

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ С ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ – ЛАБОРАТОРЕН СИМУЛАТОР

Васил Димитров

vdimitroff@abv.bg

***Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
1574 София, ул. „Гео Милев № 158,
БЪЛГАРИЯ***

Ключови думи: асинхронни електрозадвижвания, честотно управление, динамични характеристики

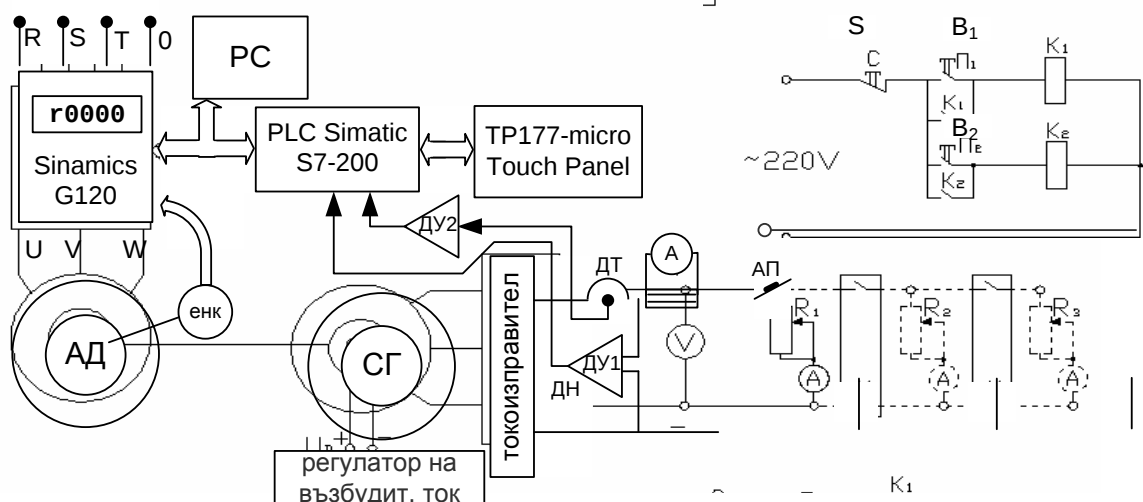
Резюме: В доклада е направена експериментална верификация на принципите на честотно управление на асинхронни електрозадвижвания. Лабораторен симулатор, изграден на базата на най-новите технологии, дава възможност за изпитания не само на статичните, но и на динамичните характеристики. Те показват изменението на параметрите на задвижването по време на преходните режими на работа, при които се преминава от едно установено състояние към друго. Причини за възникване на преходните режими са или изменението на натоварването, или въздействие върху електрозадвижването при управлението му, т.е. пускане, спиране, регулиране на скоростта, реверсиране и т.н. Изменението на електрическите параметри, предизвикано от случайни причини, например изменението на напрежението или честотата на захранващата мрежа, също довеждат до възникване на преходни режими. Изучаването на преходните режими има голямо практическо значение, тъй като на тях се основават правилният избор на мощностите на двигателите, правилното подбиране на апаратите и оразмеряването на схемата за управление, намаляването на разхода на енергия при пускане и спиране. Само ограничен брой изпълнителни механизми допускат възможността да се проектират електрозадвижвания без да се вземе под внимание характерът на протичането на преходните процеси: механизми с продължителен режим на работа, които рядко се спират и пускат (вентилатори, помпи и др.) [1]. За болинството работни машини и механизми трябва да се вземе под внимание характерът на протичането на преходните процеси, тъй като той оказва съществено влияние върху работата на задвижването. Следователно динамичните характеристики са от особено значение за задвижвания с променлив съпротивителен момент, както е при електрическите транспортни средства. Изучаването на динамиката на задвижванията с честотно управление е от съществено значение за повишаване качеството на обучение на кадри за транспорта. Разработена е програма за снемането на динамичните характеристики в реално време при стартиране, спиране и промяна на заданието за скорост или натоварването на двигателя.

1. Въведение

Асинхронните двигатели дълго време не са намерили приложение в транспорта поради специфичните високи изисквания към задвижванията на електрическите транспортни средства (ЕТС): необходимост от плавно регулиране на скоростта в много широк диапазон, голям пусков момент, високи енергетични показатели. Благодарение развитието на силовата електроника и компютърната техника през последните години, съвременните локомотиви, трамваи, тролейбуси и метровлакове вече се изграждат на базата на асинхронни задвижвания, управлявани с високоефективни устройства и микропроцесорни системи за защита и контрол. Честотното регулиране създава възможност за плавно изменение скоростта на движение на ЕТС в широки граници, а чрез векторно управление се постига висока точност на автоматичното управление при оптимални енергийни показатели и в съответствие с изменението на натоварването; ниски пулсации на момента, гарантиращи плавност и комфорт на движението; реализация на много висок коефициент на сцепление и устойчивост срещу буксуване.

2. База за провеждане на изследванията

Лабораторен симулатор, изграден на базата на съвременни технически средства, е създаден с цел изпитания на асинхронни задвижвания с честотно управление (фиг. 1). Основните елементи, включени в конфигурацията на симулатора, са разработка на фирмата Siemens: трифазен асинхронен двигател (АД) от серия 1LA7 с повишена енергийна ефективност, честотен преобразувател Sinamics G120, програмируем логически контролер PLC Simatic S7-200, входно-изходен информационен панел TP177-micro Touch Panel. Системата за натоварване на асинхронния двигател е изградена от синхронен генератор (СГ), товарни реостати R_1 , R_2 , R_3 , бутони S , B_1 , B_2 , контактори K_1 , K_2 и регулатор на възбудителния ток на СГ. Във веригата са монтирани защитна и измервателна апаратура, както и датчици на ток и напрежение, свързани към PLC. По този начин се създава възможност за автоматичен контрол на натоварването и се избягва недопустимото претоварване на машината по време на изпитанията. Датчикът на напрежение (ДН) е реализиран чрез прецизен измервателен усилвател ДУ1 с коефициент на преобразуване $k_u = \frac{1}{4} = 0,25$. Датчикът на ток (ДТ) е токов трансдусер HAS100-S, базиран на ефекта на Хол. При $I_f = 50A$ изходното му напрежение е $U_h = 2V$. За увеличаване на чувствителността и за пълно използване на обхвата на аналоговия вход на PLC изходният сигнал U_h се усилва от диференциален усилвател ДУ2 с $k_u = 5$.



г. 1. Схема на лабораторния симулатор

Фи

Честотният преобразувател Sinamics G120 предлага богат набор от функционални възможности [2]. В настоящето изследване се използват:

А. Тип на управление на асинхронния двигател – задава се чрез избиране на желаната стойност на параметър P1300 ("Control Mode"):

- Управление на електродвигателя по V/f характеристика:
линейна ($U/f = \text{const}$: P1300=0), квадратична ($U/f^2 = \text{const}$: P1300=2),
V/f характеристика с контрол на намагнитващия ток (flux current control FCC: P1300=1);

V/f характеристика, зададена от потребителя (програмируема характеристика, при която на всяка стойност на честотата се задава стойност на напрежението – по този начин се взема под внимание специфична механична характеристика на товара: P1300=3),

адаптирани приложения (без или с FCC), при които се вземат под внимание специални технологични особености с цел поддържане на постоянна скорост независимо от натоварването (напр. в текстилна промишленост): максималният ток (I_{max} контролер) влияе само върху изходното напрежение (не и на изходната честота), забранява се компенсация на хлъзгането (P1300=5 или 6);

- Векторно управление без датчик за обратна връзка (Sensorless Vector Control: P1300=20);
- Векторно управление с обратна връзка по скорост: използва се енкодер, монтиран на вала на АД (P1300=21);
- Управление на момент с или без външен датчик за обратна връзка (Vector torque-control: P1300=23 или съответно P1300=22).

Б. Избор на канал за задаване на честота (избира се чрез параметър P1000 „Selection of frequency setpoint“). Заданието за скорост може да се въведе по един от следните варианти:

- чрез клавиатурата на операционния панел (BOP), като се използва функцията електронен потенциометър (параметър P1040);
- чрез аналогов вход AI0, към който се свързва външен потенциометър;
- чрез цифровите входове DI3-DI6 и работа по фиксирани честоти (възможно е да се задават 16 честоти чрез параметризация);
- От PLC и входно-изходния информационен дисплей TP177micro;
- От компютър и управление в реално време чрез софтуерния продукт STARTER.

Именно STARTER се използва за снемане в реално време на динамичните характеристики при стартиране, спиране, промяна на заданието за скорост или на натоварването на двигателя. Разработена е допълнителна програма TRACE за следене параметрите на задвижването. Sinamics G120 предлага възможност за визуализация работата на двигателя (част от параметрите са показани в табл. 1) [3]. За архивиране на данните се използва WINDOWS-базираната компютърна конфигурация.

3. Методика за провеждане на изследванията

Динамичните характеристики показват изменението на параметрите на задвижването за определено време, зададено в началото на изпитанието. Могат да бъдат следени едновременно до 30 величини.

Целта на изследванията е да се снемат и анализират динамичните характеристики на асинхронни електрозадвижвания с честотно управление при променлив съпротивителен момент, което е характерно за ETC:

$$(1) \quad f_{\text{ux.}}=f(t); n_{\text{pot.}}=f(t); M=f(t); I=f(t); U=f(t); P=f(t); \cos\varphi=f(t),$$

където

$f_{изх.}$ е честотата на изхода на честотния преобразувател;

$n_{ром.}$ е действителната скорост на ротора, измерена от енкодера;

$M, I, U, P, \cos\varphi$ са параметри на двигателя, визуализирани от честотния преобразувател (могат да бъдат снети и отделните компоненти на тока I : намагнитваща компонента I_m и компонента I_a , която създава момента).

Съпротивителният момент M_c се изменя от $0,4.M_n$ до $0,7.M_n$ (фиг. 2).

Симулирането на рязка промяна на M_c се извършва чрез бутоните B_1, B_2 и S : променя се броят на паралелно включените реостати R_1, R_2, R_3 .

Таблица 1: Sinamics G120 – параметри за визуализация

Параметър	Описание
r0020	зададена честота $f_{зад.}$ (actual frequency setpoint), Hz
r0021	изходна честота f , изключвайки компенсацията на хлъзгането, подтискането на резонансната честота и ограниченията на честотата, Hz
r0024	действителна изходна честотата f , включително компенсация на хлъзгането, подтискане на резонансната честота и ограничения на честотата, Hz
r0022	изчислена скорост на двигателя n съобразно изходната честота r0021, rpm (изчислява се в зависимост от зададения брой полюси и не се взема под внимание промяната на хлъзгането в зависимост от товара)
r0061	действителна роторна честота, измерена от енкодера, Hz
r0025	ефективна стойност на напрежението U , приложено върху двигателя, V
r0027	ефективна стойност на тока на двигателя I , A
r0029	намагнитваща компонента на тока I_m , A. Базирана е на номиналния магнитен поток, изчислен съобразно параметрите на АД. Сравнително постоянна е до номиналната скорост, а над нея намалява (отслабва магнитното поле на двигателя): по този начин позволява увеличение на скоростта, но при намален момент
r0030	компонента на тока I_a , която създава момента, A (изчислява се от заданието за момент от регулатора на скорост)
(параметри r0029 и r0030 се използват в режим на векторно управление.) В режим на управление по V/f характеристика се използват параметри r0085 и r0086:	
r0085	реактивна компонента на тока I_R , A
r0086	активна компонента на тока I_A , A
r0031	електромагнитен момент на двигателя M , Nm (различава се от момента на вала, тъй като не отчита триенето)
r0032	мощност P на двигателя, kW – изчислява се съобразно скоростта r0024 и момента r0031: $P_{mech} = 2\pi \cdot f \cdot M$
r0038	фактор на мощността $\cos\varphi_1$

За плавна промяна на натоварването се използва стабилизирани токоизправител (регулира се възбуждането на генератора) или се променя съпротивлението на товара чрез плъзгачите на реостатите.

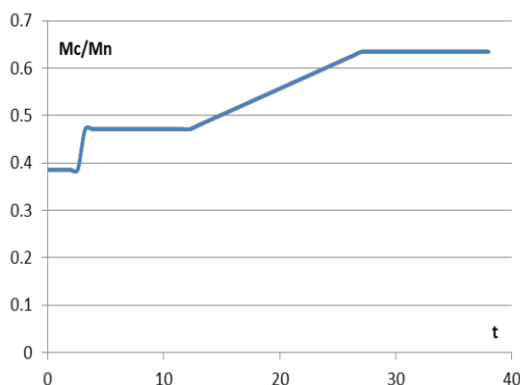
Статичният момент е съставен от две компоненти [1]: момент от триене в механичната система $M_{тр}$ и момент, създаван от генератора M_g :

$$(2) \quad M_g = \frac{P_g}{\omega_g} = \frac{30.U_g.I_g}{\pi.n_g} = \frac{30.i.U_g.I_g}{\pi.n_{ром}} \text{ където:}$$

$$(3) \quad i = \frac{n_{ром}}{n_g}$$

е предавателното отношение на ремъчната предавка, а P_g, U_g и I_g са мощността, напрежението и токът във веригата на генератора.

Моментът $M_{тр}$ може да се определи от тарировъчната крива на задвижването.



Фиг. 2. Изменение на статичния момент по време на изпитанията

За реализирането на поставената цел е необходимо изпълнението на следните задачи:

- *Настройка на основните възли на симулатора:* зареждане на съответните управляващи програми в PLC и TP177-micro; избор на канал за задаване на честотата (от PLC); настройка на честотния преобразувател (чрез Starter) и на подпрограмата Trace.

- *Снемане на динамичните характеристики при промяна на натоварването* (изследването се извършва два пъти при различен тип управление на АД и се попълват две таблици: при управление по линейна V/f-характеристика и при векторно управление).

- *Изчертаване на графиките на изменение на параметрите в обща координатна система за двете изследвания.*

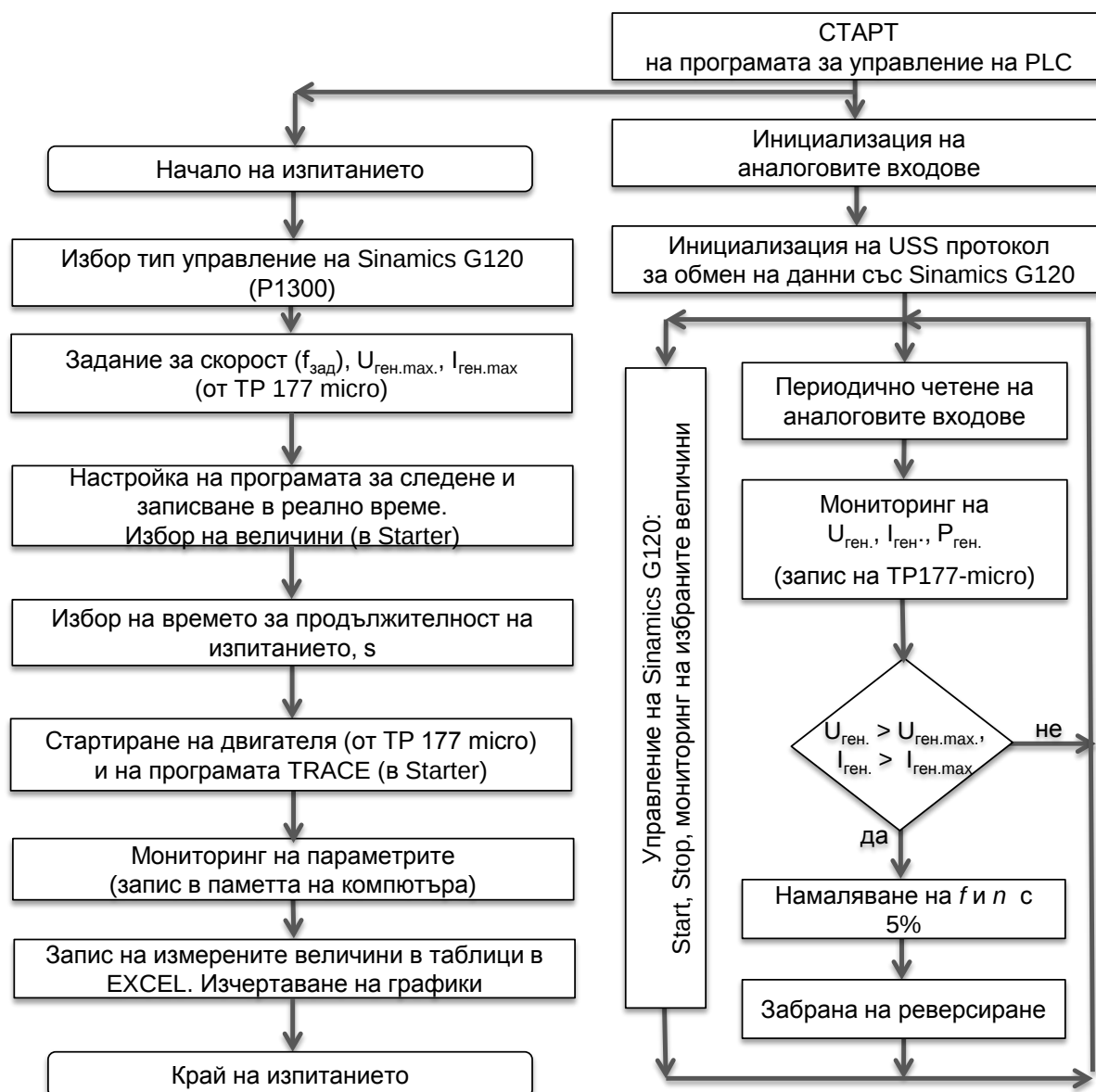
- *Сравнителен анализ на получените резултати:* определят се параметрите на преходния процес при промяна на натоварването, както и енергийните показатели.

- *Оценка на предимствата на векторното управление.*

Изпитанията се провеждат в съответствие с алгоритъма, показан на фиг. 3.

В STEP 7-Micro/Win е разработена програма за Simatic S7-200, чрез която се реализира USS-протокол за обмен на данни с честотния преобразувател и се създава възможност за управлението му от панела TP-177 micro. Същевременно се извършва мониторинг на аналоговите входове: следят се напрежението и тока на СГ и не се допуска претоварване (при превишаване се намалява скоростта).

Чрез WinCC-flexible е разработена програма за настройка на TP-177 micro,



Фиг. 3. Алгоритъм за провеждане на изпитанията

осигуряваща управлението на честотния преобразувател, визуализация на параметрите му (f , I , U , M , P , $\cos\phi$, n) и мониторинг на веригата на СГ (U , I , P).

При настройката на програмата TRACE се задава броят на следените величини и последователно се въвеждат техните кодове съобразно табл. 1. Задава се продължителността на изпитанието.

Стартира се задвижването и се изчаква достигането на зададената скорост. Поставя се началото на мониторинга: параметрите се записват в паметта на компютъра и се извеждат на информационния панел. След изтичане на зададената продължителност данните се изпращат в EXCEL, като се подреждат в таблица. Създадена е възможност за автоматично изчертаване на графиките.

След приключване на всички изследвания кривите на даден параметър при различните изпитания се обединяват в обща координатна система (фиг. 4). По този начин се създават предпоставки за точен сравнителен анализ, при който се определят показателите на преходния процес с цел оценка на качеството:

- установено отклонение (грешка) ϵ спрямо зададената стойност;
- пререгулиране σ (определя максималното превишение на величината над зададената стойност, изразено в проценти):

$$(4) \quad \sigma = \frac{y_m - y_{зад}}{y_{зад}} \cdot 100, \%$$

- времетраене на преходния процес, брой и честота на колебанията и др.

4. Заключение

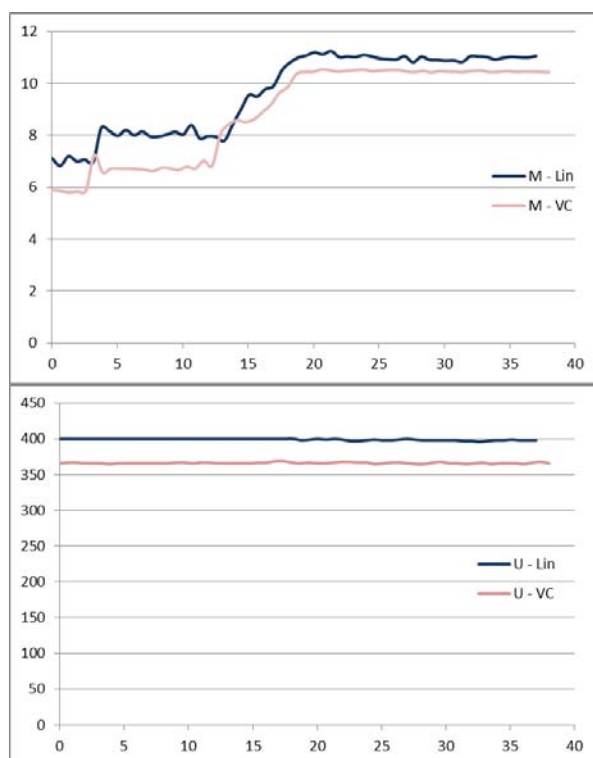
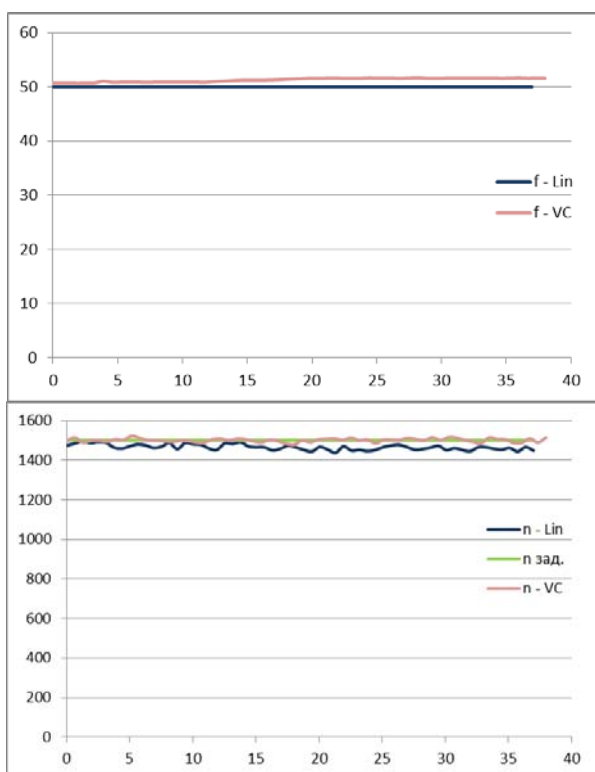
Разглежданият симулатор е използван от преподаватели, докторанти и студенти за обучение и научноизследователска дейност в областта на асинхронни електрозадвижвания с честотно управление.

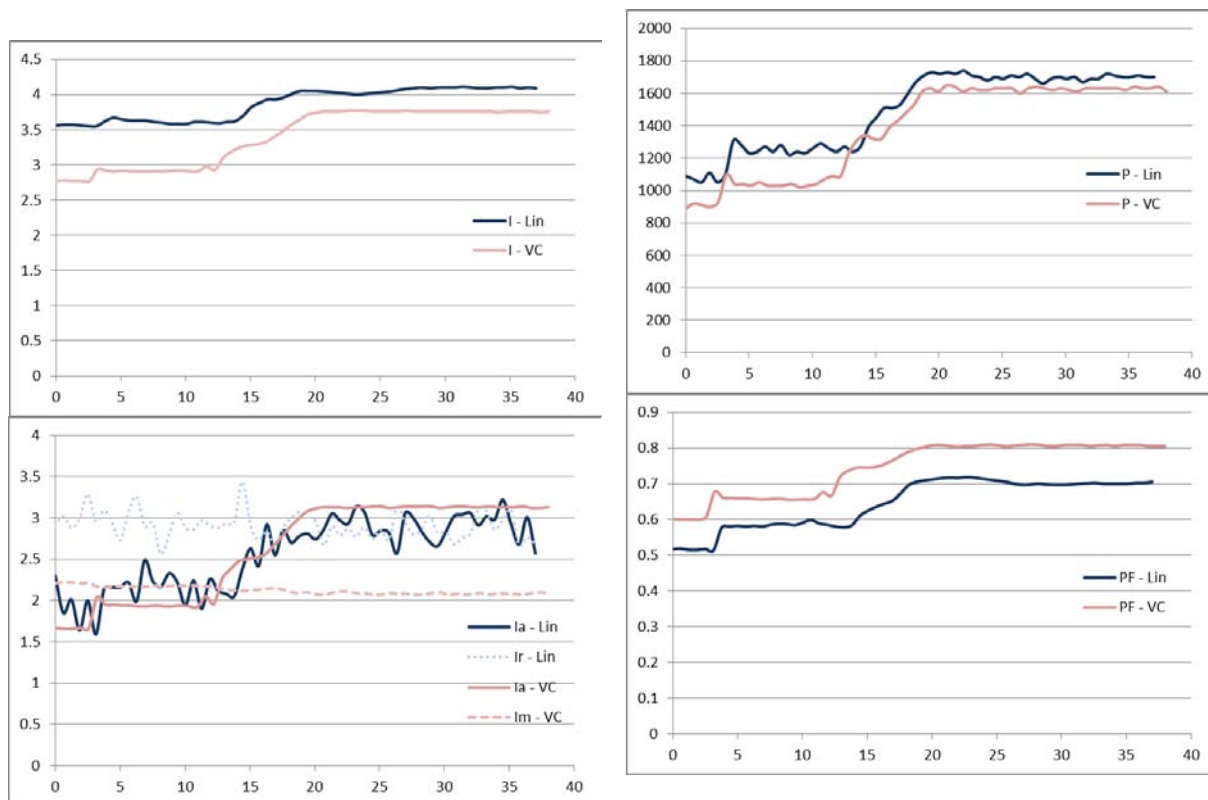
Проведените изследвания ясно онагледяват динамиката на задвижването при промяна на съпротивителния момент в сравнително широки граници. Анализът показва, че при увеличаване на товара нарастват активният ток, моментът и мощността, докато напрежението и намагнитващият ток остават почти постоянни. Резонно се увеличава и $\cos\phi$.

Векторното управление постига стабилизирана скорост независимо от натоварването: пререгулирането $\sigma \leq 1,5\%$, а времето за реакция не превишава 0,6s. Това се получава чрез непрекъсната актуализация на изходната честота. При управлението по V/f характеристика изходната честота е винаги равна на зададената и при увеличаване на натоварването скоростта намалява, като грешката е достига 4%.

При векторното управление моментът се постига при много по-ниски стойности на тока и напрежението в сравнение с управлението по V/f характеристика: това води до по-добри енергийни показатели. Той е със значително намалени пулсации, което при ЕТС гарантира плавност и комфорт на движението.

Експерименталната верификация доказва теоретичните предимства на векторното управление при електрозадвижвания с променливо натоварване. Поддържат се стабилна скорост и добри стойности на енергийните показатели в широк диапазон на изменение на товара. Но при механизми с известен съпротивителен момент и правилно избран закон за честотно регулиране достатъчно добри показатели могат да се получат и чрез управлението по V/f характеристика.





Фиг. 4. Динамични характеристики при промяна на натоварването

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвигване, София, 2009
- [2] SINAMICS G120 – *Function Manual*, Siemens, 2007
- [3] SINAMICS G120 – Control Unit CU240E, *Parameter Manual*, Siemens, 2008