

# ФОРМАЛИЗИРАНО МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА СТРУКТУРАТА И ТОВАРИТЕ НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА

Николай Матанов, Снежана Димитрова

*Резюме:* В доклада е представено математическото описание на модел на електроснабдителна мрежа. За описание на структурата и товарите на конкретна електроснабдителна система (мрежа) се използват уравненията на състоянието. Задачата описана в доклада е подчинена на по-голяма цел, а именно изграждане на централизирано управление на компенсиращите реактивни мощности в рамките на електроснабдителна система на предприятие, като начин за повишаване електроенергийната ефективност.  
*Ключови думи:* уравнение на състоянието, Matlab, модел на електроснабдителна система

## FORMALIZED MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE POWER SYSTEM STRUCTURE AND LOADS

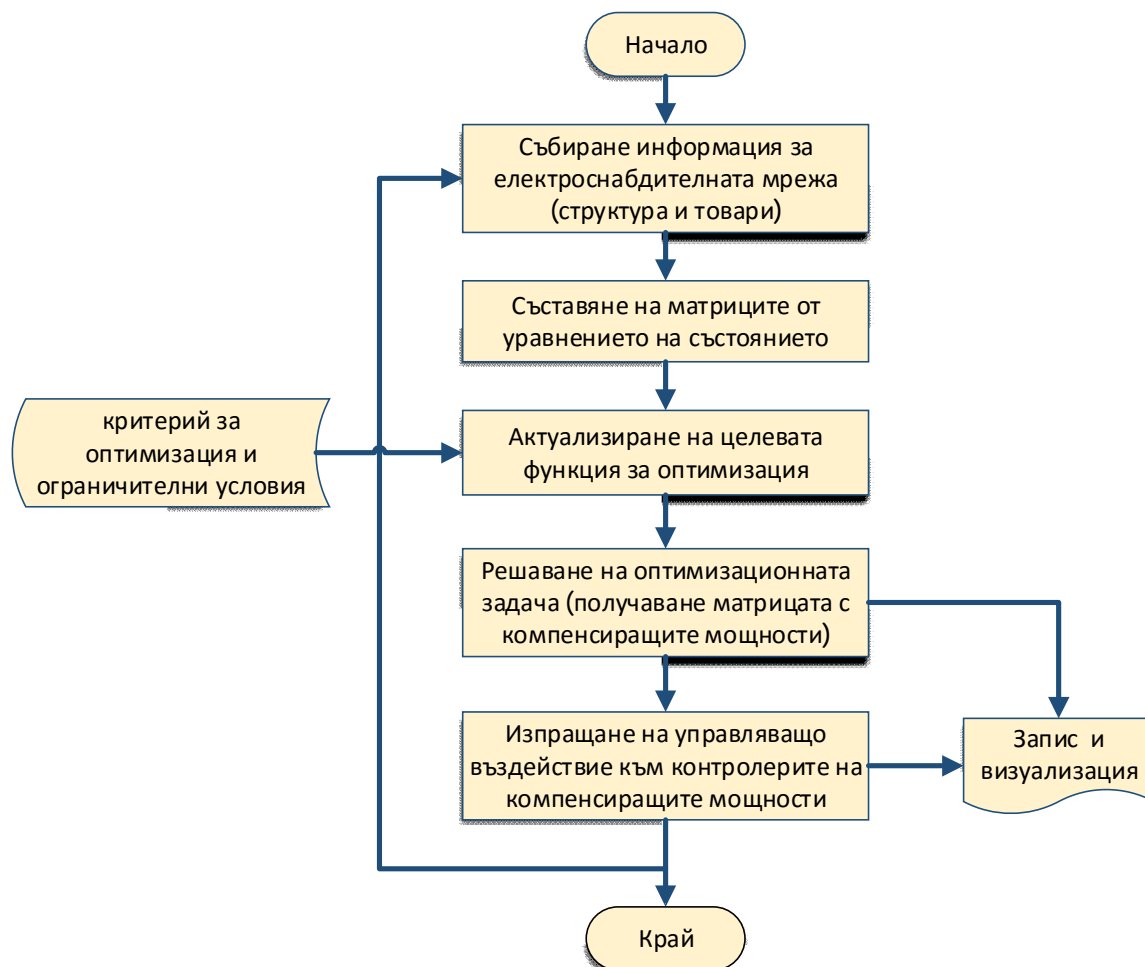
Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova

*Abstract:* The paper presents a mathematical description of the model of power supply system. To description the structure and loads in a specific power supply system (network) by using the state-space equations. The task described in this report is subject to a greater purpose, in particular establishment of centralized management of compensating reactive power in the power supply system of the enterprise as a way to increase the power efficiency.  
*Keywords:* state-space equations, Matlab, power system model

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Режимът на реактивните товари в електроснабдителните системи на стопанските обекти определя качеството на електрическата енергия (отклонението на напрежението), загубите на мощност в отделните елементи на електроснабдителната система, разходите за заплащане на електрическата енергия. От тази гледна точка компенсирането на реактивните товари е основна задача при проектирането и експлоатацията на електроснабдителните системи. С навлизането на интелигентните електроснабдителни системи, изброените по горе проблеми трябва да могат да се решават автоматично. За целта трябва да има разработени алгоритми за оптимизация и управление и методики за прилагането им.

Начина на реализиране на интелигентни функции на електроенергийна мрежа (ЕСМ) по отношение на управлението на реактивните мощности е изграждане на централизирана система за контрол [1]. Функциите на една такава управляваща система по-подробно са дадени в [2], но може да се каже, че за реализирането на управление на компенсиращите мощности в един сложен обект е необходимо да се изгради система за събиране и анализ на информация, да се разработи софтуер за решаване на оптимизационна задача за управляващото въздействие. На фиг.1. е представен принципен алгоритъм за централизирано управление на реактивните мощности.



**Фиг.1** Принципен алгоритъм на работа при централизирано управление на реактивните мощности

Реализирането на желания фактор на мощност се постига с компенсиращи устройства като кондензаторни батерии и/или синхронни двигатели и др. При сложни йерархични електроенергийни системи повишаване ефективността на използваните компенсиращи устройства може да се постигне чрез оптимизиране на структурата, разпределението и управлението на общата компенсираща мощност на дадения стопански обект [3]. До сега оптимизационните задачи свързани с компенсирането на реактивните товари се решават при установени режими на работа на електрическите товари. В действителност случайният характер на електрическите товари и регулирането

на компенсиращите мощности води до оптимизация при непълна информация. Целта е да се оптимизира режимът и структурата на компенсиращите устройства при отчитане на динамичният характер на електрическите товари.

За да се постигне целта на проекта е нужно да се отчитат фактори като: структурата на ЕСМ; параметрите на елементите на ЕСМ; конструктивното изпълнение на кондензаторните батерии; натоварването на синхронните двигатели; качеството на напрежението; вероятностния характер на товарите; управлението на компенсиращите устройства; финансовите условия, при които се извършват различни разходи и др.

Тъй като идеята заложена в централизираното управление е да се решава оптимизационна задача свързана с минимизиране загубите на активна мощност предизвикани от преноса на реактивна мощност, трябва да се разполага с математическо описание на параметрите на обектите за управление, в случая електроснабдителната система. От тук произлиза и задачата представена в този доклад - математическо описание на структурата и товарите на електроснабдителна система (мрежа).

## 2. СЪСТАВЯНЕ НА МАТРИЦИТЕ ОТ УРАВНЕНИЯТА НА СИСТОЯНИЕТО

За описание на структурата и натоварването на ЕСМ ще се използват уравненията на състоянието [4]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + Bf(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Df(t) \quad (2)$$

където

$\frac{dx(t)}{dt}$  е векторът на търсените  $i_L(t)$  и  $u_c(t)$ ;

$x(t)$  е векторът на състоянието;

$y(t)$  е векторът на изходните величини;

$f(t)$  е векторът на захранващите източници;

[A], [B], [C], [D] са матрици, които имат реални коефициенти, определени за конкретната схема.

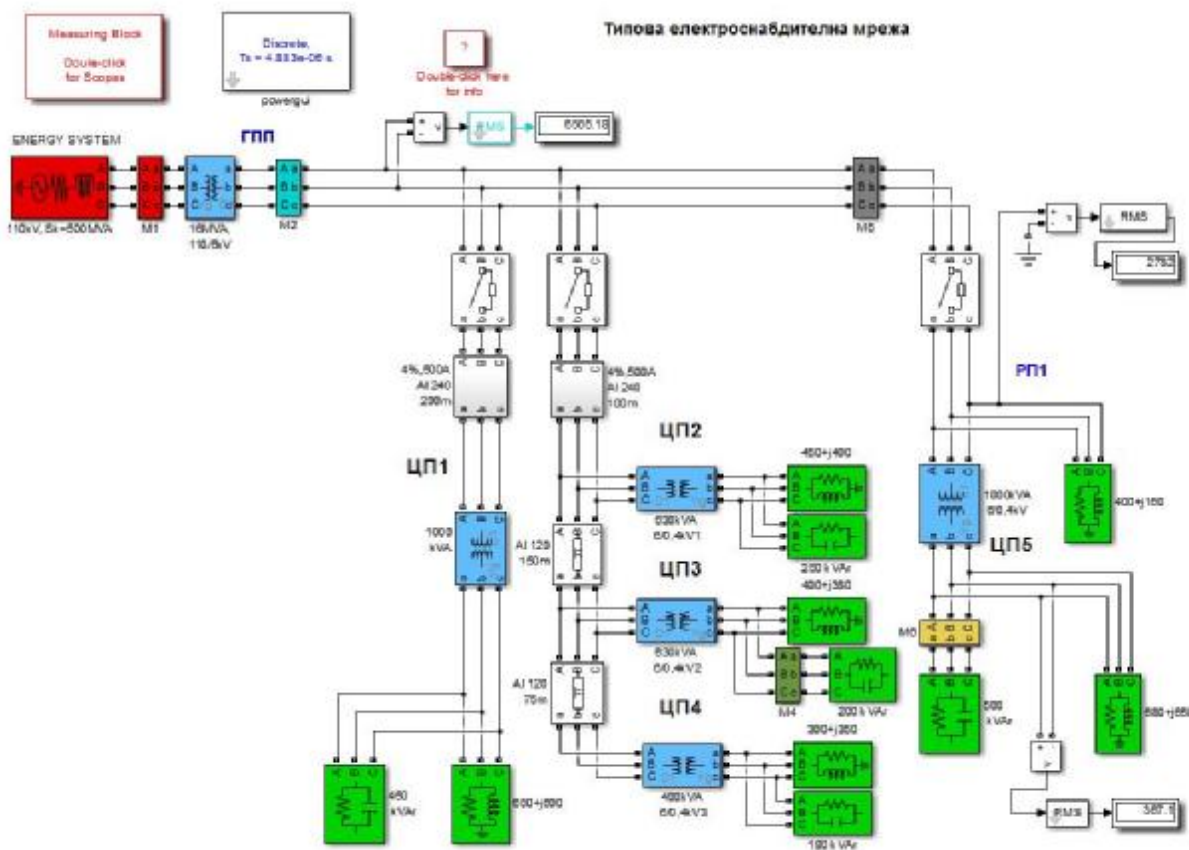
За дадена схема началните условия са дадени чрез векторът на състоянието  $x(t)$  и векторът на захранващите токове и напрежения. От решаване на уравнение (1) се определят токовете и напреженията върху реактивните елементи в началния момент. От уравнението (2) се получават токовете и напреженията на всички неактивни елементи.

Както е дадено в [2] при проектирането и съставянето на прототип на централизирана система за управление на реактивните мощности ще се използва модел на ЕСМ разработен в средата на MATLAB/ Simulink.

От тази гледна точка на този етап, матриците от уравненията на състоянието ще се „извличат“ от средата на MATLAB. При следващият етап, при работеща „централна станция“, събираща информацията от комутационната, измервателната и управляващата апаратура в реална мрежа, тя („централната станция“) ще „генерира“ тези матрици на базата на получената в реално време информация.

За да се получат матриците от уравненията на състоянието е необходима следната входна информация:

- *rlc* – матрица, характеризираща R, L, C параметрите на всеки един клон на схемата (без параметрите на кабелните линии);
- *switches* – матрица, описваща състоянието на прекъсвачите в схемата;
- *source* – матрица, даваща параметрите на източниците на напрежение и ток в схемата;
- *line\_dist* – матрица с параметрите на кабелните (въздушните) линии.



Фиг.2. Модел на електроснабдителна мрежа

При изграден модел в Simulink тази входна информация вече е въведена, чрез параметрите на всеки един елемент участващ в схемата [2], т.е. могат да се генерират матриците [A], [B], [C], [D] от (1) и (2).

Матриците ще имат следните размерности:

A (nstates, nstates), B (nstates, ninput),

C (noutput, nstates), D (noutput, ninput),

където

$nstates$  - е броят на променливите на състоянието;

$ninput$  - е броят на входовете;

$noutput$  - е броят на изходите.

Нека разгледаме модел на примерна ЕСМ - фиг.2, със следните параметри на съставните елементи:

Таблица 1. Параметри на елементите на модела от фиг.2

№	Елемент от модела	Параметри
1	Захранващ източник	$U_H=110kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_{kc}=500MVA$ ; $X/R=7$
2	Трансформатор в ГПП	$U_H=110kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=6,3MVA$ ; $YNd$ ; $dP_{ix}=10,4kW$ ; $dP_k=42kW$ ; $u_k=10,5\%$ ; $I_0=1,75\%$
3	Трансформатор в ЦП1	$U_H=6/0,4kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=1000kVA$ ; $Dyn$ ; $dP_{ix}=1,1kW$ ; $dP_k=5kW$ ; $u_k=6\%$ ; $I_0=1,6\%$
4	Трансформатор в ЦП2	$U_H=6/0,4kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=630kVA$ ; $Dyn$ ; $dP_{ix}=1,58kW$ ; $dP_k=7,2kW$ ; $u_k=5\%$ ; $I_0=1,8\%$
5	Трансформатор в ЦП3	$U_H=6/0,4kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=630kVA$ ; $Dyn$ ; $dP_{ix}=1,58kW$ ; $dP_k=7,2kW$ ; $u_k=5\%$ ; $I_0=1,8\%$
6	Трансформатор в ЦП4	$U_H=6/0,4kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=400kVA$ ; $Dyn$ ; $dP_{ix}=1,58kW$ ; $dP_k=7,2kW$ ; $u_k=6\%$ ; $I_0=1,4\%$
7	Трансформатор в ЦП5	$U_H=6/0,4kV$ ; $f=50Hz$ ; $S_H=1000kVA$ ; $Dyn$ ; $dP_{ix}=1,1kW$ ; $dP_k=5kW$ ; $u_k=6\%$ ; $I_0=1,6\%$
8	Товари на ЦП1	$S_1 = 650 + j600kVA$
9	Товари на ЦП2	$S_2 = 450 + j400kVA$
10	Товари на ЦП3	$S_2 = 400 + j380kVA$
11	Товари на ЦП4	$S_2 = 300 + j350kVA$
12	Товари на ЦП5	$S_2 = 680 + j650kVA$
13	Кондензаторни батерии в ЦП1	$Q_{k1} = 450kVAr$
14	Кондензаторни батерии в ЦП2	$Q_{k2} = 250kVAr$
15	Кондензаторни батерии в ЦП3	$Q_{k3} = 200kVAr$
16	Кондензаторни батерии в ЦП4	$Q_{k4} = 180kVAr$
17	Кондензаторни батерии в ЦП5	$Q_{k5} = 500kVAr$
18	Кабелни линии ГПП-ЦП1	$Al, 240mm^2, 200m$
19	Кабелни линии ГПП-ЦП2	$Al, 240, 100$
20	Кабелни линии ЦП2-ЦП3	$Al, 120mm^2, 150m$
21	Кабелни линии ЦП3-ЦП5	$Al, 120mm^2, 75m$
22	Кабелни линии ГПП-РП1	$Al, 240mm^2, 175m$

За представеният модел на фиг.2 с дадените параметри в табл.1 матриците на уравнението на състоянието се получават със следните размерности:

$$A = [126 \times 126];$$

$$C = [42 \times 126];$$

$$x = [126 \times 1];$$

$$B = [126 \times 12];$$

$$D = [42 \times 12];$$

$$f = [12 \times 1].$$

126x1 complex double		42x1 complex double	
	1		1
1	0.0047 - 0.0027i	1	4.6547e+03 - 2.7263e+03i
2	-0.0047 - 0.0027i	2	-4.6884e+03 - 2.6679e+03i
3	0.0000 + 0.0054i	3	3.3710e+01 + 5.3943e+03i
4	0.0047 - 0.0027i	4	4.6548e+03 - 2.7264e+03i
5	-0.0047 - 0.0027i	5	-4.6886e+03 - 2.6680e+03i
6	0.0000 + 0.0054i	6	3.3717e+01 + 5.3944e+03i
7	-0.0065 + 0.0155i	7	4.6548e+03 - 2.7264e+03i
8	-0.0102 - 0.0134i	8	-4.6885e+03 - 2.6680e+03i
9	0.0104 + 0.0135i	9	3.3700e+01 + 5.3944e+03i
10	0.0065 - 0.0157i	10	0.0136 + 0.0131i
11	0.0106 + 0.0134i	11	-0.0531 + 0.1611i
12	0.0063 - 0.0159i	12	9.3437e+03 - 5.8277e+01i
13	0.0083 - 0.0196i	13	0.0106 + 0.0026i
14	-0.0211 + 0.0027i	14	-0.0031 - 0.0105i
15	0.0129 + 0.0170i	15	-0.0075 + 0.0079i
16	-1.5366e-04 - 7.3789e-04i	16	4.6550e+03 - 2.7264e+03i
17	-5.6221e-04 + 5.0202e-04i	17	-4.6886e+03 - 2.6681e+03i
18	7.1586e-04 + 2.3588e-04i	18	3.3646e+01 + 5.3946e+03i
19	0.0089 - 0.0216i	19	0.0091 + 0.0037i
20	-0.0231 + 0.0031i	20	-0.0013 - 0.0097i
21	0.0143 + 0.0185i	21	-0.0078 + 0.0060i
22	0.0251 + 0.0198i	22	4.6550e+03 - 2.7264e+03i
23	0.0046 - 0.0316i	23	-4.6886e+03 - 2.6681e+03i
24	0.0092 - 0.0229i	24	3.3646e+01 + 5.3946e+03i
25	-0.0244 + 0.0035i	25	1.4157e+05 + 8.1290e+04i

**Фиг.3.** Стойности на векторите  $dx/dt$  и  $y$  от уравнения (1) и (2)

Всички имат реални стойности, освен векторът  $[f]$ , чиито стойности са комплексни. Резултатите за вектора на състоянието, токовете през индуктивностите и напреженията на капацитетите имат следните размерности  $dx/dt = [126 \times 1]$ , като са комплексни величини. Векторът с изходните напрежение и токове ще е  $y = [42 \times 1]$  - комплексни стойности.

Поради големите размерности на масивите, представянето на всички резултати тук не е дадено. Част от резултатите за  $dx/dt$  и  $y$  са дадени на фиг.3.

При този подход трябва да се обърне внимание на едно ограничение, а именно, че наличието на нелинейни елементи в схемата (например, наличието на електронни преобразуватели като токоизправители, инвертори др.) няма да са описани в матриците на уравненията на състоянието.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С промяна на параметрите на матрицата на състоянията може да отчитаме структурата на схемата и динамиката на товарите. Чрез използване матриците от уравненията на състоянието може да се състави алгоритъм и програма за оптимизация на разпределението на компенсиращите реактивни мощности в сложни електроснабдителни системи.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите, от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на НИС при ТУ-София 2015г., научен проект в помощ на докторанта „**Централизирано управление на компенсациите реактивни мощности в интелигентни електроснабдителни системи**”, договор № 151ПД0030-01/2015

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] El-Samahy I., K. Bhattacharya, C. A. Cañizares. *A Unified Framework for Reactive Power Management in Deregulated Electricity*. Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES Atlanta, 2006.
- [2] Матанов Н., С. Димитрова. *Модел на електроснабдителна система с променлива структура и електрически товари*. ЕФ-2015, Созопол 19-21 септември, 2015.
- [3] Matanov N. *Optimization of the structure and the distribution of the reactive power compensation in the industrial electrical supply systems*. E+E Vol.49 No.3-4/2014 pp.27-33.
- [4] Черных И. В. *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink*. Москва, ДМК Пресс, 2007.

**Автори:** Николай Стефанов Матанов, д-р инж. - доцент в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ЕСЕОЕТ), email: [nsm@tu-sofia.bg](mailto:nsm@tu-sofia.bg); ас. инж. Снежана Асенова Димитрова, докторант в катедра ЕСЕОЕТ, email: [s.dimitrova@tu-sofia.bg](mailto:s.dimitrova@tu-sofia.bg).

**Постъпила** на 15.12.2015г.

**Рецензент:** доц. д-р Симона Петракиева