли ивици. Като източник на светлина се използва светодиод (light emitting diode – LED), а като приемник – фотоелектронен елемент (photodetector PD). В зависимост от броя отвори на диска се изработват определен брой електрически импулси на 1 оборот, като се генерират две поредици А и В, дефазирани на 90° ел., както и референтен указателен сигнал Z (един импулс на всеки оборот). Следователно, ъгълът на завъртане се преобразува в поредица електрически импулси с висока честота, които могат да бъдат подадени директно към цифровите входове на микропроцесорната система за управление – не е необходимо включване на допълнителни преобразуватели, а управляващата програма може да определи с висока точност не само скоростта, а и ускорението [11].

Развитието на електронната и измервателната техника доведе до широкото внедряване на трансдусери и измервателни усилватели като сензори на ток и напрежение в ЕТС [4, 6, 7, 8]. Токовете трансдусери се базират на ефекта на Хол и осигуряват безконтактно измерване на постоянен и променлив ток с високи стойности (стотици амperi и повече). Характеризират се с голяма точност и бързодействие. Изходното им напрежение може да бъде директно подадено към аналоговите входове на микропроцесорната система за управление или (при необходимост) към измервателен усилвател със симетричен вход.

Измервателните усилватели (Instrumentation Amplifier) се характеризират с много стабилни параметри, като дължащите се на външни фактори нежелани промени в усилвания сигнал са сведени до минимум. Първото стъпало на входа е диференциален усилвател (Differential Amplifier). Той се характеризира със симетричен вход и изход, усилва диференциалните (противифазни) сигнали и подтиска синфазните (т.е. шума), усилва и постоянно-токови сигнали. За повишаване на входното съпротивление това стъпало обикновено се реализира с три операционни усилвателя ОУ (стойностите са не по-малки от няколко стотици $M\Omega$ и достигат десетки $G\Omega$ при ОУ с полевни транзистори на входа). Второто стъпало е класическа схема на диференциален усилвател с един ОУ.

ЛАБОРАТОРНА БАЗА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

За провеждане на изследванията се използва симулатора за научни и инженерни изследвания на съвременни асинхронни задвижващи системи (фиг. 1). Честотният преобразувател Sinamics G120 управлява асинхронен двигател (АД) 1LA7106-4AA60-Z-H57 с монтиран на вала ротационен енкодер, който се използва за обратна връзка по скорост, необходима за реализацията на векторно управление. Чрез ремъчна предавка АД задвижва синхронен генератор (СГ) тип SKS 112.1/10.12 с вграден токоизправител (ТИ). Възбуждането му може да се регулира чрез регулатора РВ. Във веригата на генератора са включени товарни реостати R_T , като е осигурена възможност за промяна на еквивалентното съпротивление. Монтирани са сензори на ток (трансдусер HAS100-S) и напрежение (измервателен усилвател ELDI_C2), както и необходимата защитна и измервателна апаратура. На вала на СГ е монтиран енкодер.

Токовят трансдусер HAS100-S е конструиран на принципа на ефекта на Хол [9]. Намира голямо приложение при измерване на постоянен и променлив ток в електрозадвижвания с регулируема скорост. Реализира галваническо разделяне между силовата и измервателната верига. Има ниска консумация на енергия и малки размери. Притежава висок клас на защита срещу външни въздействия. Характеризира се с голям работен обхват и лесен монтаж.

Измервателният усилвател ELDI_C2 се състои от два идентични канала DA1 и DA2. Изградени са от двустъпални схеми с диференциални усилватели, реализирани с операционни усилватели MC34072, характеризиращи се с иновативен дизайн, широка честотна лента (4,5 MHz), бързо време за установяване, високо входно съпротивление, малко изместване на напрежението и голям коефициент на усилване [8, 10].

Необходимите технически данни за устройствата са следните:

Синхронен генератор SKS 112.1/10.12 с ТИ:

$n_{\max} = 6000 \text{ rpm}$; $U_N = 28 \text{ V DC}$; $I_{\max} = 60 \text{ A}$; $P_{\max} = 1,68 \text{ kW}$; $U_{\text{възб. max}} = 12,5 \text{ V}$;

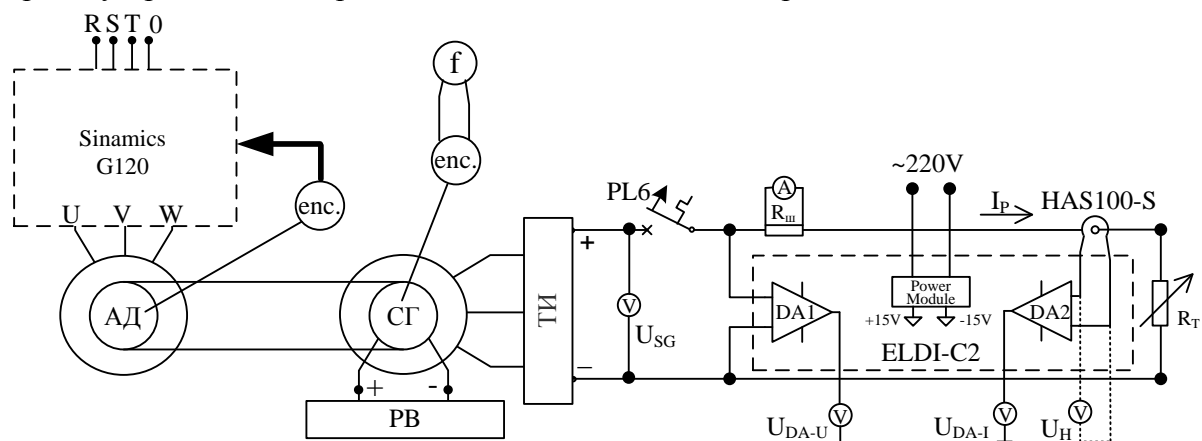
Токов трансдусер HAS100-S [9]:

Номинален входен ток $I_{PN} = 100 \text{ A}$; изходно напрежение $U_H = \pm 4 \text{ V}$ (при $\pm I_{PN}$); захранващо напрежение $U_C = \pm 15 \text{ V}$; точност $\varepsilon_X < \pm 1\%$; линейност $\varepsilon_L < \pm 1\%$ I_{PN} ; честотна лента $f = \text{DC} - 50 \text{ kHz}$; хистерезис $U_{OH} < \pm 20 \text{ mV}$ (на U_H при $I_P = 0$ след покачване до I_{PN}). Номиналният коефициент на преобразуване е $K_{Hn} = U_H/I_P = 0,04$.

Измервателен усилвател ELDI_C2:

Канал DA1 се използва като сензор за напрежение на генератора. Входно напрежение: $U_{SG} = 0-40 \text{ V}$; изходно напрежение $U_{DA-U} = 0-10 \text{ V}$; захранващо напрежение $U_C = \pm 15 \text{ V}$. Номиналният коефициент на преобразуване е $K_{Un} = U_{DA-U}/U_{SG} = 0,25$.

Канал DA2 е предназначен за усилване на изходния сигнал U_H от токовия трансдусер. Входно напрежение $U_H = 0-2 \text{ V}$, изходно напрежение $U_{DA-I} = 0-10 \text{ V}$.



Фиг. 1. Схема на лабораторен симулатор за изследване на сензори

Номинален коефициент на преобразуване $K_{DA-In} = U_{DA-I} / U_H = 5$.

Номиналният коефициент на преобразуване на тока е $K_{In} = K_{DA-In} \cdot K_{Hn} = 5 \cdot 0,04 = 0,2$.

Енкодер EN4000.0 IN24.0 256F, монтиран на вала на СГ [11, 12]:

Захранващо напрежение $U_C = 12 - 24$ V; импулсни поредици А и В, дефазирани на $90^\circ - 256$ ppr; Z – 1 ppr. Номинален коефициент на преобразуване $K_{n-n} = f/n = 4,2667$.

МЕТОДИКА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Целта на изследванията е да се провери линейността на входно-изходната характеристика на сензорите, наличието на хистерезис, точността на преобразуване (дали експериментално определените коефициенти на преобразуване съвпадат с номиналните), да се определи грешката при преобразуването и да се посочат начини за намаляването ѝ. При изпитанията се използват следните измервателни уреди:

- Mastech MS8226 DMM – прецизен цифров мултиметър с клас на точност 0,5 при измерване на постоянно напрежение и 0,2 при измерване на честота.

- LCD Digital Panel Meter SF-72 – електронен амперметър с клас на точност 0,5 (в комбинация с шунт 100 A/ 75mV).

- Digital tachometer DT-2234A (photo type) – тахометър с клас на точност 0,05.

Алгоритъмът за работа при провеждане на изпитанията е следният:

1. Снемат се редица стойности при нарастване на входната величина – чрез постепенно увеличаване на скоростта на асинхронния двигател, възбуждането на синхронния генератор или намаляване съпротивлението на товарните реостати.

2. Снемат се редица стойности при намаляване на входната величина – чрез постепенно намаляване на скоростта на АД, възбуждането на СГ или увеличаване съпротивлението на товарните реостати.

Честотният преобразувател Sinamics G120 работи в режим на векторно управление с цел стабилизация на скоростта независимо от натоварването.

3. По данните, получени при измерванията, се построяват статичните входно-изходни характеристики за всеки сензор.

4. Изчисляват се коефициентите на преобразуване за всяко измерване [2]:

$$(1) \quad K_H = \frac{U_H}{I_P}; K_{DA-I} = \frac{U_{DA-I}}{U_H}; K_I = \frac{U_{DA-I}}{I_P}; K_U = \frac{U_{DA-U}}{U_{SG}}; K_n = \frac{f}{n_{SG}}$$

5. Изчисляват се измерените стойности на контролираните величини съобразно номиналните коефициенти на преобразуване:

$$(2) \quad I_{Pmes} = \frac{U_{DA-I}}{K_{In}}; U_{SGmes} = \frac{U_{DA-U}}{K_{Un}}; n_{SGmes} = \frac{f}{K_{n-n}}$$

6. Изчисляват се средно аритметичните стойности на всички коефициенти:

$$(3) \quad K_{Hcp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{Hi}}{m}; K_{DA-Icp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{DA-Ii}}{m}; K_{Icp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{Ii}}{m}; K_{Ucp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{Ui}}{m}; K_{n-cp} = \frac{\sum_{i=1}^m K_{n-i}}{m},$$

където m е броят на измерванията.

7. Определят се изчислените коригирани стойности на контролираните величини съобразно средно аритметичните коефициенти на преобразуване:

$$(4) \quad I_{Pcorr} = \frac{U_{DA-I}}{K_{Icp}}; U_{SGcorr} = \frac{U_{DA-U}}{K_{Ucp}}; n_{SGcorr} = \frac{f}{K_{n-cp}}$$

8. За всяко измерване се пресмятат абсолютната, относителната и приведената грешка ε спрямо измерените и коригираните стойности на контролираните величини:

$$(5) \quad \varepsilon_{abs} = y_{mes} - y_{act}; \varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon_{abs}}{y_{act}}; \varepsilon_{red} = \frac{\varepsilon_{abs}}{y_{max}},$$

където y_{mes} е измерената стойност по (2) или изчислената по (4),

y_{act} – действителната стойност, измерена със съответния уред,

y_{max} – максималната стойност, която може да бъде контролирана от сензора.

9. Сравняват се грешките за измерените и коригираните стойности на контролираните величини и се определя оптималната стойност на коефициентите на преобразуване.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад са разгледани сензори, намерили приложение в съвременните ЕТС – токови трансдусери, измервателни усилватели, ротационни енкодери. Те се използват за информационно осигуряване на микропроцесорната система за управление, като се характеризират с висока точност и бързодействие, което е абсолютно необходимо за реализацията на векторно управление на асинхронните задвижвания. Разработена е методика за изследване на такива сензори с цел уточняване на коефициента на преобразуване. След провеждане на изпитания се определя оптималната му стойност, която трябва да бъде заложена в управляващата програма на микропроцесора. По този начин се свежда до минимум грешката при преобразуването на контролираните величини.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Паскалева У., Аспекти на съвременните електрически измервания, ЮЗУ "Неофит Рилски", 2010
- [2] Иванов Е., Н. Стойчева, Основи на автоматиката и телемеханиката, София, ВТУ „Т. Каблешков“, 2009
- [3] Products for Totally Integrated Automation and Micro Automation, Siemens-ST 70, 2011 and Siemens-ST 70 N, 2012
- [4] Railway Current & Voltage Transducers, Traction Catalogue, LEM, 2008
- [5] Миленов И., В. Димитров, Ч. Джамбазки, Векторно управление на тягови асинхронни електродвигатели за метрополитен, Юбилейна международна научна конференция „Тунелно и метростроителство - Десет години Софийско метро“, Сборник доклади, стр.280, ФНТС 2008
- [6] Isolated Current and Voltage Transducers: Characteristics – Applications – Calculations, LEM Components, 2004
- [7] Hopkins M., Electrical Transducers, Hoyt Electrical Instrument Works Inc., 2008
- [8] Куцаров С., Измервателни усилватели, сп. „Инженеринг ревю“, бр. 7, 2006
- [9] Current Transducers HAS 50 to 600-S, LEM Components, 2005
- [10] Operational Amplifiers MC3xxx, Semiconductor Components Industries, LLC, 2004
- [11] Sinamics Drive Systems, Catalog D21.1, Siemens, 2006
- [12] Rotary encoders, Technical Specifications, available at: http://spektrum-bg.com/index.php?op=incremental_encoders;

METHODOLOGY OF STUDY OF SENSORS SPECIFIC TO CONTEMPORARY ELECTRIC VEHICLES

Vasil Dimitrov
vdimitroff@abv.bg

*Todor Kableshkov University of Transport – Sofia
158 Geo Milev Str., Sofia 1574,
BULGARIA*

Key words: *Automatic Control Systems, Current Transducers, Instrumentation Amplifiers, Encoders*

Abstract: *Contemporary electric vehicles are designed on the base of highly efficient asynchronous drives and microprocessor safety and control systems. Vector Control provides a stable speed irrespective of the load, low level of torque fluctuations, optimal values of energy indicators (power factor, efficiency, and harmonic distortion). The appropriate information support is necessary for the implementation of vector control: bits of information about the actual values of drive parameters must be given to control system in real time. The most important drive parameters are current, voltage and speed of the motor. In this paper, sensors which are specific to such applications are described: current transducer, instrumentation amplifier, rotary encoder. Methodology and algorithm of sensors tests are developed. Their goal is to determine the optimal value of the conversion factor.*