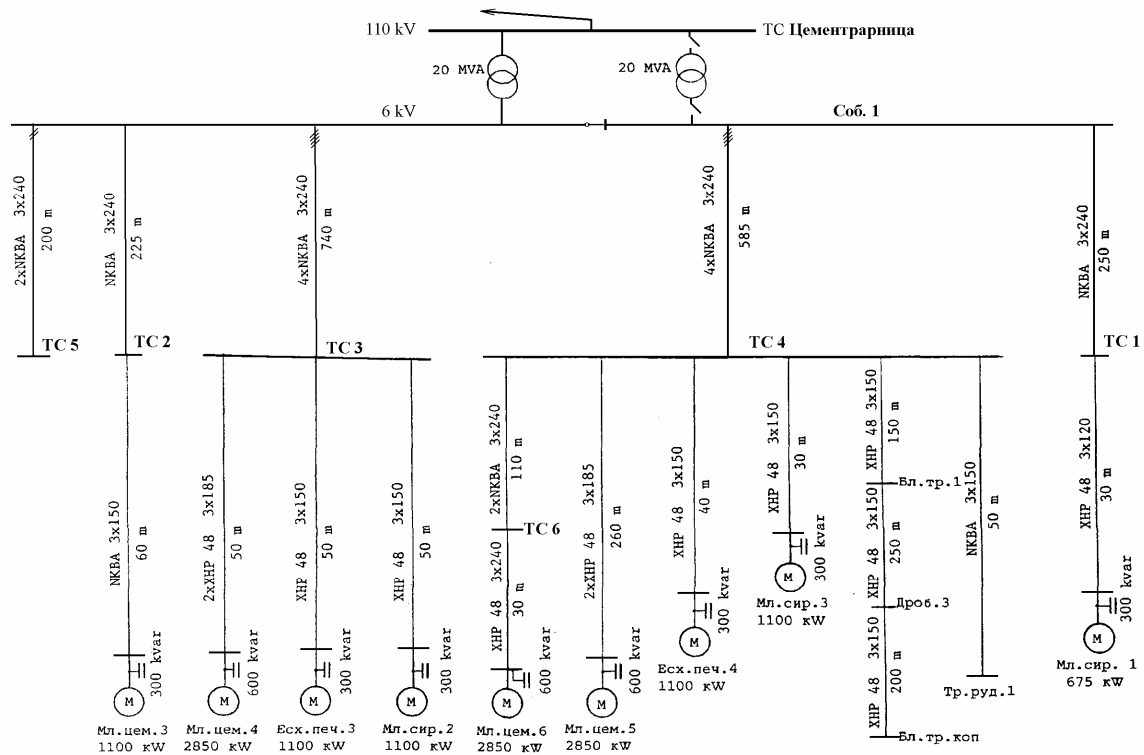


## Пресметка на напонски јами (voltage sags) при стартување на големи асинхрони мотори

### Решен пример



Слика 1. 6 kV напојна мрежа на Цементарницата „ТИТАН“ (УСЈЕ)

На сликата 1 е прикажана 6 kV напојна мрежа на Цементарница ТИТАН („УСЈЕ“). 110 kV собирници на ТС 110/6 kV/kV „Цементарница“ се напојуваат, преку еден 110 kV надземен вод, долг  $L = 1,8$  km, од ТС Скопје 2. Самата напојна мрежа 6 kV се напојува преку еден трансформатор 110/6 kV/kV и работи во режим на празен од така што може да се смета дека напоните во СН мрежа се насекаде еднакви на номиналниот, т.е.  $U = U_n = 6$  kV. Во еден момент доаѓа до директно впуштање во работа на асинхрониот мотор бр. 1. **Мл. цем. 3**

Да се пресметаат големините на напонските јами кај преостанатите мотори што се јавуваат при стартувањето на асинхрониот мотор бр. 1, за следните два случаја:

- Во погон е само едниот трансформатор ВН/СН;
- Обата трансформатора ВН/СН работат во паралела.

Може да се смета дека струјата на впуштање на моторот на почетокот на процесот на впуштање е чисто реактивна ( $\cos \varphi_{\text{впуштање}} = 0$ ), што претставува најнеповолен случај. Коефициентот на впуштање, т.е. односот  $k_p = I_p/I_n$  на струјата на пуштање и номиналната струја за моторот, како и преостанатите неопходни податоци за асинхроните мотори се прикажани во следната табела (Т1).

**Табела Т1. Податоци за асинхроните мотори во 6 kV мрежа на Цементарница “УСЈЕ”**

реден број	Асинхрон мотор	Номинална моќност (kW)	Номинална струја $I_n$ (A)	Ном. број на вртежи (1/min)	$k_p = I_p/I_n$	Суптранзиентна врем. константа $T''_d$ (ms)
<i>/1/</i>	<i>/2/</i>	<i>/3/</i>	<i>/4/</i>	<i>/5/</i>	<i>/6/</i>	<i>/7/</i>
1	Мл. цем. 3	3000	338	990	5,0	72

**Останати податоци:**

**Моќност на трифазна куса врска** на собирниците „Скопје 2“ за суптранзиентен период:  $S''_{k3} = 5000 \text{ MVA}$  ;

**Параметри на 110 kV вод помеѓу ТС „Скопје 2“ и ТС „Цементарница“**

Спроводници: Al/Fe 150/25 mm<sup>2</sup>; Должина:  $L = 1,8 \text{ km}$

Подолжни параметри:  $\underline{z} = (r+jx) = (0,194 + j0,41) \Omega/\text{km}$

**Енергетски трансформатори 110/6 kV/kV:**

Номинална моќност:  $S_{nT} = 20 \text{ MVA}$

Преносен однос:  $U_{1n}/U_{2n} = (110 \pm 10 \times 1,5\%)/6,3 \text{ kV/kV}$

Напон на куса врска:  $u_k\% = 11,3\%$ ; Спрега: Yd5; однос  $X_T/R_T = 20$ .

**Енергетски кабли:**

Тип IPO 13 (NKBA): изолација од хартија (IP) спроводници од бакар; реактанција по km должина:  $x_{k1} = 0,08 \Omega/\text{km}$

тип ХНР48: изолација од вмрежен полиетилен (XLPE); спроводници од бакар;  $x = 0,09 \Omega/\text{km}$ .

Останатите параметри на кабелските водови во мрежата 6 kV (должини во m, број паралелни кабли и номинален пресек во mm<sup>2</sup>) се дадени на самата слика.

**Асинхрон мотор бр. 1 Мл. цем. 3:**

Номинална моќност:  $S_{n.M} = 3000 \text{ kW}$ ;

Номинален напон:  $U_{n.M} = 6 \text{ kV}$ ;

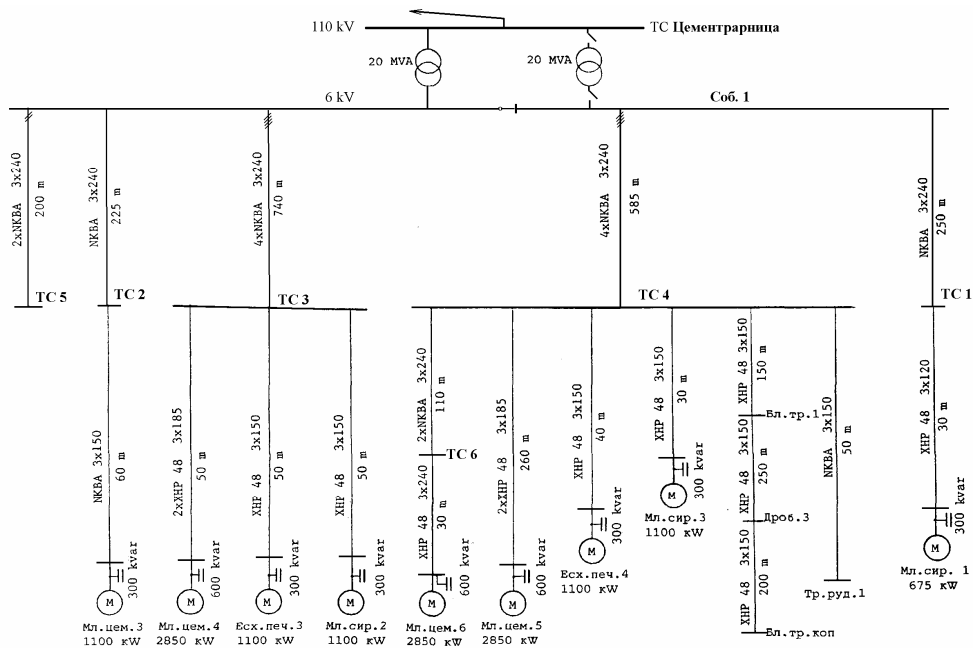
Номинална струја:  $I_{n.M} = 338 \text{ A}$ ;

Номинален број на вртежи:  $n_{n.M} = 990 \text{ min}^{-1}$ ;

Коефициент на впуштање:  $k_p = I_p/I_n = 5$ ;

Струјата на впуштање на моторот на почетокот на процесот на впуштање е чисто реактивна, т.е.  $\cos \varphi_{\text{впуштање}} = 0$ .

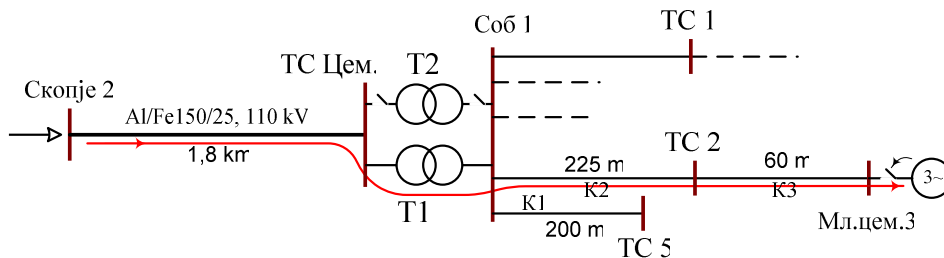
### Решение:



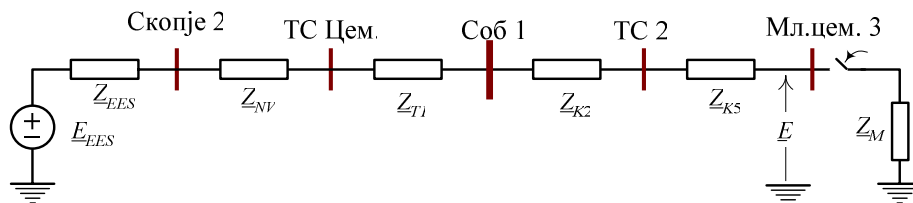
Слика 1а. 6 kV напојна мрежа на Цементарницата „ТИТАН“ (УСЈЕ)

*А) Во погон е само едниот трансформатор ВН/СН*

Задачата ќе ја решиме само за случајот а) кога работи само еден трансформатор 110/6 kV/kV.



Слика 2. Еднополна заменска шема на целиот систем



Слика 3. 6 kV напојна мрежа на Цементарницата „ТИТАН“ (УСЈЕ)

Ваквите проблеми се решаваат наједноставно со директна примена на Тевененовата (*Thevenin*) теорема. Според оваа теорема ако во едно линеарно активно коло помеѓу два негови јазла  $p$  и  $q$  владее напон  $\underline{E} = \underline{U}_p - \underline{U}_q$ , и ако помеѓу нив приклучиме една импеданција  $\underline{Z}_M$  тогаш низ неа ќе протече струја  $\underline{I}_M$  чијашто вредност може да се пресмета со помош на следната релација:

$$\underline{I}_M = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{ek} + \underline{Z}_M}, \quad (1)$$

додека напонот на местото на приклучување ќе се промени од вредноста  $\underline{E}$  на вредноста:

$$\underline{U}_M = \underline{E} - \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{I}_M = \underline{E} \cdot \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_{ek} + \underline{Z}_M}, \quad (2)$$

Во релациите (1) и (2) со  $\underline{Z}_{ek}$  е означена еквивалентната (влезната) импеданција на мрежата помеѓу јазлите p и q.

Во нашиот случај мрежата на којашто ќе ја применуваме Тевененовата теорема е прикажана на сликата 2, односно 3. Јазелот p ќе биде местото каде што се вклучува големиот асинхрон мотор додека јазелот q ќе биде референтниот јазол, т.е. земјата. Ќе претпоставиме дека напонот помеѓу овие два јазла пред приклучувањето на моторот бил еднаков на номиналниот фазен напон (т.е.  $E = U_f = U_n / \sqrt{3}$ ). Бидејќи набљудуваната мрежа е радијална (т.е. не содржи ниту една контура) влезната импеданција на мрежата ќе ја пресметаме наједноставно собирајќи ги импеданциите на сите елементи на коишто ќе најдеме тргнувајќи од местото на приклучување на моторот до напојниот јазол во системот (т.е. ТС Скопје 2), т.е. (слика 3):

$$\underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{K5} + \underline{Z}_{K2} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{NV} + \underline{Z}_{EES}. \quad (3)$$

Од релацијата (1) се гледа дека после приклучувањето на моторот (потрошувачот) напонот на местото на приклучувањето ќе падне за вредност  $\underline{Z}_{ek} \cdot \underline{I}_M$ . На тој начин ќе дојде до појава на тнар. „напонски пропад“ (voltage sag). Но напонски пропад ќе се јави и во останатите јазли од мрежата, само што таму вредноста на напонскиот пропад ќе биде помала и ќе изнесува:  $\underline{Z}_m \cdot \underline{I}_M$ . Во последниот израз со  $\underline{Z}_m$  е означена меѓусебната импеданција помеѓу јазелот каде што се приклучува моторот (потрошувачот) и набљудуваниот јазол. Така, на пример, ако моторот се вклучува на собирницата „Мл.цсм. 3“ (слика 2, 3) и сакаме да го пресметаме напонскиот пропад во јазолот „ТС 2“ ќе имаме:

$$\underline{Z}_{m.TS2} = \underline{Z}_{K2} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{NV} + \underline{Z}_{EES}. \quad (4)$$

додека меѓусебната импеданција помеѓу јазолот „Мл.цсм. 3“ и „Соб. 1“ ќе биде:

$$\underline{Z}_{m.Sob.1} = \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{NV} + \underline{Z}_{EES}. \quad (5)$$

Меѓусебната импеданција  $\underline{Z}_m$  помеѓу собирницата „Мл.цсм. 3“ и сите останати јазли од набљудуваната мрежа ќе биде иста и еднаква на:

$$\underline{Z}_m = \underline{Z}_{m.Sob.1} \equiv \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{NV} + \underline{Z}_{EES}. \quad (6)$$

Врз основа на шемата на посматраната мрежа и врз основа на останатите податоци можеме да ја нацртаме еднополната шема од сликата 2 како и заменската шема од сликата 3, нопходни за решавање на проблемот. Притоа е очигледно дека за пресметка на напоните на одделните собирници за време на впуштањето на моторот бр.1 Мл. цсм.3 е доволно да се познаваат импеданциите на следните елементи:

1. ЕЕС на Р. М. гледан преку неговата влезна (еквивалентна) импеданција, т.е. реактанција  $\underline{Z}_{EES} \approx jX_{EES}$
2. Надземниот вод 110 kV помеѓу ТС Скопје 2 и ТС 110/6 Цементарница  $\underline{Z}_{NV}$ ;
3. Трансформаторот Т1 во ТС 110/6 Цементарница којшто е во погон  $\underline{Z}_{T1}$ ;
4. Кабелот К2, тип НКВА 3x240, долг  $l_{K2} = 225$  m, помеѓу собирниците Соб.1 и ТС 2  $\underline{Z}_{K2}$  и
5. Кабелот К3, тип НКВА 3x150, долг  $l_{K3} = 60$  m, помеѓу собирниците ТС 2 и моротот бр. 1 Мл. цем.3  $\underline{Z}_{K3}$ ;
6. Моторот бр. 1 Мл. цем. 3  $\underline{Z}_M$ .

Низ останатите елементи од 6 kV мрежа не течат никакви струи за време на посматраниот режим (впуштање на моторот бр. 1). Затоа импеданциите на останатите елементи не ни се потребни бидејќи тие не влијаат врз големините на струјата на впуштање на посматраниот мотор ниту, пак, влијаат врз напоните во одделните јазли.

### 1) Пресметка на импеданциите на елементите од мрежата

Импеданцијата, т.е. реактанцијата на трифазна куса врска  $\underline{Z}_{EES} \approx jX_{EES}$  со која, според Тевененовата теорема, се заменува целиот ЕЕС на Р. Македонија посматран од 110 kV собирница во трафостаницата Скопје 2, се добива со помош на струјата  $I''_{k3}$ , односно моќноста  $S''_{k3}$ , на трифазна куса врска за суптранзиентниот период. Моќноста на трифазна куса врска на ЕЕС за суптранзиентен период е еднаква на:

$$S''_{k3} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3} = \frac{U_n^2}{X''_{EES}};$$

Оттука за реактанцијата  $X_{EES}$  на ЕЕС за суптранзиентен период се добива дека изнесува:

$$X''_{EES} = \frac{U_n^2}{S''_{k3}} = \frac{110^2}{5000} = 2,42 \, \Omega$$

Импеданцијата  $\underline{Z}_{NV}$  на 110 kV-ниот далекувод ќе биде:

$$\underline{z} = (r+jx) = (0,194 + j0,41) \, \Omega/\text{km}$$

$$\underline{Z}_{NV} = \underline{z} \cdot L = (0,194 + j0,41) \cdot 1,8 = (0,349 + j0,738) \, \Omega .$$

Реактанцијата на трансформаторот Т1 е еднаква на:

$$X_{T1} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11,3}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 68,365 \, \Omega ,$$

додека неговата активна отпорност, според податоците добиени во задачата, ќе биде:

$$R_{T1} = X_{T1} / 20 \approx Z_{T1} / 20 = 3,418 \, \Omega .$$

Според тоа импеданцијата на трансформаторот Т1 ќе биде:

$$\underline{Z}_{T1} = (3,418 + j68,365) \, \Omega .$$

Вкупната импеданција на делот од мрежата помеѓу ЕЕС и главните 6 kV собирници Соб. 1 во мрежата, сведена на 110 kV ниво,  $Z_1^{(110)}$  ќе биде:

$$\underline{Z}_1^{(110)} = Z_{EES} + \underline{Z}_{NV} + \underline{Z}_{T1} = (4,156 + j71,134) \Omega.$$

Ќе претпоставиме дека трансформаторот Т1 работи со својот номинален преносен однос, т.е.

$$k_{T1} = k_{Tn} = 110/6,3 = 17,46.$$

Во тој случај вкупната импеданција на делот од мрежата помеѓу ЕЕС и главните 6 kV собирници „Соб. 1“ во мрежата, сведена на 6 kV ниво,  $\underline{Z}_1$  ќе биде:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_1^{(110)} / k_{T1}^2 = (4,156 + j71,134) / 17,46^2 = (13,6 + j233,3) \text{ m}\Omega.$$

Импеданциите на каблите К2 и К3 се добиваат на сличен начин како и импеданцијата на надземниот вод, преку подолжните параметри  $\underline{z}$  и должините  $l$  на секој од нив. Притоа имаме:

**Кабел К2:**  $l_2 = 225 \text{ m}$ ;  $r_2 = 1000/54/240 = 0,0772 \Omega/\text{km}$ ;  $x_2 = 0,08 \Omega/\text{km}$ ;  $\underline{Z}_{K2} = \underline{z}_2 \cdot l_2 = (17,37 + j18,0) \text{ m}\Omega$  и

**Кабел К3:**  $l_3 = 60 \text{ m}$ ;  $r_3 = 1000/54/150 = 0,1235 \Omega/\text{km}$ ;  $x_3 = 0,08 \Omega/\text{km}$ ;  $\underline{Z}_{K3} = \underline{z}_3 \cdot l_3 = (7,407 + j4,8) \text{ m}\Omega$ .

Во тој случај вкупната импеданција на делот од мрежата помеѓу главните 6 kV собирници **Соб. 1** на мрежата и собирницата **Мл. цем.3** во којашто е приклучен набљудуваниот асинхрон мотор,  $\underline{Z}_2$  ќе биде:

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{K2} + \underline{Z}_{K3} = (24,777 + j22,8) \text{ m}\Omega.$$

Според податоците во задачата пред впуштањето на моторот системот работел во режим на празен од и дека притоа напоните насекаде во 6 kV мрежа биле еднакви на номиналниот,  $U = U_n = 6 \text{ kV}$ . Значи и напонот при собирниците **Мл. цем. 3**, т.е. напонот на моторот  $U_M$ , пред неговото впуштање, ќе биде:

$$U_M = U_n = 6 \text{ kV}; \quad U_{nf} = U_n / \sqrt{3} = 3,464 \text{ kV}.$$

Во тој случај еквивалентата емс  $E_{EES}$  на системот (слика 2), сведена на 110 kV страна, ќе биде:

$$E_{EES}^{(110)} = U_{Mf} \cdot k_{T1} = (6/\sqrt{3}) \cdot 110/6,3 = 104,762/\sqrt{3} \text{ kV}.,$$

додека истата таа емс, сведена на 6 kV страна, ќе биде:

$$E_{EES} = U_{nf} = 6/\sqrt{3} = 3,464 \text{ kV}.$$

## 2) Пресметка на импеданцијата на асинхронниот мотор бр. 1

Импеданцијата (т.е. приближно реактанцијата) на моторот  $X_M$ , ќе ја пресметаме со помош на неговите номинални податоци и податоците за струјата на впуштање  $I_p$ .

$$Z_M \approx X_M = \frac{U_{nf.M}}{I_p} = \frac{U_{n.M} / \sqrt{3}}{k_p \cdot I_{nf.M}} = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{U_{n.M}^2}{S_{n.M}}.$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

$$S_{n.M} = \sqrt{3} \cdot U_{n.M} \cdot I_{n.M} = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,338 = 3,513 \text{ MVA};$$

$$Z_M \approx X_M = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{U_{n.M}^2}{S_{n.M}} = \frac{6^2}{5 \cdot 3,513} = 2,05 \Omega.$$

Сега можеме да ја пресметаме струјата на впуштање на моторот  $I_M$  на почетокот на процесот на впуштање, а потоа и напоните во поедините собирници во првите моменти од процесот на впуштање.

Во согласност со шемата од сликата 3 ќе имаме:

$$\underline{E}_{EES} = 3,464 \cdot e^{j0^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{I}_M = \frac{\underline{E}_{EES}}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_M)} = \frac{\underline{E}_{EES}}{\Sigma \underline{Z}},$$

$$\begin{aligned} \Sigma \underline{Z} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_M = (13,6 + j233,3) + (24,78 + j22,8) + j2050 \\ &= (38,38 + j2306,1) \text{ m}\Omega. \end{aligned}$$

$$\underline{I}_M = \frac{\underline{E}_{EES}}{\Sigma \underline{Z}} = \frac{3,464 \cdot 10^3}{(38,38 + j2306,1)} = 1,502 \cdot e^{-j89^\circ} \text{ kA} \approx -j1502 \text{ A}.$$

Понатаму, врз основа на шемата од сликата 3 ќе добиеме:

$$\underline{U}_{\text{Мл.ц.м. 3}} = \underline{U}_M = \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_M \cdot \underline{I}_M = (5,332 + j0,089) = 5,333 \cdot e^{j0,95^\circ} \text{ kV}$$

Значи напонот во собирницата „Мл. цем. 3“ со впуштањето на моторот ќе падне од вредноста  $U_M = 6 \text{ kV}$  на вредноста  $U_M = 5,333 \text{ kV}$  или на 88,4% од својата преходна вредност. Од тука произлегува дека напонската јама за собирницата Мл. цем. 3 во овој случај ќе изнесува:

$$(\text{Voltage sag})_{\text{Мл.ц.м. 3}} = 88,4\%.$$

Напонот на главните 6 kV собирници  $U_{\text{Cоб. 1}}$  на почетокот од процесот на впуштање на моторот ќе биде:

$$\underline{U}_{\text{Cоб.1}} = \underline{U}_M + \sqrt{3} \cdot \underline{I}_M \cdot \underline{Z}_2 = \underline{E}_{EES} \cdot \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_M}.$$

Лесно се покажува дека неговата вредност изнесува:

$$U_{\text{Cоб.1}} = 5,394 \text{ kV}$$

или, изразена во проценти:

$$U_{\text{Cоб.1}} = 89,8\%.$$

Од шемата прикажана на сликата 3 е сосема јасно дека напоните во сите преостанати јазли од 6 kV мрежа за време на впуштањето на моторот (освен напонот  $U_M$  на местото на впуштање и напонот  $U_{\text{TC2}}$ ) ќе бидат еднакви на напонот  $U_{\text{Cоб.1}}$ . Значи напонската јама за тие собирници, предизвикана од впуштањето на моторот „Мл.ц.м. 3“ ќе изнесува:

$$\text{Voltage sag} = 89,8\%.$$

