



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Dovydas Ivanauskas**

**SAUSUMOS IR JŪRINĖS VĖJO ELEKTRINIŲ PALYGINIMAS**

Magistro baigiamasis projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**SAUSUMOS IR JŪRINĖS VĖJO ELEKTRINIŲ PALYGINIMAS**

Magistro baigiamasis projektas  
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

**Vadovas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

---

**Recenzentas**

---

---

**Projektą atliko**

Dovydas Ivanauskas  
(2016-05-20)

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Dovydas Ivanauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Sausumos ir jūrinės vėjo elektrinių palyginimas“  
**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 16 m. gegužės 15 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Dovydo Ivanausko, baigiamasis projektas tema „Sausumos ir jūrinės vėjo elektrinių palyginimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

*Ivanauskas, D. Sausumos ir jūrinės vėjo elektrinių palyginimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.*

*Kaunas, 2016. 50 psl.*

## **SANTRAUKA**

Šiame darbe yra aptarta dinaminį stabilumą nagrinėjantys jau atlikti tyrimai. Taip pat čia yra atliktas vėjo elektrinių su dvigubo maitinimo rotoriumi modeliavimas. Modelyje galima sumodeliuoti pasirinktos galios vėjo elektrines, kurios gali maitinti pasirinktos galios vartotojus, kuriems elektros galia yra perduodama pasirinktais elektros tinklais (yra aprašoma elektros perdavimo tinklo įtampa, varža ir kiti parametrai).

Šiame darbe yra pateikti du vėjo elektrinių tipai: sausumos elektrinė, kuri yra prijunga prie skirstomojo tinklo oro linija, ir jūrinė elektrinė, kuri prie skirstomojo tinklo yra prijungta jūriniu kabeliu.

Atlikto modelio pagalba yra nustatoma staigaus vėjo gūσιο, maksimalios apkrovos, avarijos tinkle, atsijungimo nuo tinklo įtaka vėjo elektrinių ir tinklo darbui. Taip yra surasti kritiniai parametrai, prie kurių sausumos ir jūros vėjo elektrinės ir elektros tinklas gali veikti stabiliai.

*Reikšminiai žodžiai:*

*Sausumos vėjo elektrinė*

*Jūrinė vėjo elektrinė*

*Dinaminis stabilumas*

*Modelis*

*Apkrova*

*Elektros perdavimo linija*

*Avarija*

*Ivanauskas, D. Comparison of an Onshore and an Offshore Wind Turbines. Final project of Master degree / supervisor doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric power systems.*

*Kaunas, 2016. 50 pp.*

## **SUMMARY**

Here is described the researches of dynamic stability. Furthermore, here is made the modeling of double fed induction generator wind turbine. In this model is modeled a wind turbine of chosen power. It feed the load, which is also a variable. The electricity power from wind turbine to load is transmitted with modeled electricity lines (the lines model is based on line voltage, resistance, inductance and capacitance and other parameters).

Here is modeled to types of wind turbines: onshore wind turbine with air electricity transmission lines and offshore wind turbine with cable transmission lines that is connected to distribution grid.

The influence of wind change, load change is modeled in this final work. That is how I found the critical parameters of stable work of onshore and offshore wind turbines.

*Keywords:*

*Onshore wind turbine*

*Offshore*

*Dynamic stability*

*Model*

*Load*

*Electric power transmission line*

*Fault*

## TURINYS

<i>LENTELIŲ SĄRAŠAS</i> .....	8
<i>PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS</i> .....	9
<i>ĮVADAS</i> .....	17
<i>1. APŽVALGINĖ DALIS</i> .....	18
1.1. <i>Dinaminio stabilumo tobulinimas prie elektros tinklo prijungtoms keturioms lygiagrečiai sujungtoms jūrinėms vėjo elektrinėms su nuolatinių magnetų sinchroniniu generatoriumi, naudojančioms STATCOM sistemą</i> .....	18
1.1.1. <i>Vėjo elektrinių/generatorių konfigūracijos ateities jūrinėms parkams palyginimas</i>	20
1.1.2. <i>Su tinklu sujungtos vėjo elektrinės, turinčios indukcinį generatorių, perdavimo stabilumo analizė ir prognozavimas</i> .....	22
1.1.3. <i>Avarijos vėjo elektrinėje su asinchroniniu generatoriumi su narveliniu rotoriumi ir vėjo elektrinėje su dvigubo maitinimo sinchroniniamiu generatoriumi įtaka skirstomojo tinklo stabilumui: statiniai ir dinaminiai aspektai</i> .....	24
1.1.4. <i>Nepastovaus greičio vėjo elektrinių generatorių ilgalaikė įtampos stabilumo analizė</i>	28
1.1.5. <i>Mikrotinklo / silpno tinklo įrankių, skirtų valdyti dvigubo maitinimo sinchroninius generatorius turinčias vėjo elektrines stabilumo analizė ir avarijos</i> .....	32
<i>2. VĖJO ELEKTRINIŲ MODELIAVIMO METODINĖ DALIS IR REZULTATAI</i> .....	35
2.1. <i>Nominalūs parametrai</i> .....	35
2.1.1. <i>Jūrinės VE perdavimo (kabelinės) linijos parametrai</i> .....	36
2.1.2. <i>Sausumos VE perdavimo (oro) linijos parametrai</i> .....	36
2.1.3. <i>Vėjo elektrinės vidutinio vėjo greičio nustatymas</i> .....	38
1.1. <i>Kontrolinio modeliavimo rezultatai</i> .....	39
1.2. <i>Staigaus vėjo gūσιο įtaka vėjo elektrinėms</i> .....	41
1.3. <i>Maksimalios apkrovos taško ieškojimas</i> .....	43
1.4. <i>Fazės trikdžio įtaka</i> .....	44
1.5. <i>VE atsijungia nuo tinklo</i> .....	47
<i>IŠVADOS</i> .....	48
<i>LITERATŪROS SĄRAŠAS</i> .....	49
<i>PRIEDAI</i> .....	49
1 <i>PRIEDAS. Jūrinės elektrinės kontrolinio modeliavimo rezultatai</i> .....	51

2 PRIEDAS. Staigaus vėjo gūsis jūrinei elektrinei.....	59
3 PRIEDAS. Maksimalios vartotojo galios įtaka jūrinei vėjo elektrinei.....	67
4 PRIEDAS. Sausumos vėjo elektrinės kontrolinio modeliavimo rezultatai.....	75
5 PRIEDAS. Staigaus vėjo gūsių įtaka sausumos elektrinei.....	83
6 PRIEDAS. Maksimalios vartotojo galios įtaka sausumos vėjo elektrinei.....	91
7 PRIEDAS. Fazės trikdys. Jūrinė vėjo elektrinė.....	99
8 PRIEDAS. Fazės trikdys. Sausumos vėjo elektrinė.....	107
9 PRIEDAS. VE atsijungia nuo tinklo. Sausumos vėjo elektrinė.....	115
10 PRIEDAS. VE atsijungia nuo tinklo. Sausumos vėjo elektrinė.....	123

## Lentelių sąrašas

<i>1.1 LENTELE. VE PAGRINDINIAI PARAMETRAI</i> .....	20
<i>2.1 LENTELE. ŽEMĖS PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMO KLASĖS IR LAIPSNIO RODIKLIAI</i> .....	38
<i>2.2 LENTELE. ŠYŲŲ ĮTAMPOS KONTROLINIO MODELIAVIMO METU</i> .....	40
<i>2.3 LENTELE. SROVĖS IR JŲ KAMPAI</i> .....	40
<i>2.4 LENTELE. ŠYŲŲ ĮTAMPOS MAKSIMALIOS VARTOTOJO GALIOS MODELIAVIMO METU</i> .....	44



## Paveikslų sąrašas

1.1 PAV. 4 VE PARKAS SU STATCOM REGULIATORIUMI.....	18
1.2 PAV.EL. ENERGIJOS PERDAVIMO REAKCIJOS MODELIUOJAMOJE SISTEMOJE NAUDOJANT IR NENAUDOJANT PID REGULIATORŲ PRIJUNGTĄ PRIE STATCOM ESANT TRIFAZIAM TRUMPAJAM JUNGIMUI. A) AKTYVI GALIA NUOLATINIŲ MAGNETŲ SINCHRONINIAME GENERATORIUJE ( JŪRINĖ VE); B) REAKTYVI GALIA NUOLATINIŲ MAGNETŲ SINCHRONINIAME GENERATORIUJE (JŪRINĖ VE); C) SISTEMOS AKTYVI GALIA; D) SISTEMOS REAKTYVI GALIA; E) AKTYVI GALIA SINCHRONINIAME GENERATORIUJE (SAUSUMOS VE); F) REAKTYVI GALIA SINCHRONINIAME GENERATORIUJE (SAUSUMOS VE); G) KAMPAS $\Delta$ ; H) SINCHRONINIO GENERATORIAUS (SAUSUMOS VE) DAŽNIS; I) REAKTYVI STATCOM GALIA; J) AKTYVI STATCOM GALIA; K) ĮTAMPA MAZGE PCC; L) ĮTAMPA ANALIZUOJAMAME TAŠKE.....	19
1.3 PAV.VĖJO ELEKTRINIŲ PARKO MODELIO VIENLINIJINĖ SCHEMA.....	20
1.4 PAV.VĖJO GREIČIO IR ROTORIAS APSISUKIMŲ SKAIČIAUS, BEI DAŽNIO IR ĮTAMPOS PRIKLAUSOMYBĖS LAIKE.....	21
1.5 PAV.VE NAUDOJAMOS IR GENERUOJAMOS GALISO SUVESTINĖ PRIE SKIRTINGŲ VĖJO GREIČIŲ LAIKE. ....	21
1.6 PAV.VE MODELIO PRINCIPINĖ SCHEMA: MENTĖS MODELIS, VE AŠIES MODELIS, GREIČIŲ DĖŽĖS MODELIS. ....	22
1.7PAV.BLOKINĖ AVARIJOS SCHEMA.....	23
1.8 PAV.A) 330 KW VE; B) 3 MW VE.....	23
1.9 PAV.KRITINIS SLOPIMO KOEFICIENTAS. ....	24
1.10 PAV.VIENLINIJINĖ MODELIUOJAMOS SISTEMOS SCHEMA. ....	25
1.11 PAV.16 MAZGŲ TESTUOJAMOS SISTEMOS ĮTAMPA.....	25
1.12 PAV.2 IR 3 MAZGŲ ĮTAMPA, KAI 2 ZONA YRA STAIGA ATJUNGIAMA NUO 1 ZONOS, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	26
1.13 PAV.2 IR 3 MAZGŲ ĮTAMPA, KAI 3 ZONA YRA STAIGA ATJUNGIAMA NUO 1 ZONOS, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	26
1.14 PAV.2 IR 3 MAZGŲ ĮTAMPA, KAI ĮVYKSTA TRIFAZIS TRUMPASIS JUNGIMAS VIDURYJE TARP 2 IR 3 LINIJOS, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	26

1.15 PAV.2 IR 3 MAZGŲ ĮTAMPA, KAI ĮVYKSTA TRIFAZIS TRUMPASIS JUNGIMAS VIDURYJE TARP 1 IR 3 LINJOS, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	27
1.16 PAV.3 MAZGO ĮTAMPA, KAI STAIGA ATSIJUNGIA DGI, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	27
1.17 PAV.2 IR 3 MAZGŲ ĮTAMPA, KAI DARBAS VYKSTA SALOS REŽIMU, KUR A) GENERATORIUS NARVELINIU ROTORIUMI; B) DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIS GENERATORIUS. ....	27
1.18 PAV.DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIO GENERATORIAUS DINAMINIO MODELIO VALDYMO GRANDINĖ, KUR A) AKTYVIOS GALIOS IR GREIČIO VALDYMO GRANDINĖ; B) GNYBTŲ ĮTAMPOS VALDYMO GRANDINĖ. ....	28
1.19 PAV.DVIKUBO MAITINIMO SINCHRONINIO GENERATORIAUS DINAMINIO MODELIO TINKLO PUSĖS VALDYMO GRANDINĖ, KUR A) PAPILDOMOS REAKTYVIOS GALIOS PALAIKYMO VALDYMO GRANDINĖ; B) NUOLATINĖS ĮTAMPOS JUNGTIES VALDYMO GRANDINĖ. ....	29
1.20 PAV.KEITIKLIO DALIES VALDYMO GRANDINĖ. ....	29
1.21 PAV.TIRIAMA GRANDINĖ, KUR PAGRINDINIAI TIRIAMI MAZGAI YRA 8 IR 11. ....	29
1.22 PAV.REAKTYVIOS GALIOS RIBOS MVAR, KAI VE ĮSISKVERBIMO LYGIS YRA SKIRTINGAS IR KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU ROTORIAUS PUSĖS KEITIKLIU; KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU ROTORIAUS PUSĖS IR TINKLO PUSĖS KEITIKLIU; KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU PILNU KEITIKLIU. ....	30
1.23 PAV.8 MAZGO ĮTAMPA, KAI VE ĮSISKVERBIMO LYGIS YRA SKIRTINGAS IR KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU ROTORIAUS PUSĖS KEITIKLIU; KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU ROTORIAUS PUSĖS IR TINKLO PUSĖS KEITIKLIU; KAI VEIKIA DVIKUBO MAITINIMO GENERATORIUS SU PILNU KEITIKLIU. ....	31
1.24 PAV.A) VE GENERUOJAMA GALIA; B) VE SUKIMOSI DAŽNIS. ....	32
1.25 PAV.A) SISTEMOS MAKSIMALUS DAŽNIO POKYTIS, JEIGU PAKINTA APKROVOS KITIMO ŽINGSNIS B) VE NAUDINGUAS. ....	32
1.26 PAV.SISTEMOS DAŽNIO KILIMO LAIKAS, JEIGU PAKINTA APKROVOS KITIMO ŽINGSNIS A) SU PAPILDOMA INERCIJA; B) SU VĖJO GALIOS KRITIMU. ....	33
1.27 PAV.DAŽNIO KITIMAS, KAI VĖJO GREITIS YRA 13 M/S IR GENERATORIAUS IŠNAUDOJIMS $K_F=0.5$ . ....	33

1.28 PAV.DAŽNIO IR VĖJO GALIOS GENERAVIMO ATSAKAS, KAI VĖJO GREITS YRA 13 M/S. $K_F=1.5$ ; $M_P=40$ .....	34
1.29 PAV.DAŽNIO IR VĖJO GALIOS GENERAVIMO ATSAKAS, KAI VĖJO GREITS YRA 13 M/S. $K_F=1.5$ ; $M_P=40$ .....	34
2.1 PAV.DVIGUBO MAITINIMO VĖJO ELEKTRINĖ SU PRIE JOS PRIJUNGTU TINKLU. ....	35
2.2 PAV.LIETUVOS REGIONŲ DAUGIAMETIS VĖJO GREITIS (M/S) 10 IR 50 M AUKŠTYJE. [8] .....	38
2.3 PAV.VIDUTINIS VĖJO GREITIS BALTIJOS JŪROJE. [9]. .....	39
2.4 PAV.MODELIUOJAMO TINKLO PRINCIPINĖ SCHEMA. ....	40
2.5 PAV.VĖJO ELEKTRINĖS DARBAS VĖJO GŪSIO METU: GENERATORIAUS GREITIS, SANTYKINIAIS VIENETAIS; VĖJO GREITIS, M/S; VE MENČIŲ PAKREIPIMO KAMPAS, LAIPSNIAIS.....	41
2.6 PAV.JŪRINĖS VĖJO ELEKTRINĖS IR SAUSUMOS VĖJO ELEKTRINĖS SROVĖS IR KAMPAI. ....	42
2.7 PAV.JŪRINĖS IR SAUSUMOS VE ĮTAMPOS.....	42
2.8 PAV.JŪRINĖS IR SAUSUMOS VE GENERATORIAUS SŪKLIAI (SANTYKINIAIS VIENETAIS); VĖJO GREITIS (M/S); MENČIŲ PAKREIPIMO KAMPAS (LAIPSNIAIS). .....	44
2.9 PAV.PRINCIPINĖ TINKLO SCHEMA, KURIAME A FAZĖJE ĮVYKO TRUMPAS JUNGIMAS.....	45
2.10 PAV.JŪRINĖS IR SAUSUMOS VE GENERATORIAUS DARBAS, ĮVYKUS TRUMPAM JUNGIMUI TINKLE A FAZĖJE. ....	45
2.11 PAV.JŪRINĖS IR SAUSUMOS VE SROVĖS IR KAMPAI, KAI TINKLE ĮVYKSTA TRUMPAS JUNGIMAS. ....	46
2.12 PAV.JŪRINĖS IR SAUSUMOS VE ĮTAMPOS SKIRTINGUOSE TINKLO TAŠKUOSE. 46	
2.13 PAV.AKTYVIOS IR REAKTYVIOS GALIOS PASISKIRSTYMAS SKIRTINGUOSE TINKLO VIETOSE. ....	47
1 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=110203,67$ V; $I=92,65E^{27.23}$ A; $P=128390,91$ VA; $Q=6607303,75$ VA. ....	51
2 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=35820,07$ V; $I=227E^{43.14}$ A; $P=8390587,78$ VA; $Q=7863110,73$ VA. ....	52
3 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=35443,80$ V; $I=49,80E^{-156.35}$ A; $P=-2286621,05$ VA; $Q=-1001378,34$ VA. ....	53

4 PAV.575 V ŠYNOS. $U=579.69$ V; $I=6802.78E^{-124.35}$ A; $P=-3146959.29$ VA; $Q=-4604230.1$ VA. ....	54
5 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=110203.67$ KV; $U_{35\text{ KV }1}=35820.07$ KV; $U_{35\text{ KV }2}=35443.80$ KV; $U_{35\text{ KV }3}=35675.79$ KV; $U_{575\text{ V}}=579.69$ V. ....	55
6 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=92.65E^{27.23}$ A; $I_{35\text{ KV } (1)}=227E^{43.14}$ A; $I_{35\text{ KV } (2)}=49.80E^{-156.35}$ A; $I_{0.575\text{ KV}}=6802.78E^{-124.35}$ A;.....	56
7 PAV. $P_{110\text{ KV}}=12839035.91$ VA; $Q_{110\text{ KV}}=6607303.75$ VA; $P_{35\text{ KV } (1)}=8390587.78$ VA; $Q_{35\text{ KV } (1)}=7863110.73$ VA; $P_{35\text{ KV } (2)}=-2286621.05$ VA; $Q_{35\text{ KV } (2)}=-1001378.34$ VA; $P_{0.575\text{ KV}}=-3146959.29$ VA; $Q_{0.575\text{ KV}}=-4604230.10$ VA;.....	57
8 PAV.VE. GREITIS=0.89; $V_{VEJO}=9$ M/S; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	58
9 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=110\ 203,67$ V; $I=92.65E^{27.23}$ A; $P=128390.91$ VA; $Q=6607303.75$ VA. ....	59
10 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=35820.07$ V; $I=227E^{43.14}$ A; $P=8\ 390\ 587.78$ VA; $Q=7\ 863\ 110.73$ VA. ....	60
11 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=35443.80$ V; $I=49.80E^{-156.35}$ A; $P=-2286621.05$ VA; $Q=-1001378.34$ VA. ....	61
12 PAV.575 V ŠYNOS. $U=579.69$ V; $I=6802.78E^{-124.35}$ A; $P=-3146959.29$ VA; $Q=-4604230.1$ VA. ....	62
13 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=110203.67$ KV; $U_{35\text{ KV }1}=35820.07$ KV; $U_{35\text{ KV }2}=35443.80$ KV; $U_{35\text{ KV }3}=35675.79$ KV; $U_{575\text{ V}}=579.69$ V. ....	63
14 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=92.65E^{27.23}$ A; $I_{35\text{ KV } (1)}=227E^{43.14}$ A; $I_{35\text{ KV } (2)}=49.80E^{-156.35}$ A; $I_{0.575\text{ KV}}=6802.78E^{-124.35}$ A;.....	64
15 PAV. $P_{110\text{ KV}}=12839035.91$ VA; $Q_{110\text{ KV}}=6607303.75$ VA; $P_{35\text{ KV } (1)}=8390587.78$ VA; $Q_{35\text{ KV } (1)}=7863110.73$ VA; $P_{35\text{ KV } (2)}=-2286621.05$ VA; $Q_{35\text{ KV } (2)}=-1001378.34$ VA; $P_{0.575\text{ KV}}=-3146959.29$ VA; $Q_{0.575\text{ KV}}=-4604230.10$ VA;.....	65
16 PAV.VE. GREITIS=0.89; $V_{VEJO}=9$ M/S; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	66
17 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=108967,28$ V; $I=410,2E^{-19,86}$ A; $P=59456390,73$ VA; $Q=-21481654,73$ VA. ....	67
18 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=32967,19$ V; $I=1200,26E^{-20,32}$ A; $P=52478175,60$ VA; $Q=-19428386,02$ VA. ....	68
19 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=24755,50$ V; $I=215,07E^{50,08}$ A; $P=4831918,50$ VA; $Q=5774529,19$ VA.....	69
20 PAV.575 V ŠYNOS. $U=431,25$ V; $I=9942,50E^{51,62}$ A; $P=3764423,35$ VA; $Q=4753721,05$ VA. ....	70

21 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=108967,28\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV }1}=32967,19\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV }2}=24755,50\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV }3}=25571,07\text{ V}$ ; $U_{575\text{ V}}=431,25\text{ V}$ .....	71
22 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=410,23E^{-19,86}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV } (1)}=1200,26E^{-20,32}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV } (2)}=215,07E^{50,08}\text{ A}$ ; $I_{0,575\text{ KV}}=9942,50E^{51,62}\text{ A}$ .....	72
23 PAV. $P_{110\text{ KV}}=59456390,73\text{ VA}$ ; $Q_{110\text{ KV}}=-21481654,73\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV } (1)}=52478175,60\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV } (1)}=-19428386,02\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV } (2)}=4831918,50\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV } (2)}=5774529,19\text{ VA}$ ; $P_{0,575\text{ KV}}=3764423,35\text{ VA}$ ; $Q_{0,575\text{ KV}}=4753721,05\text{ VA}$ .....	73
24 PAV.VE. GREITIS=1.24; $V_{VEJO}=9,00\text{ M/S}$ ; $\Delta_{MENČIU}=12,73^0$ .....	74
25 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=110193,22\text{ V}$ ; $I=107E^{23,2}\text{ A}$ ; $P=15321346,44\text{ VA}$ ; $Q=6567773,14\text{ VA}$ .....	75
26 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=35814,65\text{ V}$ ; $I=265,64E^{35,58}\text{ A}$ ; $P=10942549,49\text{ VA}$ ; $Q=7828635,56\text{ VA}$ .....	76
27 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=35182,31\text{ V}$ ; $I=16,22E^{-75,94}\text{ A}$ ; $P=196059,65\text{ VA}$ ; $Q=-782704,65\text{ VA}$ .....	77
28 PAV.575 V ŠYNOS. $U=575,77\text{ V}$ ; $I=1046,97E^{-119,85}\text{ A}$ ; $P=-424368,98\text{ VA}$ ; $Q=-739384,81\text{ VA}$ .....	78
29 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=110193,22\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }1}=35814,65\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }2}=35182,31\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }3}=35113,07\text{ KV}$ ; $U_{575\text{ V}}=575,77\text{ V}$ .....	79
30 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=106,97E^{23,20}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV } (1)}=265,64E^{35,58}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV } (2)}=16,22E^{-75,94}\text{ A}$ ; $I_{0,575\text{ KV}}=1046,97E^{-119,85}\text{ A}$ .....	80
31 PAV. $P_{110\text{ KV}}=15321346,44\text{ VA}$ ; $Q_{110\text{ KV}}=6567773,14\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV } (1)}=10942549,49\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV } (1)}=7828635,56\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV } (2)}=196059,65\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV } (2)}=-782704,65\text{ VA}$ ; $P_{0,575\text{ KV}}=-424368,98\text{ VA}$ ; $Q_{0,575\text{ KV}}=-739384,81\text{ VA}$ .....	81
32 PAV.VE. GREITIS=0.7; $V_{VEJO}=5,21\text{ M/S}$ ; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	82
33 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=109934,26\text{ V}$ ; $I=37,92E^{-11,26}\text{ A}$ ; $P=5781809,89\text{ VA}$ ; $Q=-1151475,75\text{ VA}$ .....	83
34 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=34942,13\text{ V}$ ; $I=22,86E^{-6,34}\text{ A}$ ; $P=1122887,16\text{ VA}$ ; $Q=-1151475,75\text{ VA}$ .....	84
35 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=33986,37\text{ V}$ ; $I=254,43E^{-132,12}\text{ A}$ ; $P=-8201107,25\text{ VA}$ ; $Q=-9071077,86\text{ VA}$ .....	85
36 PAV.575 V ŠYNOS. $U=583,52\text{ V}$ ; $I=16080,95E^{-133,92}\text{ A}$ ; $P=-9205190,28\text{ VA}$ ; $Q=-9558584,31\text{ VA}$ .....	86
37 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=109934,26\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }1}=34942,13\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }2}=33986,37\text{ KV}$ ; $U_{35\text{ KV }3}=36220,51\text{ KV}$ ; $U_{575\text{ V}}=583,52\text{ V}$ .....	87

38 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=37,92E^{-11,26}$ A; $I_{35\text{ KV (1)}}=22,86E^{-6,34}$ A; $I_{35\text{ KV (2)}}=254,43E^{-132,12}$ A; $I_{0,575\text{ KV}}=16080,95E^{-133,92}$ A;.....	88
39 PAV.P <sub>110 KV</sub> =5781809,89 VA; $Q_{110\text{ KV}}=-1151475,75$ VA; $P_{35\text{ KV (1)}}=1122887,16$ VA; $Q_{35\text{ KV (1)}}=-124832,04$ VA; $P_{35\text{ KV (2)}}=-8201107,25$ VA; $Q_{35\text{ KV (2)}}=-9071077,86$ VA; $P_{0,575\text{ KV}}=-9205190,28$ VA; $Q_{0,575\text{ KV}}=-9558584,31$ VA;.....	89
40 PAV.VE. GREITIS=1,28; $V_{VEJO}=30$ M/S; $\Delta_{MENČIU}=36,14^0$ .....	90
41 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=109119,43$ V; $I=382E^{-17,6}$ A; $P=56195439,22$ VA; $Q=-17825512,52$ VA. ....	91
42 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=33332,44$ V; $I=1110,80E^{-17,90}$ A; $P=49827703,77$ VA; $Q=-16094192,08$ VA. ....	92
43 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=25807,18$ V; $I=164,05E^{52,33}$ A; $P=3659251,70$ VA; $Q=4738937,13$ VA.....	93
44 PAV.575 V ŠYNOS. $U=431,25$ V; $I=9942,40E^{55,59}$ A; $P=3426321,16$ VA; $Q=5002837,67$ VA. ....	94
45 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=109119,43$ V; $U_{35\text{ KV 1}}=33332,44$ V; $U_{35\text{ KV 2}}=25807,18$ V; $U_{35\text{ KV 3}}=25571,08$ V; $U_{575\text{ V}}=431,25$ V.....	95
46 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=382,03E^{-17,60}$ A; $I_{35\text{ KV (1)}}=1110,80E^{-17,90}$ A; $I_{35\text{ KV (2)}}=164,05E^{52,33}$ A; $I_{0,575\text{ KV}}=9942,40E^{55,59}$ A;.....	96
47 PAV.P <sub>110 KV</sub> =56195439,22 VA; $Q_{110\text{ KV}}=-17825512,52$ VA; $P_{35\text{ KV (1)}}=49827703,77$ VA; $Q_{35\text{ KV (1)}}=-16094192,08$ VA; $P_{35\text{ KV (2)}}=3659251,70$ VA; $Q_{35\text{ KV (2)}}=4738937,13$ VA; $P_{0,575\text{ KV}}=3426321,16$ VA; $Q_{0,575\text{ KV}}=5002837,67$ VA;.....	97
48 PAV.VE. GREITIS=0.834; $V_{VEJO}=5.21$ M/S; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	98
49 PAV.110 KV ŠYNOS. $U=110207,84$ V; $I=94,37E^{27,27}$ A; $P=13074223,39$ VA; $Q=6739399,56$ VA.....	99
50 PAV.35 KV 1 ŠYNOS. $U=35835,06$ V; $I=232,31E^{42,82}$ A; $P=8635465,07$ VA; $Q=8002499,02$ VA.....	100
51 PAV.35 KV 2 ŠYNOS. $U=35458,84$ V; $I=44,53E^{-157,72}$ A; $P=-2066161,10$ VA; $Q=-846403,60$ VA. ....	101
52 PAV.575 V ŠYNOS. $U=579,54$ V; $I=6500,10E^{-123,46}$ A; $P=-2937555,74$ VA; $Q=-4444335,58$ VA. ....	102
53 PAV.ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=110207,84$ V; $U_{35\text{ KV 1}}=35835,06$ V; $U_{35\text{ KV 2}}=35458,84$ V; $U_{35\text{ KV 3}}=35654,12$ V; $U_{575\text{ V}}=579,54$ V.....	103
54 PAV.I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=94,37E^{27}$ A; $I_{35\text{ KV (1)}}=232,31E^{42,82}$ A; $I_{35\text{ KV (2)}}=44,53E^{-157,72}$ A; $I_{0,575\text{ KV}}=6500,10E^{-123,46}$ A;.....	104

55 PAV. $P_{110\text{ KV}}=13074223,39\text{ VA}$ ; $Q_{110\text{ KV}}=6739399,56\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(1)}=8635465,07\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(1)}=8002499,02\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(2)}=-2066161,10\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(2)}=-846403,60\text{ VA}$ ; $P_{0,575\text{ KV}}=-2937555,74\text{ VA}$ ; $Q_{0,575\text{ KV}}=-4444335,58\text{ VA}$ ;.....	105
56 PAV. VE. GREITIS=0.86; $V_{VEJO}=9\text{ M/S}$ ; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	106
57 PAV. 110 KV ŠYNOS. $U=110193,22\text{ V}$ ; $I=107E^{23,2}\text{ A}$ ; $P=15321244,31\text{ VA}$ ; $Q=6567702,73\text{ VA}$ . .....	107
58 PAV. 35 KV 1 ŠYNOS. $U=35814,64\text{ V}$ ; $I=265,64E^{35,58}\text{ A}$ ; $P=10942442,36\text{ VA}$ ; $Q=7828561,45\text{ VA}$ .....	108
59 PAV. 35 KV 2 ŠYNOS. $U=35182,30\text{ V}$ ; $I=16,22E^{-75,95}\text{ A}$ ; $P=195965,51\text{ VA}$ ; $Q=-782784,17\text{ VA}$ . .....	109
60 PAV. 575 V ŠYNOS. $U=575,77\text{ V}$ ; $I=1047,12E^{-119,86}\text{ A}$ ; $P=-424462,90\text{ VA}$ ; $Q=-739465,52\text{ VA}$ . .....	110
61 PAV. ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=110193,22\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}1}=35814,64\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}2}=35182,30\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}3}=35113,08\text{ V}$ ; $U_{575\text{ V}}=575,77\text{ V}$ . .....	111
62 PAV. I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=106,97E^{23,20}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV}(1)}=265,64E^{35,58}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV}(2)}=16,22E^{-75,95}\text{ A}$ ; $I_{0,575\text{ KV}}=1047,12E^{-119,86}\text{ A}$ ;.....	112
63 PAV. $P_{110\text{ KV}}=15321244,31\text{ VA}$ ; $Q_{110\text{ KV}}=6567702,73\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(1)}=10942442,36\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(1)}=7828561,45\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(2)}=195965,51\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(2)}=-782784,17\text{ VA}$ ; $P_{0,575\text{ KV}}=-424462,90\text{ VA}$ ; $Q_{0,575\text{ KV}}=-739465,52\text{ VA}$ ;.....	113
64 PAV. VE. GREITIS=0.7; $V_{VEJO}=5.21\text{ M/S}$ ; $\Delta_{MENČIU}=0^0$ .....	114
65 PAV. 110 KV ŠYNOS. $U=109951,50\text{ V}$ ; $I=24,43E^{-13,79}\text{ A}$ ; $P=3689488,13\text{ VA}$ ; $Q=-905401,32\text{ VA}$ . .....	115
66 PAV. 35 KV 1 ŠYNOS. $U=4092,96\text{ V}$ ; $I=38,67E^{-102,91}\text{ A}$ ; $P=-50012,18\text{ VA}$ ; $Q=-218195,37\text{ VA}$ . .....	116
67 PAV. 35 KV 2 ŠYNOS. $U=4096,91\text{ V}$ ; $I=8,53E^{-75,11}\text{ A}$ ; $P=12709,60\text{ VA}$ ; $Q=-47783,48\text{ VA}$ . ..	117
68 PAV. 575 V ŠYNOS. $U=67,39\text{ V}$ ; $I=0E^0\text{ A}$ ; $P=0\text{ VA}$ ; $Q=0\text{ VA}$ . .....	118
69 PAV. ITAMPOS. $U_{110\text{ KV}}=109951,50\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}1}=4092,96\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}2}=4096,91\text{ V}$ ; $U_{35\text{ KV}3}=4102,04\text{ V}$ ; $U_{575\text{ V}}=67,39\text{ V}$ . .....	119
70 PAV. I IR KAMPAL. $I_{110\text{ KV}}=24,43E^{-13,79}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV}(1)}=38,67E^{-102,91}\text{ A}$ ; $I_{35\text{ KV}(2)}=8,53E^{-75,11}\text{ A}$ ; $I_{0,575\text{ KV}}=0E^0\text{ A}$ ;.....	120
71 PAV. $P_{110\text{ KV}}=3689488,13\text{ VA}$ ; $Q_{110\text{ KV}}=-905401,32\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(1)}=-50012,18\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(1)}=-218195,37\text{ VA}$ ; $P_{35\text{ KV}(2)}=12709,60\text{ VA}$ ; $Q_{35\text{ KV}(2)}=-47783,48\text{ VA}$ ; $P_{0,575\text{ KV}}=0\text{ VA}$ ; $Q_{0,575\text{ KV}}=0\text{ VA}$ ; .....	121

72 PAV. VE. GENERATORIAUS GREITIS (50 S)=1,24; V <sub>VĖJO</sub> (50 S)=9 M/S; Δ <sub>MENČIU</sub> (50 S)=12,73 <sup>0</sup> .....	122
73 PAV. 110 KV ŠYNOS. U=109951,51V; I=24,43E <sup>-13,79</sup> A; P=3689496,43 VA; Q=-905357,48 VA .....	123
74 PAV. 35 KV 1 ŠYNOS. U=4883,82 V; I=38,38E <sup>-101,19</sup> A; P=-51451,94 VA; Q=-260065,30 VA. ....	124
75 PAV. 35 KV 2 ŠYNOS. U=4808,61 V; I=1,71E <sup>-142,34</sup> A; P=-9210,68 VA; Q=-7109,07 VA....	125
76 PAV. 575 V ŠYNOS. U=78,64 V; I=0 A; P=0 VA; Q=0 VA.....	126
77 PAV. ITAMPOS. U <sub>110 KV</sub> =109951,51 V; U <sub>35 KV 1</sub> =4883,82 V; U <sub>35 KV 2</sub> =4808,61 V; U <sub>35 KV 3</sub> =4787,08 V; U <sub>575 V</sub> =78,64 V.....	127
78 PAV. I IR KAMPAL. I <sub>110 KV</sub> =24,43E <sup>-13,79</sup> A; I <sub>35 KV (1)</sub> =38,38E <sup>-101,19</sup> A; I <sub>35 KV (2)</sub> =1,71E <sup>-142,34</sup> A; I <sub>0.575 KV</sub> =0 A; .....	128
79 PAV. P <sub>110 KV</sub> =3689496,43 VA; Q <sub>110 KV</sub> =-905357,48 VA; P <sub>35 KV (1)</sub> =-51451,94 VA; Q <sub>35 KV (1)</sub> =-260065,30 VA; P <sub>35 KV (2)</sub> =-9210,68 VA; Q <sub>35 KV (2)</sub> =-7109,07 VA; P <sub>0.575 KV</sub> =0 VA; Q <sub>0.575 KV</sub> =0 VA; .....	129
80 PAV. VE. GENERATORIAUS GREITIS (50 S)=0,79; V <sub>VĖJO</sub> (50 S)=5,21 M/S; Δ <sub>MENČIU</sub> (50 S)=0 <sup>0</sup> .....	130



## Ivadas

Vėjo jėgainės yra naudojamos jau nuo 70 m. po Kr. tam, kad pumpuotų vandenį arba maltų grūdus į miltus. Dabar be jų nelabai galime įsivaizduoti savo energetikos, kadangi jos generuoja didelę dalį elektros energijos.

Dabartinių vėjo elektrinių galia siekia nuo kelių kilovatų iki įspūdingų 7 MW. Kadangi vėjas yra kintantis, o elektros dažnis tinkle turi būti pastovus, todėl suvienodinti dažniui vėjo elektrinėse yra naudojami įvairūs techniniai sprendimai, tokie kaip greičių dėžių arba reduktorių montavimas, generatoriaus valdymas jo žadinimu arba, sudėtingiausias būdas, kada yra naudojami puslaidininkiniai keitikliai, pakeičiantys srovės ir įtampos parametrus į reikalingus. Pačios vėjo elektrinės pagal generatorius ir apsisukimų valdymą yra skirstomos į 4 pagrindinius tipus: 1) tiesioginiai jungtas VE generatorius su narveliniu rotoriumi; 2) Asinchroninis generatorius su kontroliuojama išorine rotoriaus varža; 3) Dvigubo maitinimo asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi; 4) VE su tiesioginiu galios keitikliu.

Tačiau esant tiek daug ir tokių skirtingų tipų vėjo elektrinių tinkle yra tiesiog būtina žinoti, kaip jos reaguoja į įvairius atsitiktinius ir planinius veiksnius. Apie vėjo elektrinių darbą yra atlikta labai daug tyrimų, tačiau labai nedaug apie jūrinių ir sausuminių vėjo elektrinių stabilumo palyginimą. Todėl šiame darbe, yra palyginamos dvigubo maitinimo su asinchroniniu generatoriumi vėjo elektrinės, kurios yra sumodeliuotos dviem atvejais – pastačius jas sausumoje ir pastačius jas jūroje. Šio modeliavimo metu yra nustatinėjama vėjo elektrinių įtaka tinklo stabilumui, kada yra atsiradęs stipraus vėjo gūsis, kada vėjas yra per didelis ir vėjo elektrinė atsijungia, kada apkrova yra per didelė vėjo elektrinei. Šiam tikslui pasiekti yra naudojami MatLab programos vėjo elektrinių ir elektros linijų modeliai.

Šio projekto darbo tikslas – išanalizuoti vėjo elektrinių darbo skirtumus, kada jos yra pastatytos sausumoje ir jūroje.

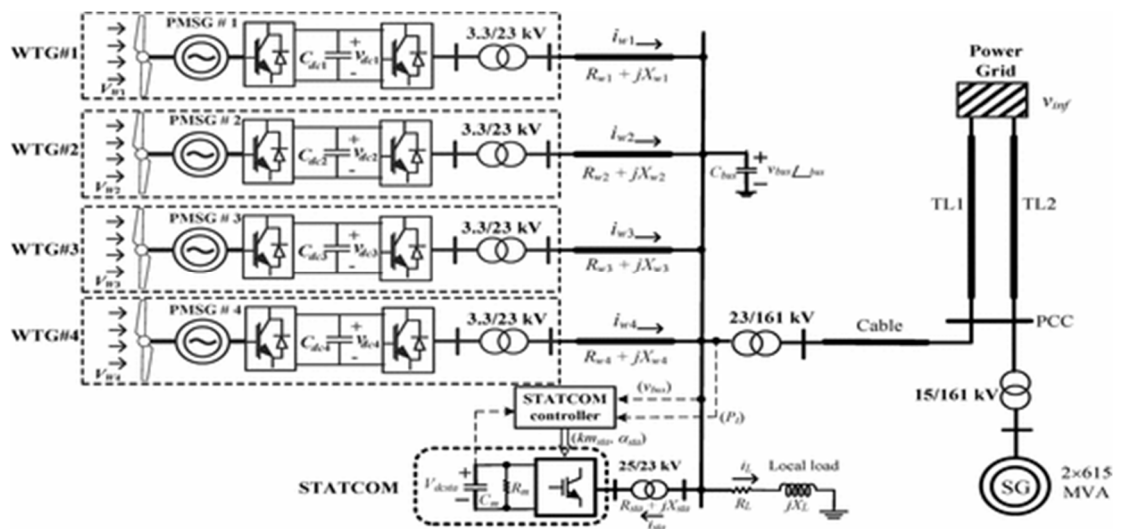
Šiam tikslui pasiekti yra išskelti šie uždaviniai:

1. Sukurti sausumos vėjo elektrinės modelį;
2. Sukurti jūrinės vėjo elektrinės modelį;
3. Ištirti šių elektrinių nominalius parametrus;
4. Ištirti šių vėjo elektrinių elgseną keičiantis apkrovai, vėjo greičiui, įvykus avarijai, atsijungus nuo tinklo;
5. Palyginti sumodeliuotas vėjo elektrinių charakteristikas tarpusavyje.

# 1. Apžvalginė dalis

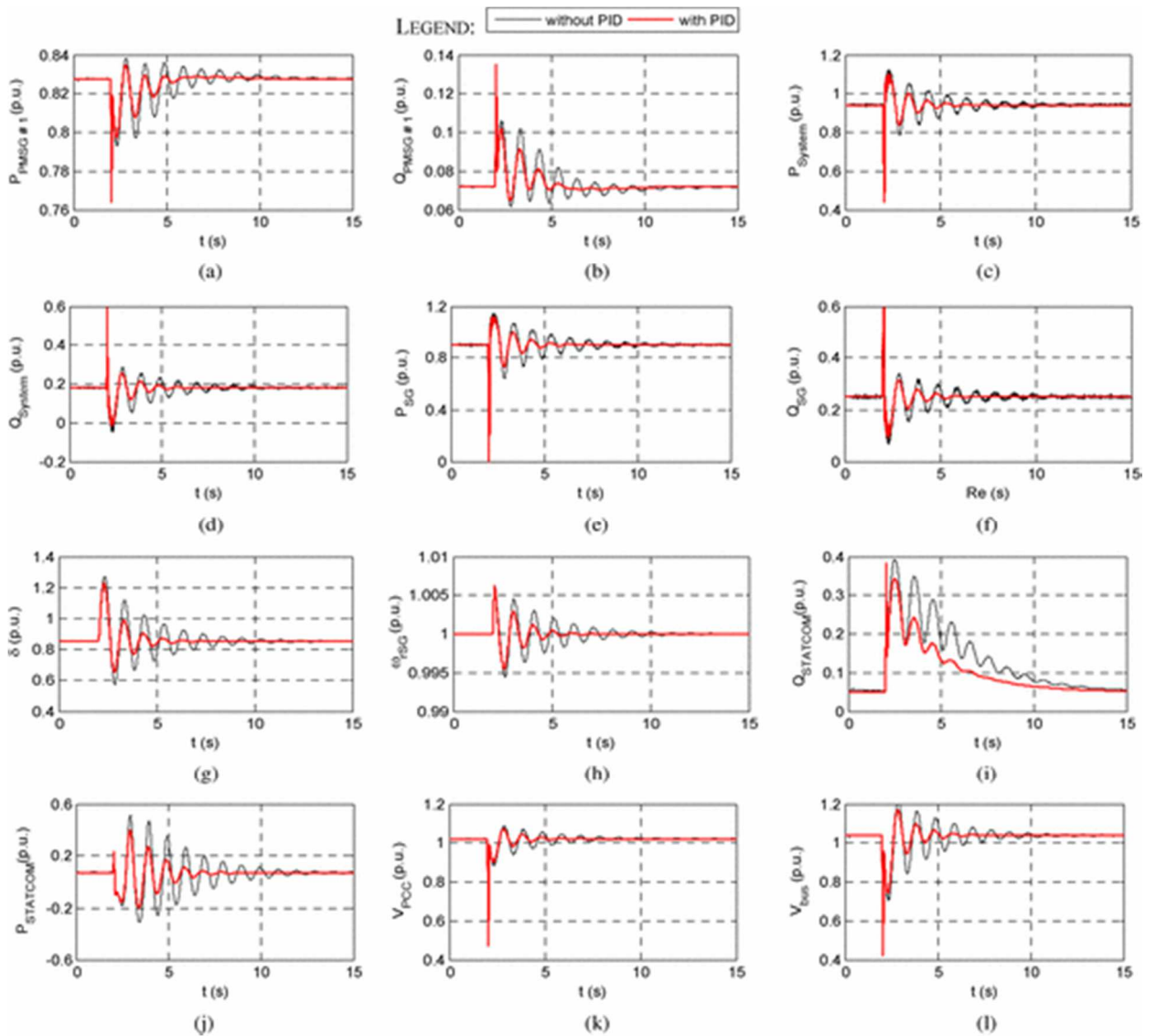
## 1.1. Dinaminio stabilumo tobulinimas prie elektros tinklo prijungtoms keturioms lygiagrečiai sujungtoms jūrinėms vėjo elektrinėms su nuolatinių magnetų sinchroniniu generatoriumi, naudojančioms STATCOM sistemą

Straipsnyje „Dinaminio stabilumo tobulinimas prie elektros tinklo prijungtoms keturioms lygiagrečiai sujungtoms jūrinėms vėjo elektrinėms su nuolatinių magnetų sinchroniniu generatoriumi, naudojančioms STATCOM sistemą“ [1] yra aprašyti keturių vėjo elektrinių parko modeliavimo rezultatai, kur yra modeliuojamas jų mechaninis modelis ir žadinimo modelis (1.1 pav.).



1.1 pav. 4 VE parkas su STATCOM reguliatoriumi.

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra nustatyti dinaminę vėjo elektrinių parko reakciją, kai parkas yra prijungtas prie STATCOM'o naudojant PID reguliatorių ir be jo. Modeliavimo rezultatai yra dažnio ir galių (reaktyvios ir aktyvios) pokytis, kampo  $\delta$  pokytis, STATCOM'o reaktyvios ir aktyvios galios pokytis, įtampos pasikeitimas, kurie yra pateikiami 1.2 paveiklėlyje:



1.2 pav. El. energijos perdavimo reakcijos modeliujamoje sistemoje naudojant ir nenaudojant PID reguliatorių prijungtą prie STATCOM esant trifaziam trumpajam jungimui. a) Aktyvi galia nuolatinių magnetų sinchroniniame generatoriuje ( jūrinė VE); b) Reaktyvi galia nuolatinių magnetų sinchroniniame generatoriuje (jūrinė VE); c) Sistemos aktyvi galia; d) Sistemos reaktyvi galia; e) Aktyvi galia sinchroniniame generatoriuje (sausumos VE); f) Reaktyvi galia sinchroniniame generatoriuje (sausumos VE); g) kampas  $\delta$ ; h) Sinchroninio generatoriaus (sausumos VE) dažnis; i) Reaktyvi STATCOM galia; j) Aktyvi STATCOM galia; k) Įtampa mazge PCC; l) Įtampa analizuojamame taške.

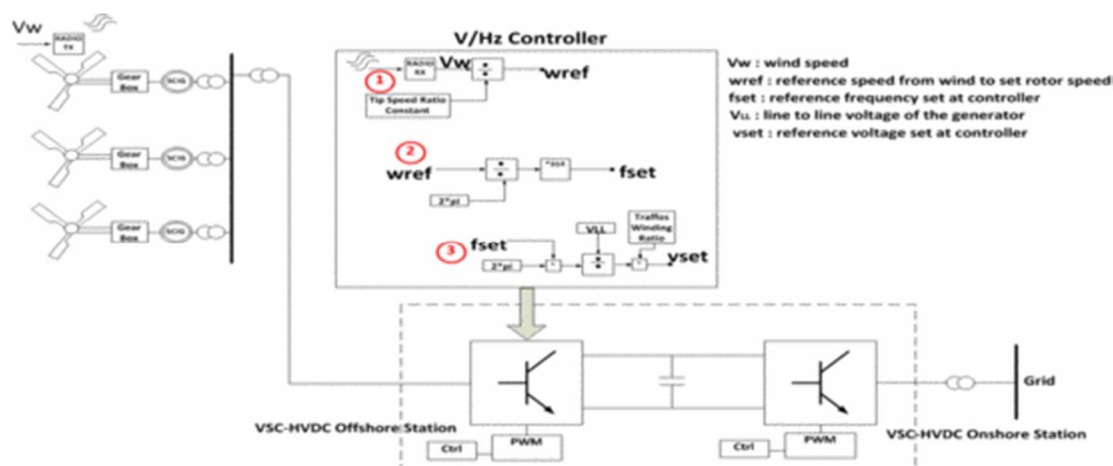
Iš šių duomenų matyti, kad naudojant PID reguliatorių pereinamieji procesai trunka ilgiau, o jų amplitudė yra didesnė. Tai reiškia, kad PID reguliatorius mažina bendrą sistemos inertiškumą.

### 1.1.1. Vėjo elektrinių/generatorių konfiguracijos ateities jūriniams parkams palyginimas

Straipsnyje „Comparison of wind turbine/generator configurations for future offshore wind farms“ [2] yra skaičiuota 2 MW galios vertikalių ašies jūrinės vėjo elektrinės su asinchroniniu generatoriumi ir narveliniu rotoriumi modelis.

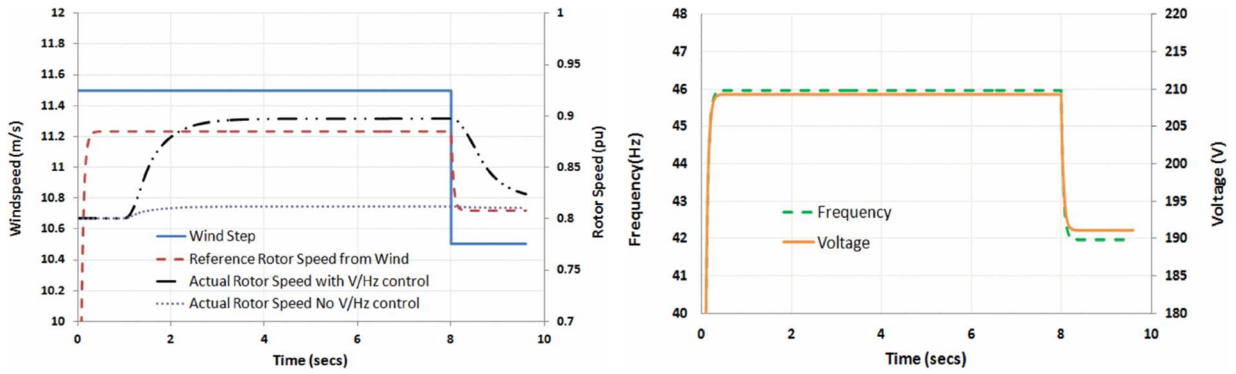
1.1 lentelė. VE pagrindiniai parametrai

Galia	2 MW
Vėjaračio spindulys	40 m
Oro tankis	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Pavaros santykis	65,27
Inercija	16·10 <sup>5</sup> kg/m <sup>2</sup>
Įampa	690 V
Statoriaus aktyvi varža	0,048 Ω
Rotoriaus aktyvi varža	0,018 Ω
Statoriaus reaktyvi varža	0,075 Ω
Rotoriaus reaktyvi varža	0,120 Ω



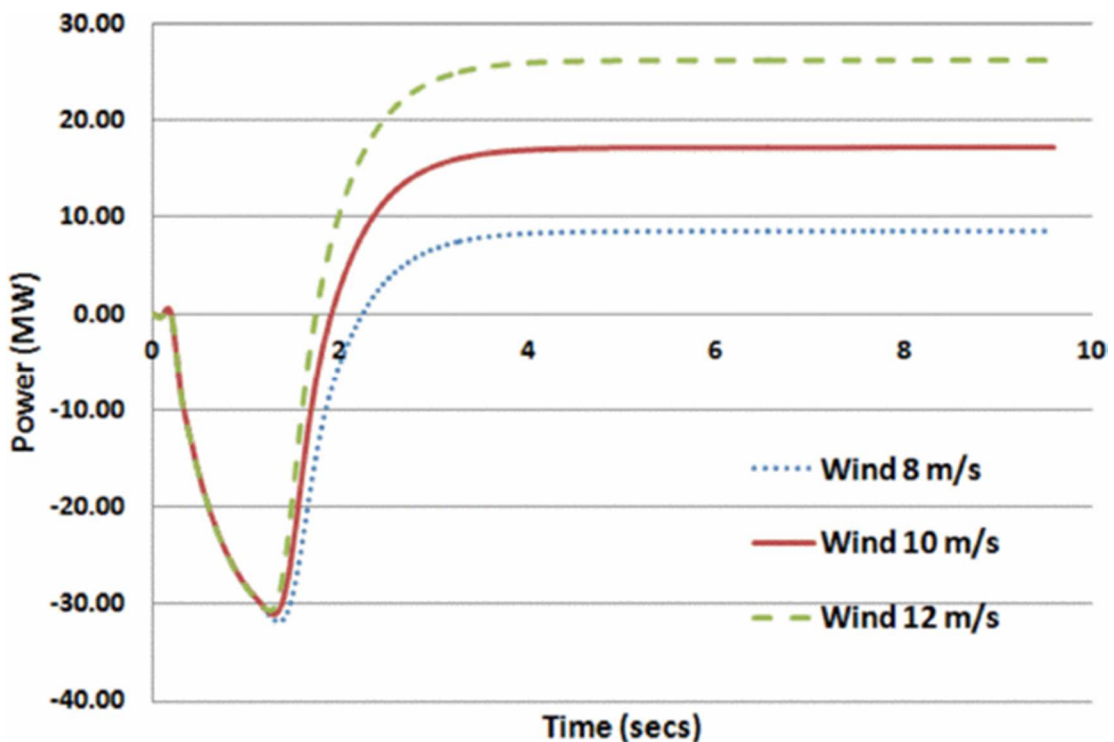
1.3 pav. Vėjo elektrinių parko modelio vienlinijinė schema

Vėjo elektrinės (VE) modelis yra sumodeliuotas kaip vėjo elektrinių parkas prijungtas aukštos įtampos nuolatinės srovės linija iki transformatoriaus, esančio sausumoje. Tam reikia turėti gerą VE modelį, transformatoriaus modelį (galima modeliuoti kaip varžą), keitiklių modelį ir perdavimo linijos modelį.



1.4 pav. Vėjo greičio ir rotoriaus apsisukimų skaičiaus, bei dažnio ir įtampos priklausomybės laike.

4 pav. yra pavaizduota vėjo greitis, rotoriaus teorinė reakcija į vėjo greitį (rotoriaus greitis), tikras rotoriaus greitis, įvertinus įtampos ir dažnio kontrolę ir tikras rotoriaus greitis be įtampos ir dažnio kontrolės. Paveiksle matosi, jog vėjo elektrinės reakcija į vėjo greičio pasikeitimus yra pakankamai inertiška.

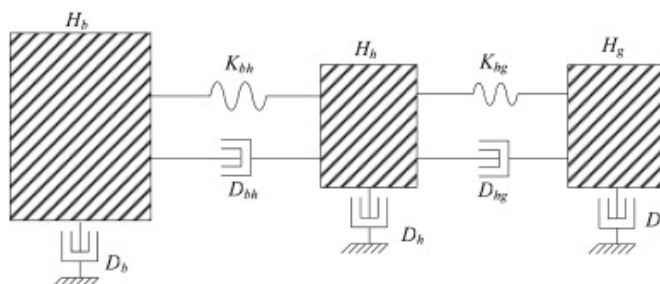


1.5 pav. VE naudojamos ir generuojamos galios suvestinė prie skirtingų vėjo greičių laike.

5 pav. yra pavaizduota VE galia prie skirtingų vėjo greičių. Iš grafiko matosi, kad norint paleisti vėjo elektrinę pirmiausiai ją reikia sužadinti, todėl ji apie 2 s. būna galios vartotoja, o tik vėliau pradeda generuoti elektros energiją. 2 sekundė yra netrumpas laiko tarpas, rodantis, kad galinga vėjo elektrinė iš tiesų yra labai inertiška.

### 1.1.2. Su tinklu sujungtos vėjo elektrinės, turinčios indukcinį generatorių, perdavimo stabilumo analizė ir prognozavimas

Straipsnyje „Analysis and estimation of transient stability for a grid-connected wind turbine with induction generator“ [3] yra modeliuojama asinchroninio generatoriaus narveliniu rotoriumi modelis. Čia yra suskaičiuota vėjo elektrinės aerodinaminė galia prie tam tikro vėjo. Toliau yra sumodeliuota mechaninė greičių dėžė, kuri pakeičia sukamąjį greitį į didesnį kartu susimuliuodama savo darbinis trinties nuostolius.

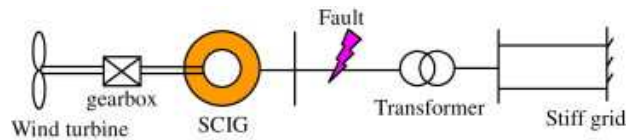


1.6 pav. VE modelio principinė schema: mentės modelis, VE ašies modelis, greičių dėžės modelis.

Toliau yra modeliuojamas generatorius. Jis modeliuojamas pasitelkiant judesio ir elektromagnetinio sukimo lygtis. Pats generatorius prilyginamas įtampos šaltiniui ir yra skaičiuojama jo elektromagnetinis sukimo momentas.

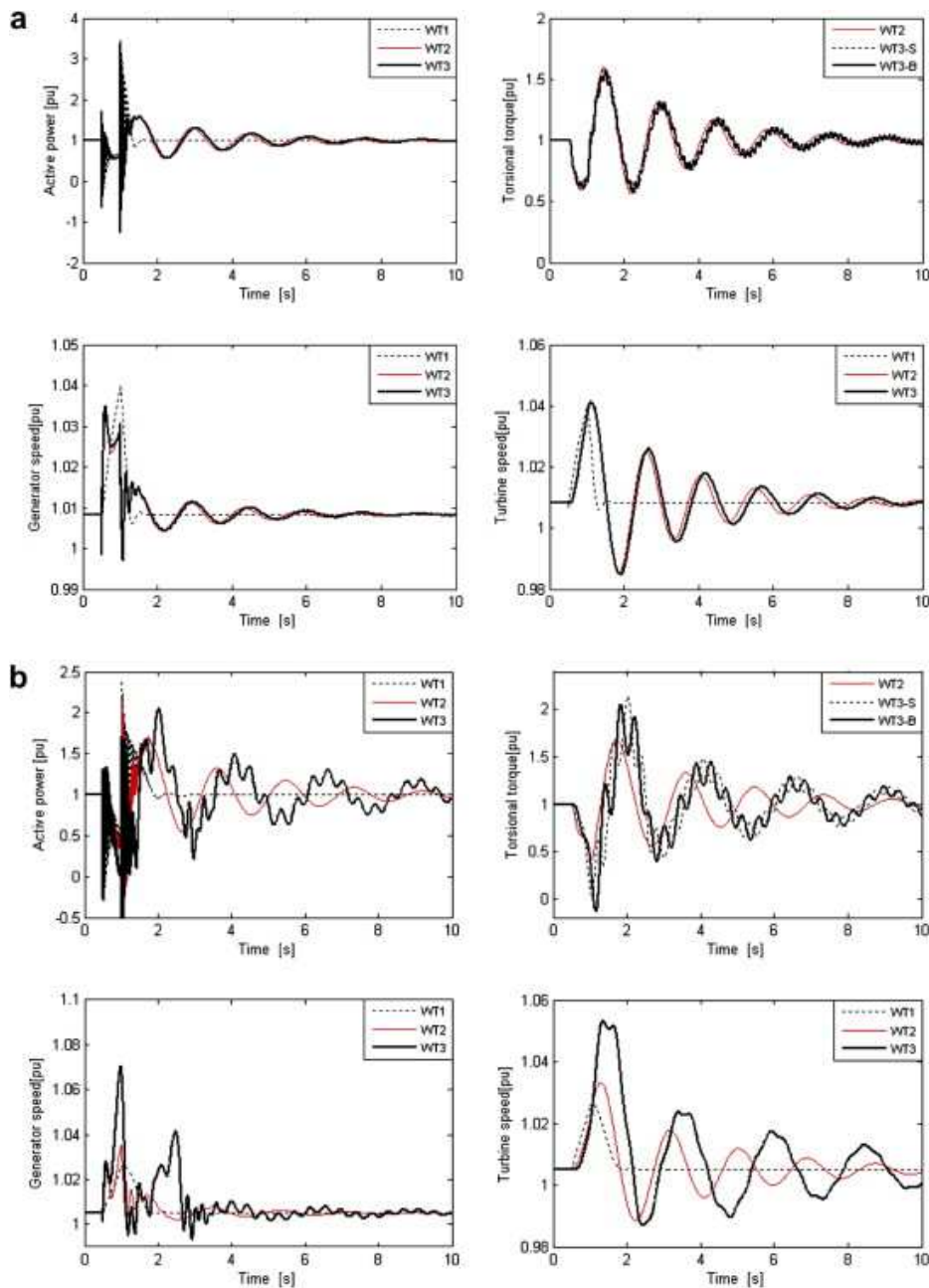
Yra lyginami dviejų VE (330 kW galios ir 3 MW galios) parametrai:

- Trijų menčių inercijos konstanta  $H_b$ , (s)
- Stebulės inercijos konstanta  $H_h$ , (s)
- Menčių lenkimo stiprumas  $K_{bh}$ , (p.u./ el. rad)
- Lėtai besisukančios ašies stiprumas  $K_{hg}$ , (p.u./ el. rad)
- Nominali VE galia  $P_N$  (MW)
- Nominali įtampa  $U_N$  (V)
- Statoriaus varža  $R_s$ , (p.u.)
- Rotoriaus varža  $R_r$ , (p.u.)
- Statoriaus nuotėkio induktyvumas  $X_{s\delta}$ , (p.u.)
- Rotoriaus nuotėkio induktyvumas  $X_{r\delta}$ , (p.u.)
- Bendras induktyvumas  $X_m$ , (p.u.)
- Generatoriaus inercijos konstanta  $H_g$ , (s)
- Transformatoriaus varža  $X_{tr}$ , (p.u.)
- Vienos perdavimo linijos varža  $X_l$ , (p.u.)



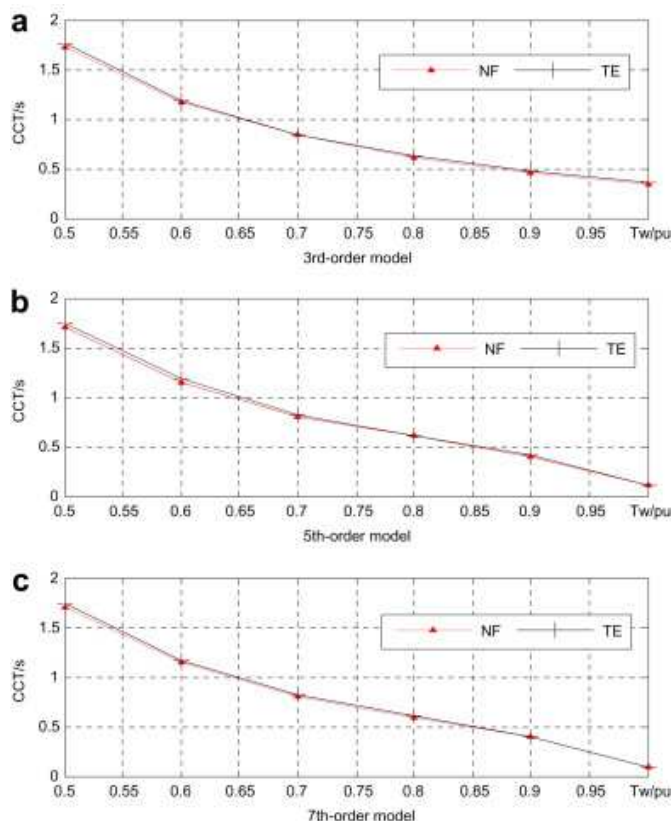
1.7 pav. Blokinė avarijos schema.

Avarija yra modeliuojama tarp generatoriaus ir transformatoriaus (1.7 pav.) ir tada vaizduojami šie parametrai (8 pav.): aktyvi galia, sukimo momentas, generatoriaus greitis, VE menčių greitis. Modeliavimo rezultatai parodė, kad 330 kW VE dirba daug stabiliau negu 3MW VE. Taip pat, 330 kW VE charakteristikų iškraipymai yra kur kas mažesni. Šio tyrimo rezultatai yra priešingi anksčiau aptartų tyrimų rezultatams, kadangi ankstesniuose tyrimuose buvo matyti, jog galingesnės VE dirba stabiliau negu silpnesnės.



1.8 pav. a) 330 kW VE; b) 3 MW VE.

Vėjo elektrinių perduodamos energijos stabilumas yra skaičiuojamas pasitelkiant netiesinių lygčių metodus. Kritinis slopimo laiko koeficientas yra skaičiuojamas trimis būdais (1.9 pav.): naudojant 3, 5 ir 7 eilės modelius. 7 eilės modelis yra apie 3 kartus tikslesnis už 3 eilės modelį. Taigi, kuo daugiau iteracijų yra daroma, tuo modelis bus tikslesnis.



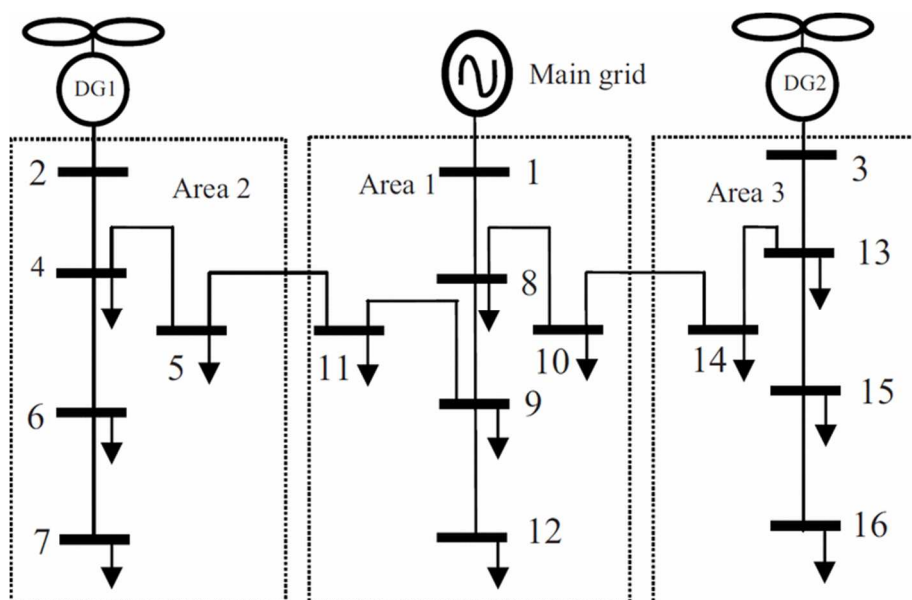
1.9 pav. Kritinis slopimo koeficientas.

Šio darbo pagrindinis tikslas buvo nustatyti vėjo elektrinių perdavimo stabilumo priklausomybę nuo VE menčių deformacijos.

### 1.1.3. Avarijos vėjo elektrinėje su asinchroniniu generatoriumi su narveliniu rotoriumi ir vėjo elektrinėje su dvigubo maitinimo sinchroniniamiu generatoriumi įtaka skirstomojo tinklo stabilumui: statiniai ir dinaminiai aspektai

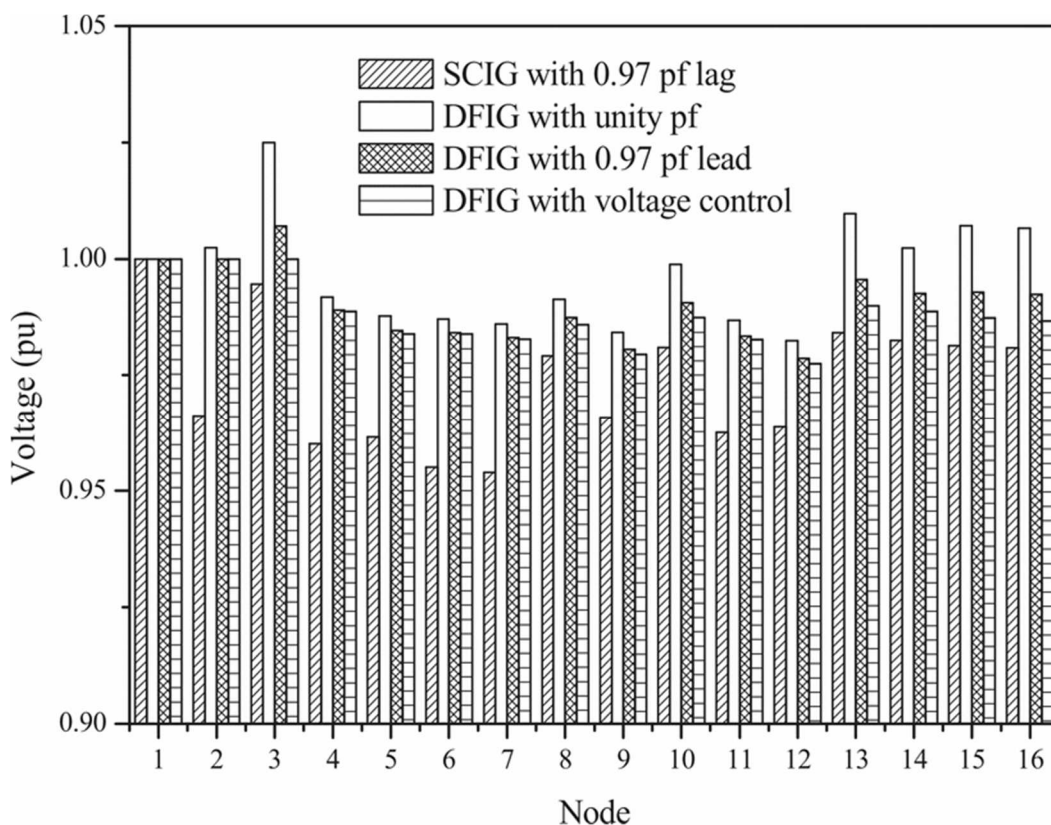
Straipsnyje „Impact of SCIG and DFIG type wind turbine on the stability of distribution networks: Static and dynamic aspects“ [4] yra nagrinėjamas vėjo elektrinės narveliniu rotoriumi ir dvigubo maitinimo generatorių statinis ir dinaminis stabilumas. Šios elektrinės iškart yra sujungtos su 28,7 MW ir 17,3 MVAR apkrova lygiagrečiai. Abi elektrinės generuoja po pusę apkrovos galios (10 pav.).



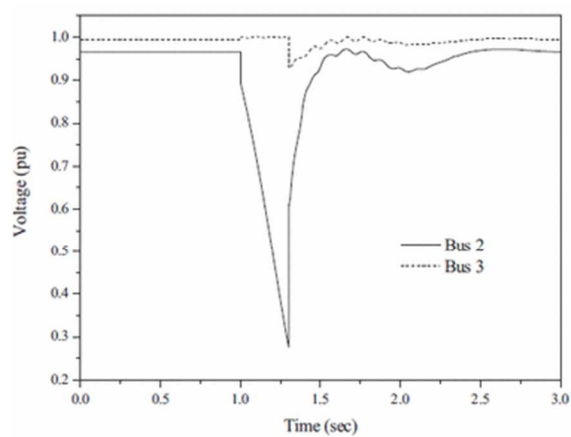


1.10 pav. Vienlinijinė modeliuojamos sistemos schema.

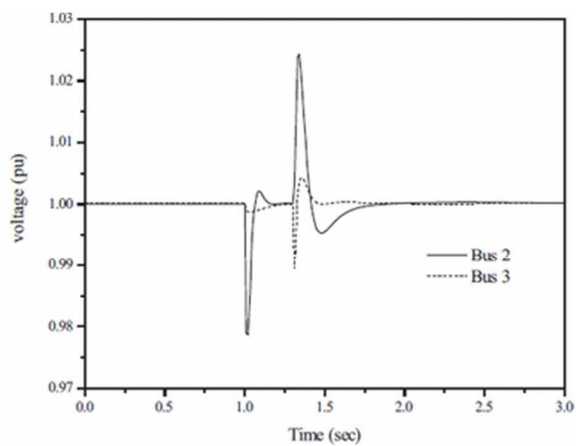
Didelė tyrimo dalis yra skirta apkrovos modeliui, kurios 30 % sudaro aktyvinė apkrova (šildytuvai, viryklės, vandens šildymo katilai), 20 % fluorescencinis apšvietimas ir 50 % indukciniai varikliai. Tačiau tyrimo pagrindinę dalį sudarė stabilumo tyrimas, kurio rezultatai pavaizduoti 1.11-1.17 pav.



1.11 pav. 16 mazgų testuojamos sistemos įtampa.

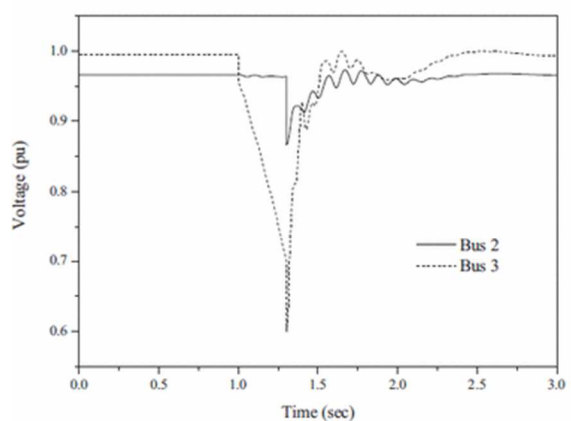


(a)

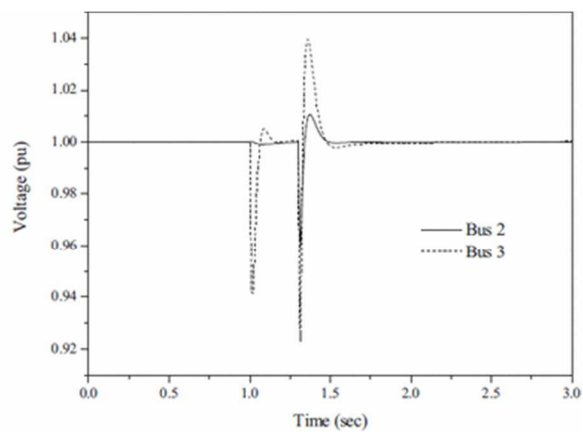


(b)

1.12 pav. 2 ir 3 mazgų įtampa, kai 2 zona yra staiga atjungiamą nuo 1 zonos, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.

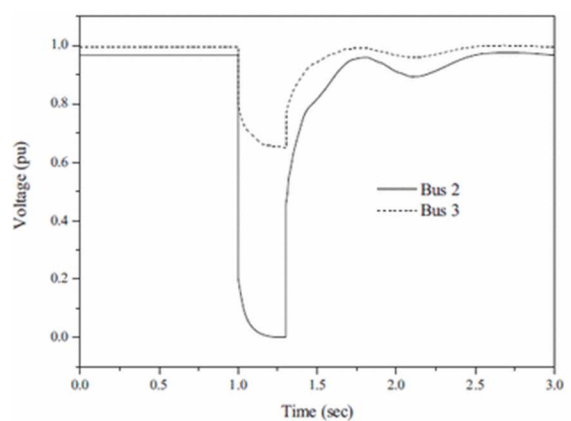


(a)

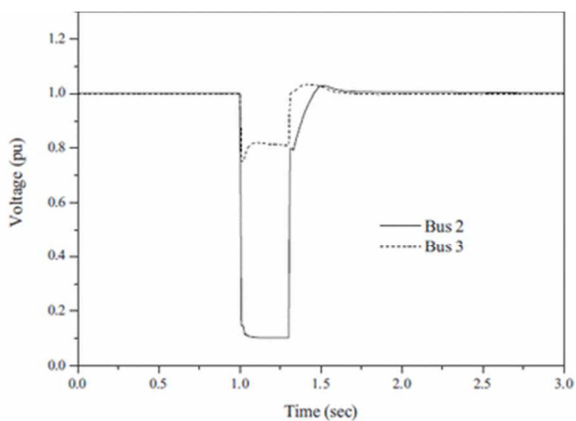


(b)

1.13 pav. 2 ir 3 mazgų įtampa, kai 3 zona yra staiga atjungiamą nuo 1 zonos, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.

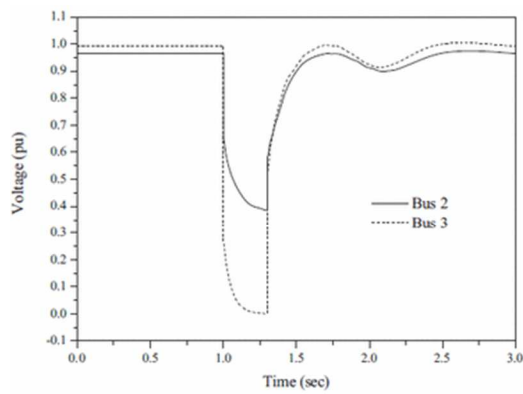


(a)

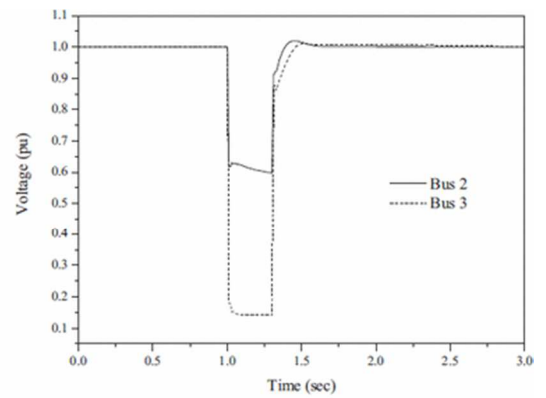


(b)

1.14 pav. 2 ir 3 mazgų įtampa, kai įvyksta trifazis trumpasis jungimas viduryje tarp 2 ir 3 linijos, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.

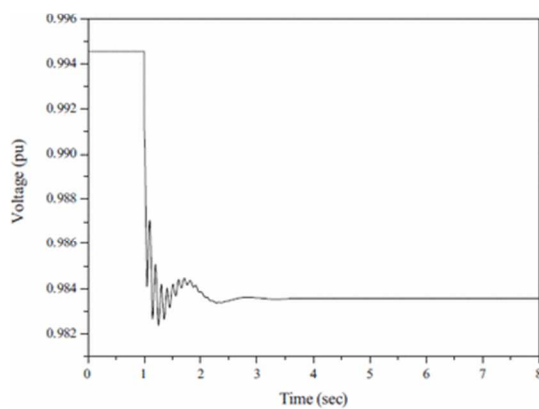


(a)

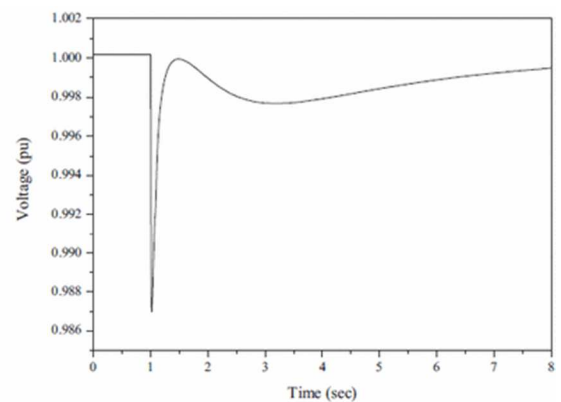


(b)

1.15 pav. 2 ir 3 mazgų įtampa, kai įvyksta trifazis trumpasis jungimas viduryje tarp 1 ir 3 linijos, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.

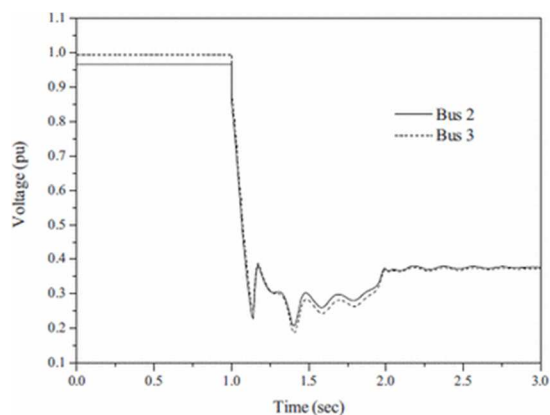


(a)

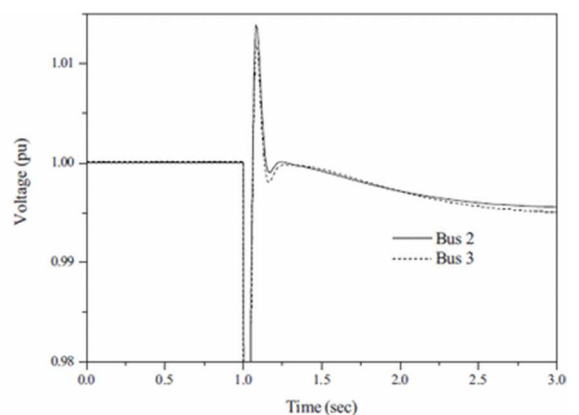


(b)

1.16 pav. 3 mazgo įtampa, kai staiga atsijungia DG1, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.



(a)



(b)

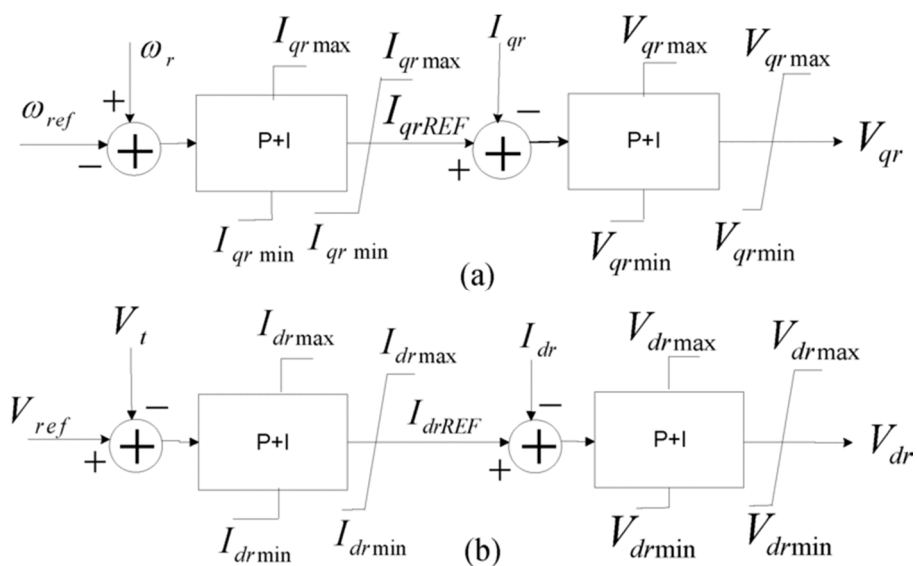
1.17 pav. 2 ir 3 mazgų įtampa, kai darbas vyksta salos režimu, kur a) generatorius narveliniu rotoriumi; b) dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius.

Išvadose matyti, kad asinchroninis generatorius su narveliniu rotoriumi trumpą jungimą ant savo šynų atlaikytų 2,88 s., o dvigubo maitinimo sinchroninis generatorius atlaikytų 3,25 s.

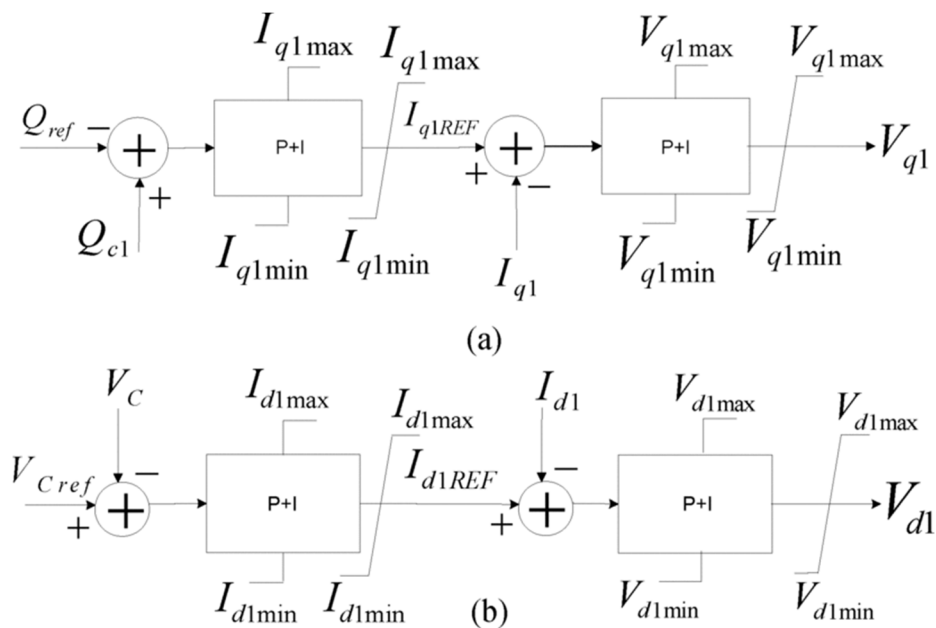
Tai reiškia, kad narvelinio rotoriaus srovė yra didesnė už dvigubo maitinimo sinchroninio generatoriaus.

#### 1.1.4. Nepastovaus greičio vėjo elektrinių generatorių ilgalaikė įtampos stabilumo analizė

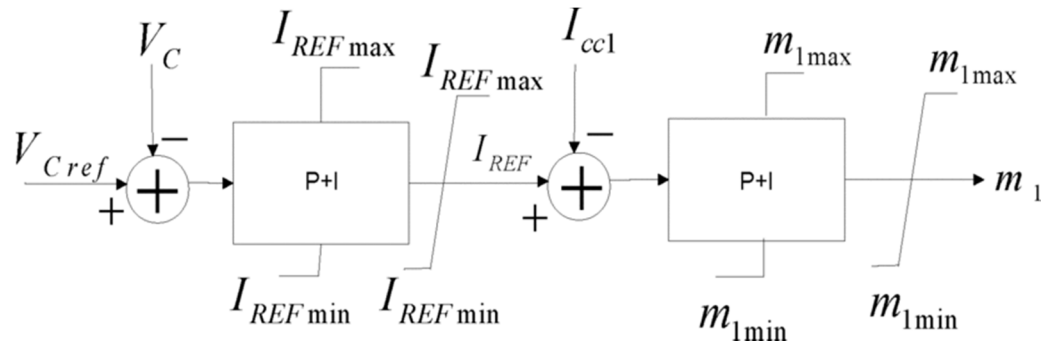
„Long-Term Voltage Stability Analysis of Variable Speed Wind Generators“ [5] moksliniame straipsnyje yra nagrinėti asinchroniai VE generatoriai narveliniu rotoriumi, dvigubo maitinimo sinchroniai generatoriai ir pilno keitiklio sinchroniai generatoriai. Šiame darbe taip pat labai daug dėmesio skiriama detalaus keitiklio modelio sukūrimui (18-20 pav.).



1.18 pav. Dvigubo maitinimo sinchroninio generatoriaus dinaminio modelio valdymo grandinė, kur a) aktyvios galios ir greičio valdymo grandinė; b) gnybtų įtampos valdymo grandinė.

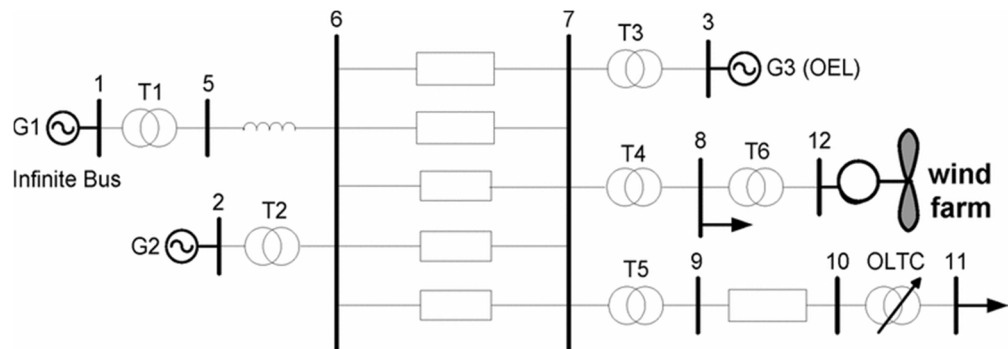


1.19 pav. Dvigubo maitinimo sinchroninio generatoriaus dinaminio modelio tinklo pusės valdymo grandinė, kur a) papildomos reaktyvios galios palaikymo valdymo grandinė; b) nuolatinės įtampos jungties valdymo grandinė.

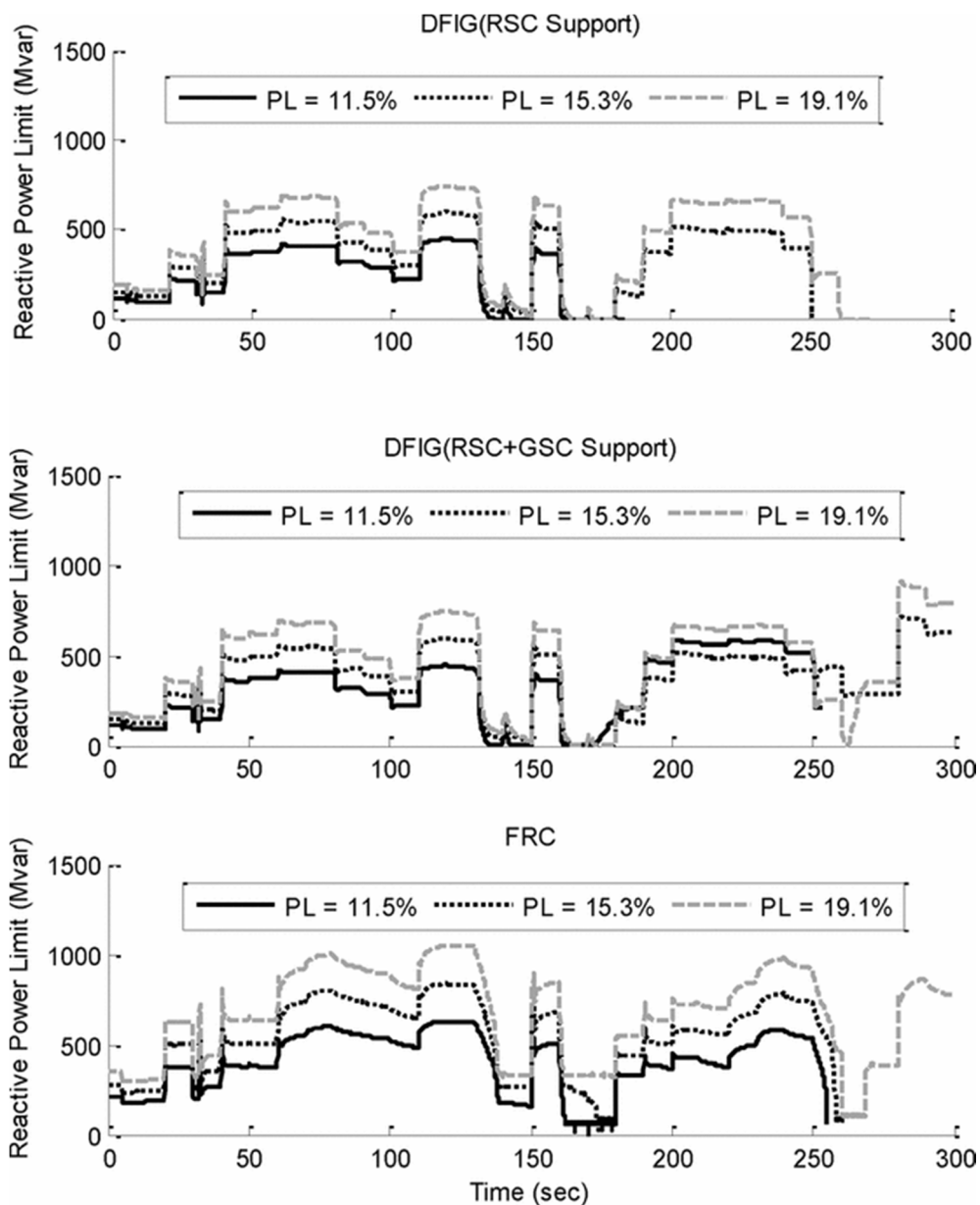


1.20 pav. Keitiklio dalies valdymo grandinė.

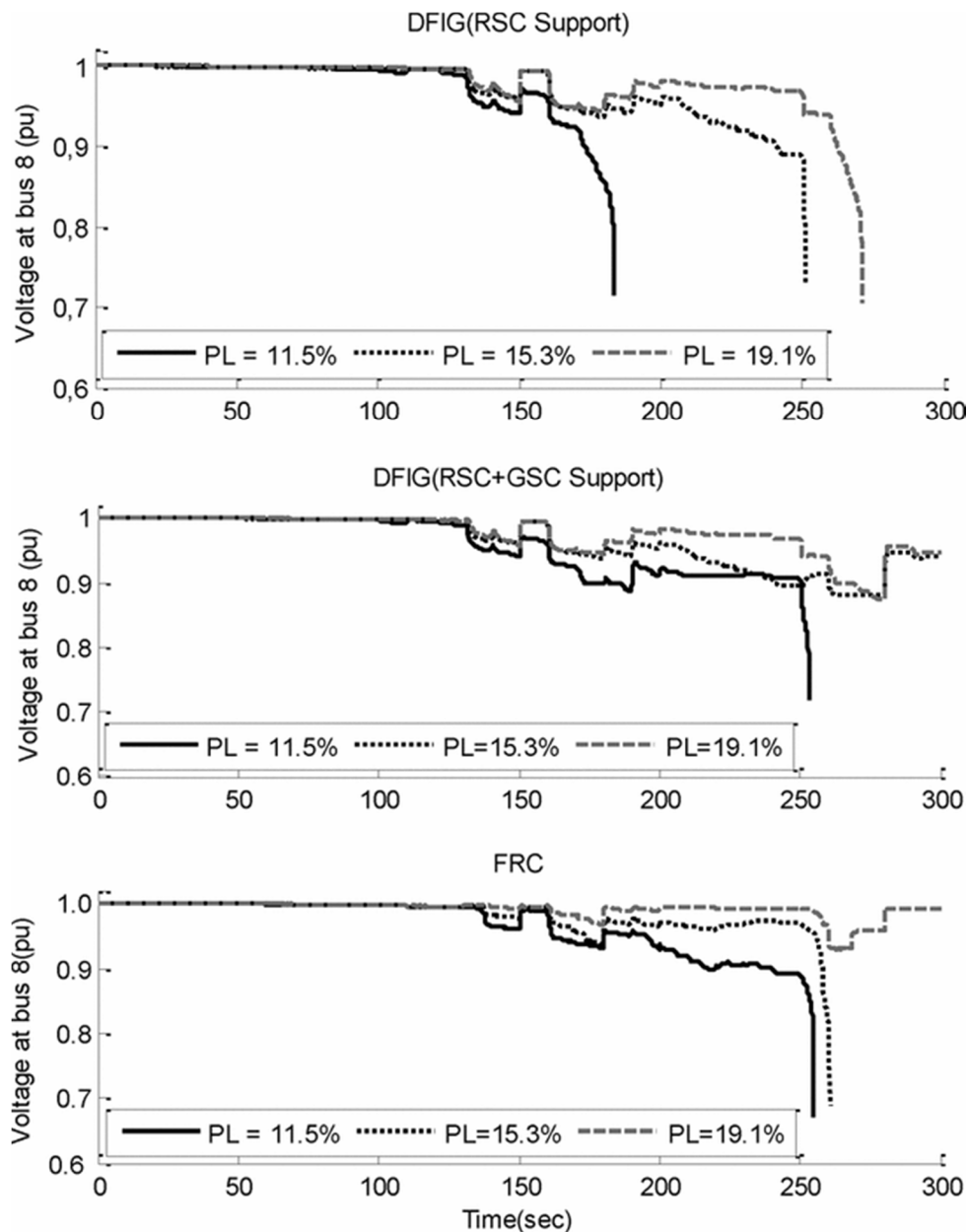
Tyrimo metu yra tiriamas sinchroninių generatorių įtampų stabilumas, tikrinamas P ir Q galių valdymo ribos, tikrinama galimybė gerinti tinklo įtampos stabilumą naudojant tinklo pusės keitiklį ir dvigubo maitinimo generatorių. Taip pat tiriama generacijos darbo savybių priklausomybė nuo VE išsiskverbimo lygio (kiek procentų generuojamos galios sudaro VE generacija). Tiriama grandinė, pavaizduota 21 pav. yra gana sudėtinga, primenanti realią sistemą.



1.21 pav. Tiriama grandinė, kur pagrindiniai tiriami mazgai yra 8 ir 11.



1.22 pav. Reaktyvios galios ribos Mvar, kai VE įsiskverbimo lygis yra skirtingas ir kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su rotoriaus pusės keitikliu; kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su rotoriaus pusės ir tinklo pusės keitikliu; kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su pilnu keitikliu.



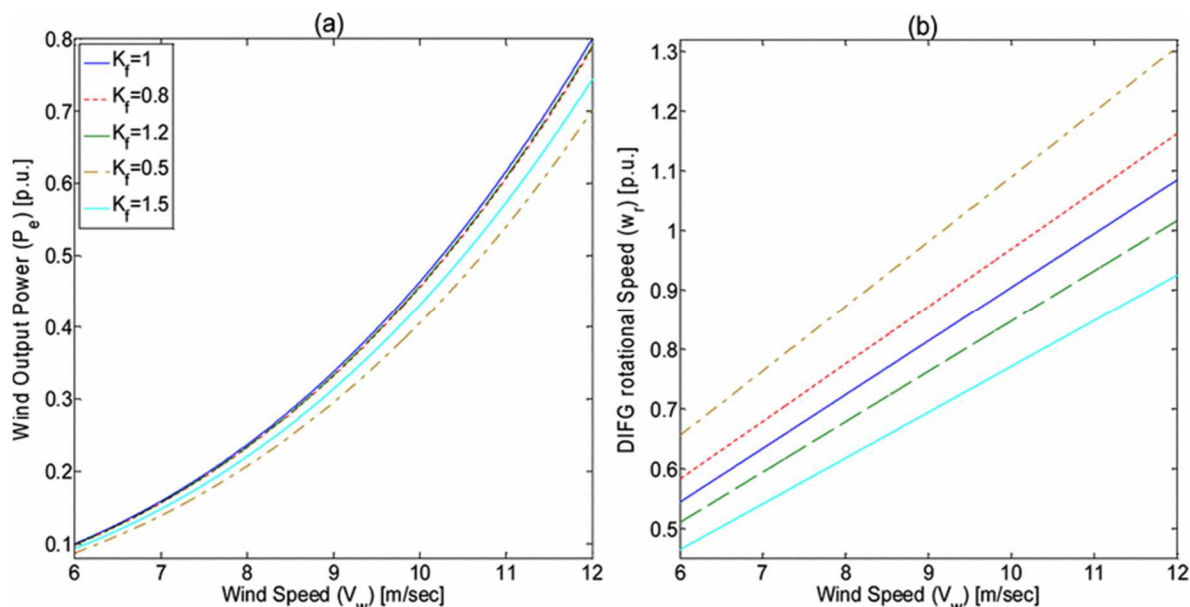
1.23 pav. 8 mazgo įtampa, kai VE įsiskverbimo lygis yra skirtingas ir kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su rotoriaus pusės keitikliu; kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su rotoriaus pusės ir tinklo pusės keitikliu; kai veikia dvigubo maitinimo generatorius su pilnu keitikliu

Iš šių tyrimų rezultatų matyti, kad .pradedama mažėti, kai keitiklis yra prijungtas tik prie rotoriaus. Mazgo įtampa yra išlaikoma darbinė ilgiausiai yra tada, kada vėjo elektrinės rotorius ir statorius yra prijungtas prie keitiklių, kadangi tuomet vėjo elektrinės darbas yra geriau reguliuojamas ir ją galima išlaikyti stabilia didesniame trikdžių diapazone.

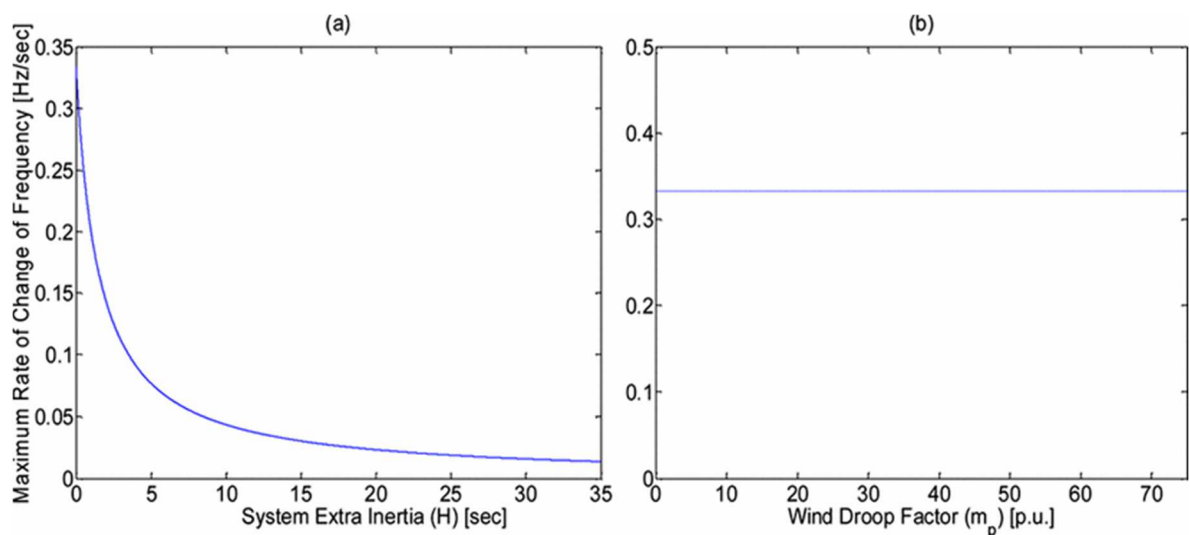
Pilno keitiklio vėjo elektrinė yra šiek tiek paprastesnės konstrukcijos už vėjo elektrinę, kur stovi du atskiri keitikliai. Pilno keitiklio vėjo elektrinė veikia taip, kaip ją suka vėjas, o vėliau (išėjime) jos parametrai (įtampa, dažnis) yra pakeičiami į reikiamus, naudojant tinklo sekimo funkciją.

### 1.1.5. Mikrotinklo / silpno tinklo įrankių, skirtų valdyti dvigubo maitinimo sinchroninius generatorius turinčias vėjo elektrines stabilumo analizė ir avarijos

Tyrime „Analysis and Impacts of Implementing Droop Control in DFIG-Based Wind Turbines on Microgrid/Weak-Grid Stability,, [6] yra tiriama VE su dvigubo maitinimo sinchroniniu generatoriumi generuojamos galios ir rotoriaus apsisukimų kritimas prie skirtingų vėjo greičių ir esant skirtingoms maksimalaus sukimo momento išnaudojimo faktoriaus vertėms. (1.24 pav.)

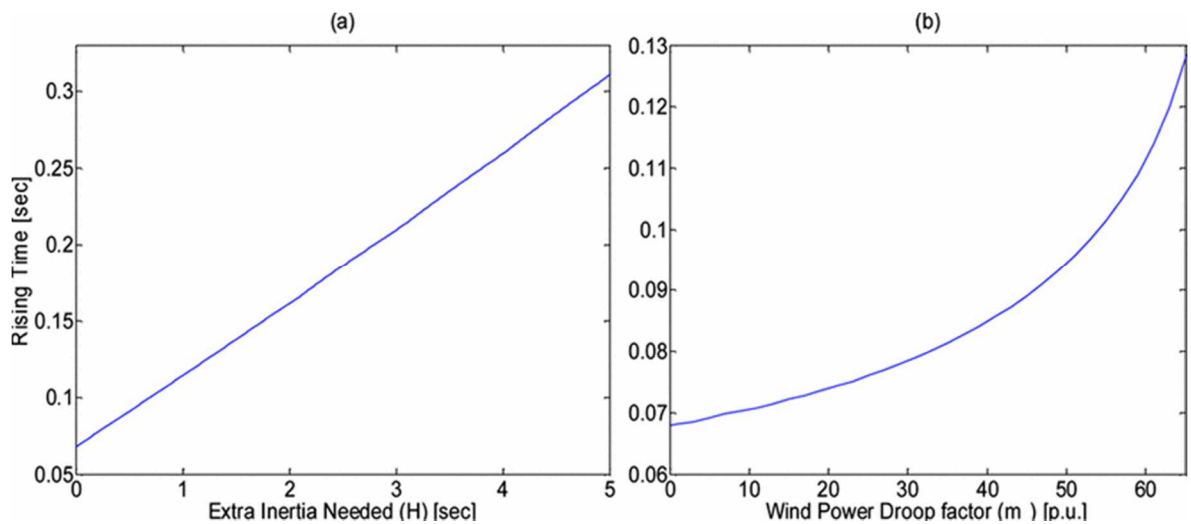


1.24 pav. a) VE generuojama galia; b) VE sukimosi dažnis.



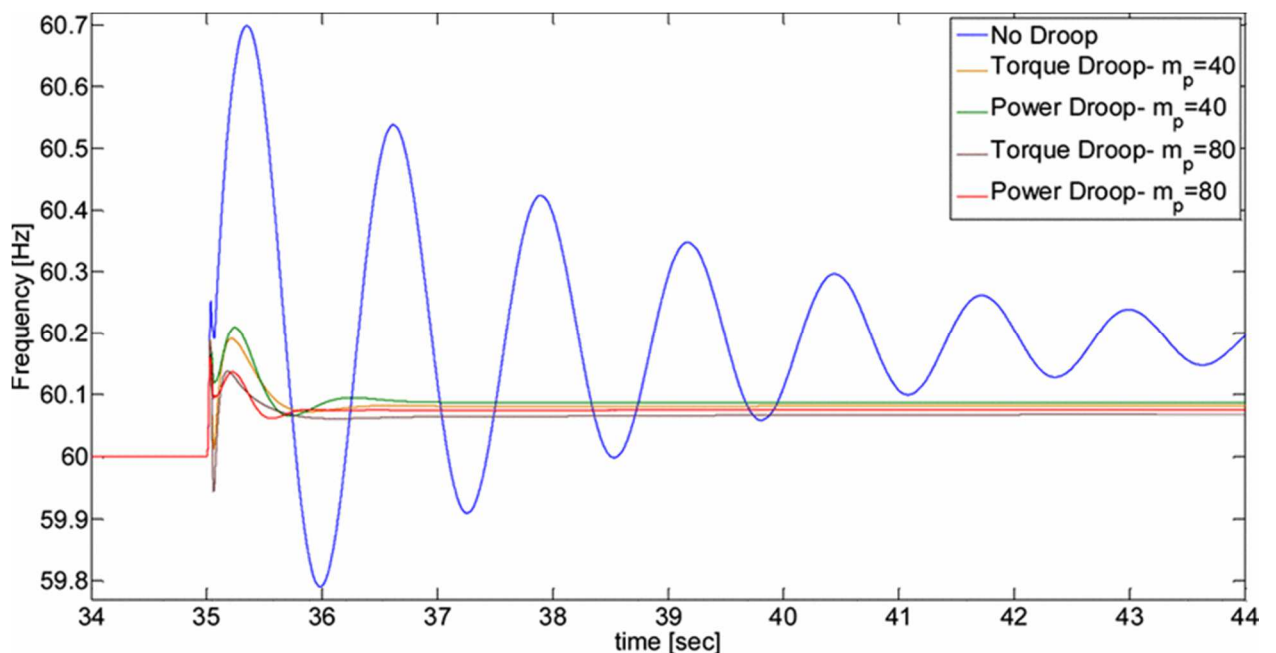
1.25 pav. a) sistemos maksimalus dažnio pokytis, jeigu pakinta apkrovos kitimo žingsnis b) VE naudingumas



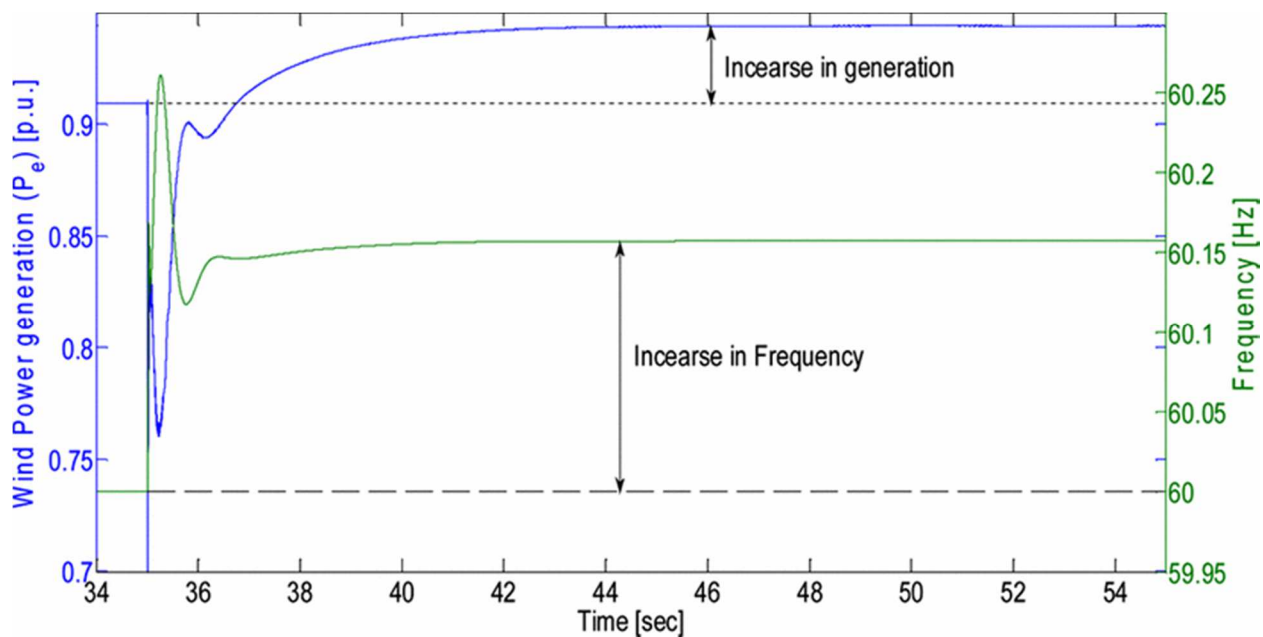


1.26 pav. Sistemos dažnio kilimo laikas, jeigu pakinta apkrovos kitimo žingsnis a) su papildoma inercija; b) su vėjo galios kritimu.

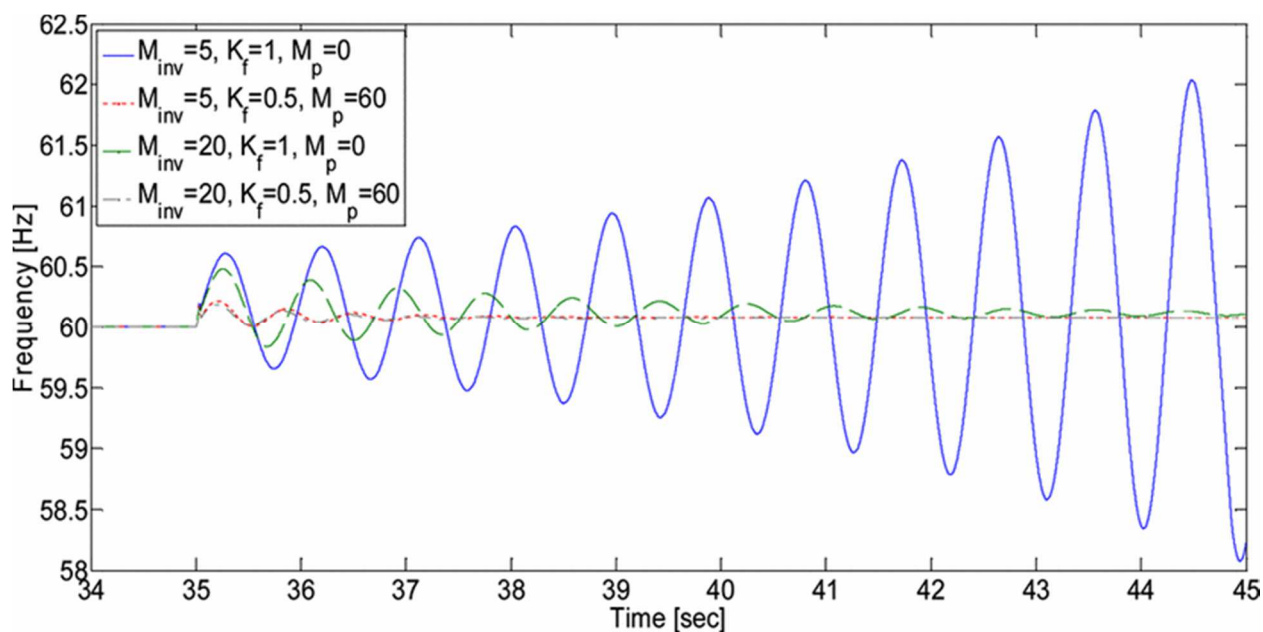
Šiame darbe taip pat yra skaičiuojamas ir statinis stabilumas 60 Hz sistemoje. Skaičiuojama naudojantis VE modeliu, kreipiant dėmesį į apsisukimų, aktyvinės galios kritimus, skaičiuojant normalius ir avarinius režimus. Stabilumas skaičiuojamas naudojant tą pačią VE, tačiau parenkant kelis skirtingus vėjo greičius: 9,5; 10; 12; 14 m/s. Atlikus tyrimus išsiaiškinta, kad vėjo kritimas teigiamai veikia sistemos stabilumą, be to vėjo kritimas sukelia galios kritimą generatoriuje ir inverteryje.



1.27 pav. Dažnio kitimas, kai vėjo greitis yra 13 m/s ir generatoriaus išnaudojims  $K_f=0.5$



1.28 pav. Dažnio ir vėjo galios generavimo atsakas, kai vėjo greitis yra 13 m/s.  $K_f=1.5$ ;  $m_p=40$

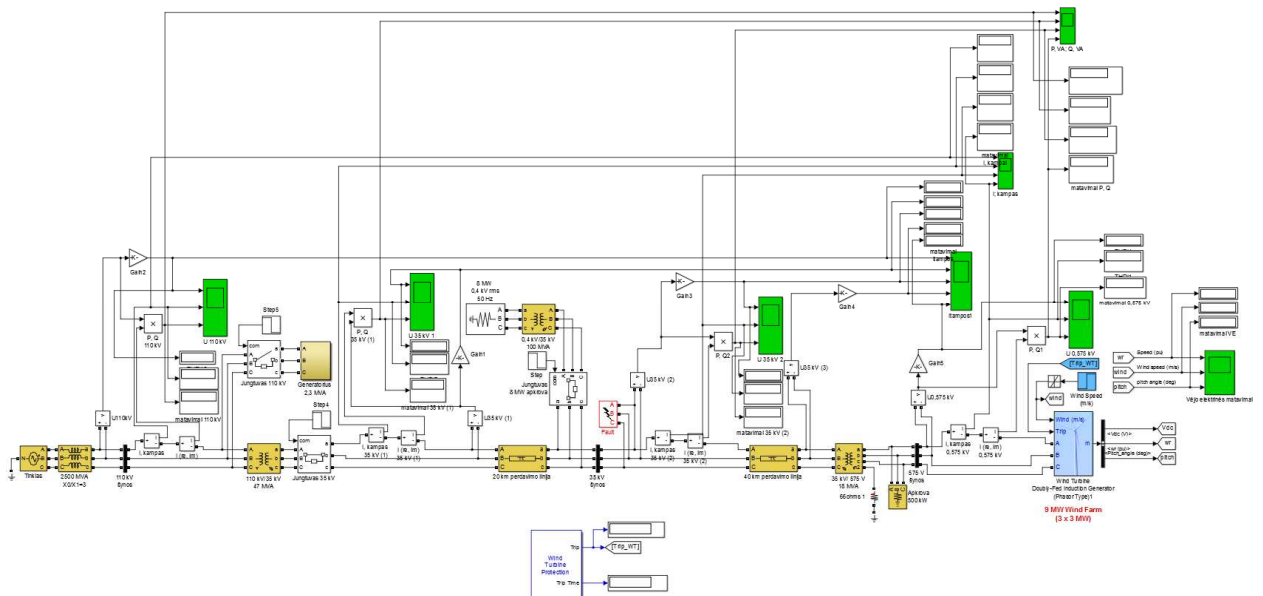


1.29 pav. Dažnio ir vėjo galios generavimo atsakas, kai vėjo greitis yra 13 m/s.  $K_f=1.5$ ;  $m_p=40$

1.29 paveikslėlyje matyti, kad vėjo elektrinė tampa nestabili prie 13 m/s ir  $K_f=1.5$ ;  $m_p=40$ .

## 2. Vėjo elektrinių modeliavimo metodinė dalis ir rezultatai

Sausumos vėjo elektrinės palyginimo su jūrine vėjo elektrine tyrimas yra atliekamas naudojant dvigubo maitinimo vėjo elektrinės fazorių modelį, kuris yra siūlomas tarp programos MatLab paketo šablonų. Šis modelis pasižymi tuo, kad yra modeliuojamas gana paprastai: reikia įvesti vėjo elektrinės parametrus (galią, įtampą, rotoriaus ir statoriaus varžas, keitiklio parametrus bei vėjo elektrinės mechaninius parametrus, tokius kaip menčių pokrypio maksimalus kampas, inerciškumas ir t.t.). Taip pat modelyje yra jau paruošta VE apsauga nuo viršįtampių ir minimalios įtampos, maksimalios srovės apsauga. Modelyje, kuris yra naudojamas šiame darbe, yra pridėta įvairiose vietose apkrovų, kurių pagalba galima tirti VE darbą su skirtingomis apkrovomis prijungtose skirtingose tinklo vietose. Taip pat čia yra pridėti blokai, leidžiantys stebėjimui tinklo srovės, įtampas, fazes, galių pasiskirstymą, vėjo elektrinės parametrus ir darbą. Blokas *Fault* gali imituoti trumpą jungimą linijoje. Su trifaziu jungtuvu apkrovą galima prijungti arba atjungti nuo tinklo pasirinktu momentu.



2.1 pav. Dvigubo maitinimo vėjo elektrinė su prie jos prijungtu tinklu.

### 2.1. Nominalūs parametrai:

Šynų 575 kV įtampa – 575 V;

Apkrova 500 kV – 500 kW;

Šynų 35 kV įtampa – 35 kV;

Apkrova 8 MW – 8 MW;

Šynų 110 kV įtampa – 110 kV;

VE galia –  $3 \cdot 3/0,9 \text{ MW} = 8,1 \text{ MW}$ ;

110/35 kV transformatoriaus galia – 47 MVA;

0,4/35 kV transformatoriaus galia – 100 MVA;

35/0,575 kV transformatoriaus galia – 18 MVA;

### 2.1.1. Jūrinės VE perdavimo (kabelinės) linijos parametrai

Jūrinės vėjo elektrinės parametrai yra labai panašūs į sausumos vėjo elektrinės. Paprastai tarp jų pagrindiniai skirtumai, įtakojantys vėjo elektrinių darbą, yra skirtingas vidutinis ir maksimalus vėjo greičiai (vietovės šiurkštumas) ir būdas, koku vėjo elektrinė yra prijungta prie tinklo. Kadangi jūrinės vėjo elektrinės yra pastatytos vandenyje, todėl jos prie tinklo gali būti prijungtos tik kabeliu. Kabelių parametrai yra labai įvairūs, priklausantys nuo skerspjūvio, izoliacijos varžos, fazių skaičiaus viename kabelyje, atstumo tarp kabelių, paklotų jūros dugne. Šiam modeliavimui yra parinkti konkretaus 35 kV aliuminio 3 x 150 mm<sup>2</sup> gyslų kabelis. [11] Kabelinės linijos ilgis yra parenkamas 40 km ilgio todėl, kad vėjo elektrinės jūroje statomos maždaug bent 10 km atstumu nuo kranto. Kad linijos įtaka būtų didesnė, ji yra parenkama gana ilga, tačiau ne per ilga, kadangi toliau vėjo elektrinių statyti nelabai apsimoka.

$$L_{\text{kabelio}}=40 \text{ km} \quad (1)$$

Pasirinkto kabelio varža  $R_{\text{kabelio}}$ , induktyvumas  $L_{\text{kabelio}}$  ir talpa  $C_{\text{kabelio}}$  yra parodyti žemiau:

$$R_{\text{kabelio}}= 0.265 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (2)$$

$$L_{\text{kabelio}}=\frac{0.118 \text{ } \Omega/\text{km}}{2\pi f} = \frac{0.118 \text{ } \Omega/\text{km}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz}} = 0.376 \cdot 10^{-3} \text{ H/km} \quad (3)$$

$$C_{\text{kabelio}}= 0.20 \text{ } \mu\text{F}/\text{km} \quad (4)$$

### 2.1.2. Sausumos VE perdavimo (oro) linijos parametrai:

Sausumos vėjo elektrinių parametrai yra kur kas geresni negu kabelio, kadangi čia tarp fazių atstumas yra žymiai didesnis, todėl fazės mažiau veikia viena kitą. Taip pat atstumas iki žemės irgi yra didelis, todėl talpuminės srovės oro linijose yra apie žymiai mažesnės negu kabelinėse linijose.

Kadangi oro linijų parametrų dispersija yra mažesnė už kabelinių linijų, todėl oro linijų parametrus galima apskaičiuoti (tai yra pakankamai tikslu ir nereikia konkrečių katalogų). Oro linijos laidininku yra pasirinkti aliuminio 150 mm<sup>2</sup> skersmens laidai, kurie yra panašūs savo aktyvine varža yra kabelinės linijos kabelio varžą. [12]

Perdavimo linijos ilgis yra parenkamas kaip ir kabelinės linijos ilgis:

$$L_{\text{oro linija}}=40 \text{ km} \quad (5)$$

Atstumas tarp fazinių laidininkų:

$$D=2 \text{ m} \quad (6)$$

Laidininko spindulys:

$$r = \sqrt{\frac{150\text{mm}^2}{\pi}} \cdot 10^{-3} = 6.912 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (7)$$

Oro linijos aktyvinė varža:

$$R_{\text{kabelio}} = 0.257 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (8)$$

Oro linijos talpa [13]:

$$C_{\text{oro linijos}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,000589 \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{6,912 \cdot 10^{-6}}\right)} = 1,109 \text{ nF/km} \quad (9)$$

Oro linijos induktyvumas:

$$L_{\text{oro linijos}} = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r}\right) = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2}{6,912 \cdot 10^{-3}}\right) = 1.133 \cdot 10^{-6} \text{ H} \quad (10)$$

Čia matyti, kad oro linijos reaktyvios varžos yra smarkiai mažesnės už kabelio varžas. Tačiau oro linijos bendra reaktyvi varža yra talpinio pobūdžio.

### 2.1.3. Vėjo elektrinės vidutinio vėjo greičio nustatymas

Regionas	Aukštis, m	
	10	50
Biržai	3,57	4,81
Telšiai	3,12	4,21
Šiauliai	2,87	3,87
Panevėžys	3,34	4,50
Klaipėda	4,55	6,14
Vėžaičiai	3,42	4,61
Laukuva	3,62	4,89
Utena	2,64	3,57
Raseiniai	3,96	5,34
Šilutė	3,84	5,18
Ukmergė	3,78	5,10
Kaunas	3,98	5,31
Kybartai	3,30	4,45
Vilnius	3,45	4,66
Varėna	2,52	3,40
Lazdijai	3,38	4,57

2.2 pav. Lietuvos regionų daugiamečių vėjo greitis (m/s) 10 ir 50 m aukštyje. [8]

2.1 lentelė. Žemės paviršiaus šiurkštumo klasės ir laipsnio rodikliai.

Paviršiaus tipas	Paviršiaus šiurkštumas	Laipsnio rodiklis n
Vandens paviršius	0	0,01
Visiškai atvira vietovė su lygiu paviršiumi.	0,5	0,077
Atvira, retomis kalvomis apsupta žemės ūkio vietovė, be tvorų ir medžių su retai pasitaikančiais pastatais	1	0,12
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais užimanti maždaug 0,125 kvadratinio km.	1,5	0,145
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais užimanti maždaug 0,25 kvadratinio km.	2	0,16
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais užimanti maždaug 1 kvadratinio km.	2,5	0,2
Kaimo gyvenvietė, nedideli miesteliai, sodai ir miškai	3	0,28

Pagal 2 pav. duomenis vidutinis vėjo greitis Lietuvoje 50 m aukštyje yra 4,66 m/s. Vėjo greitį 100 m aukštyje (VE aukštis) galima perskaičiuoti pagal 1 formulę naudojant 1 lentelę (pasirenkant vidutinę vietovę – tarp laukų įsiterpusią kaimo vietovę su namais ir sodais, užimančią apie 0,25 km<sup>2</sup>):

$$v_2 = v_1 \cdot (h_2 / h_1)^n = 4,66 \cdot \left(\frac{100}{50}\right)^{0,16} = 5,207 \text{ m/s} \quad (11)$$

$v_2$  – vėjo greitis skaičiuojamame aukštyje;

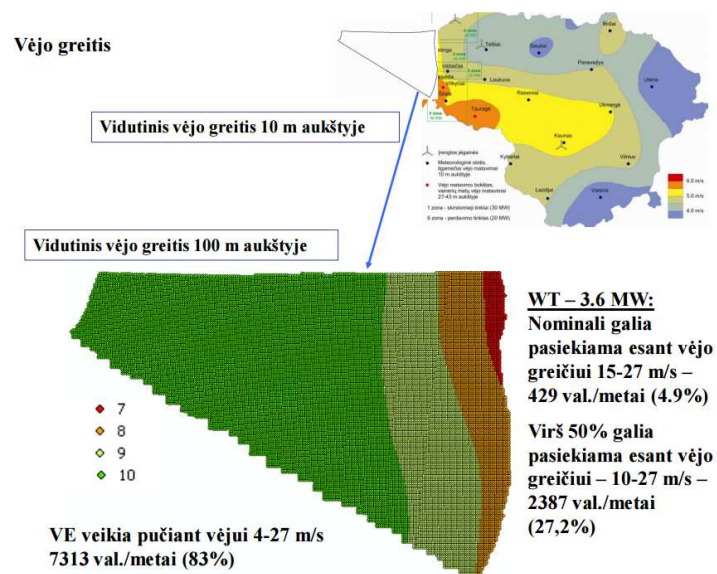
$v_1$  – vėjo greitis žinomame aukštyje;

$h_1$  – žinomo vėjo greičio aukštis;

$h_2$  – aukštis, kuriame yra skaičiuojamas ieškomasis vėjo greitis;

Taigi, vidutinis sausumos vėjo greitis bus laikomas 5,207 m/s.

Jūros vidutinis vėjo greitis yra parenkamas pagal 3 pav.



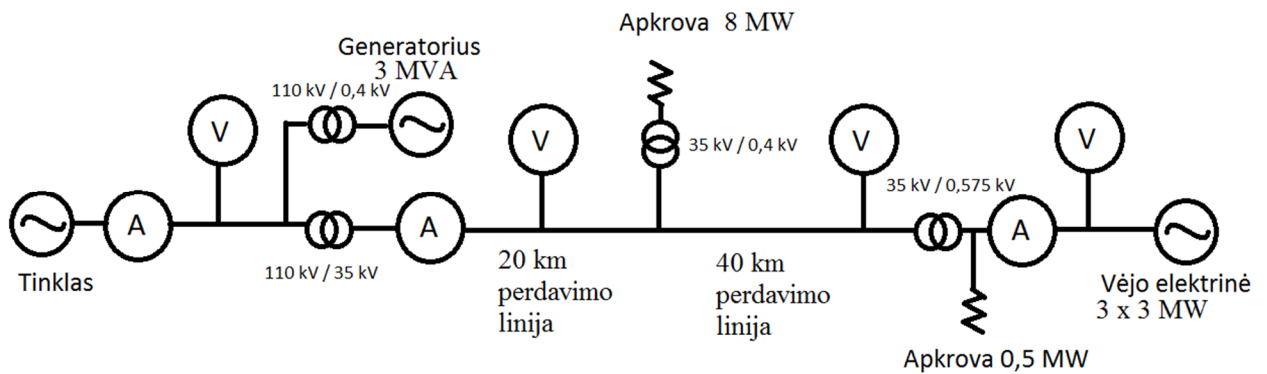
2.3 pav. Vidutinis vėjo greitis Baltijos jūroje. [9].

Vidutinis vėjo greitis Baltijos jūroje 100 metrų aukštyje yra 7-10 m/s. Modeliuojant bus imamas 9 m/s vėjo greitis.

Jūrinė VE yra prijungta 40 km linija prie veikiančio tinklo su savo elektrinėmis ir vartotojais. Sausumos VE yra prijungta prie tinklo taip pat 40 km ilgio oro linija. Jos vietovėje pučia vidutis 5,207 m/s vėjo greitis.

### 1.1. Kontrolinio modeliavimo rezultatai:

Kontrolinio modeliavimo metu yra nustatomi kontroliniai parametrai, pagal kuriuos yra lyginami tolesni modeliavimo rezultatai. Kontrolinio modeliavimo rezultatai yra sukelti į 1 ir 4 priedus.



2.4 pav. Modeliuojamo tinklo principinė schema.

Modeliuojama vėjo elektrinė maitina 0,5 MW apkrovą ir 8 MW apkrovą, esančią už 40 km. 20 km linija yra oro linija. 40 km linija jūrinės elektrinės modelyje yra modeliuota kaip kabelinė linija, o sausumos vėjo elektrinės modelyje yra modeliuota kaip oro linija.

2.2 lentelė. Šynų įtampos kontrolinio modeliavimo metu.

	Jūrinė VE	Sausumos VE
$U_{110 \text{ kV šynų}}, \text{ V}$	110203.67	110193,22
$U_{35 \text{ kV šynų (1)}}, \text{ V}$	35820.07	35814,65
$U_{35 \text{ kV šynų (2)}}, \text{ V}$	35443.80	35182,31
$U_{35 \text{ kV šynų (3)}}, \text{ V}$	35675.79	35113,07
$U_{0,575 \text{ kV šynų}}, \text{ V}$	579.69	575,77

Kontrolinio modeliavimo metu matyti, kad jūrinės VE įtampos yra gaunamos aukštesnės (2.2 lentelė), o sausumos VE įtampos yra kiek žemesnės. Taip yra dėl to, kad kabelio talpuminė varža yra didesnė už oro linijos. Taip pat sausumos vėjo elektrinė dirba prie mažesnio vėjo greičio, todėl generuoja mažiau galios.

2.3 lentelė. Srovės ir jų kampai

	Jūrinė VE	Sausumos VE
$I_{110 \text{ kV dalis}}, \text{ A}$	$92,65e^{27,23^\circ}$	$106,97e^{23,20^\circ}$
$I_{35 \text{ kV dalis (1)}}, \text{ A}$	$227e^{43,14^\circ}$	$265,64e^{35,58^\circ}$
$I_{35 \text{ kV dalis (2)}}, \text{ A}$	$49,80e^{-156,35^\circ}$	$16,22e^{-75,94^\circ}$
$I_{0,575 \text{ kV dalis}}, \text{ A}$	$6802,78e^{-124,35^\circ}$	$1046,97e^{-119,85^\circ}$

Srovių pasiskirstymas jūrinėje ir sausuminėje vėjo elektrinėje taip pat yra skirtingas. Jis yra pateiktas 2.3 lentelėje. Kadangi apkrova yra 8 MW ir 0,5 MW, o vėjo elektrinės maksimali galia yra:



$$P_{VE} = n \cdot P_{gen} \cdot \eta = 3 \cdot 3 \cdot 0,9 = 8,1 \text{ MW} \quad (12)$$

$P_{VE}$  – vėjo elektrinės maksimali galia

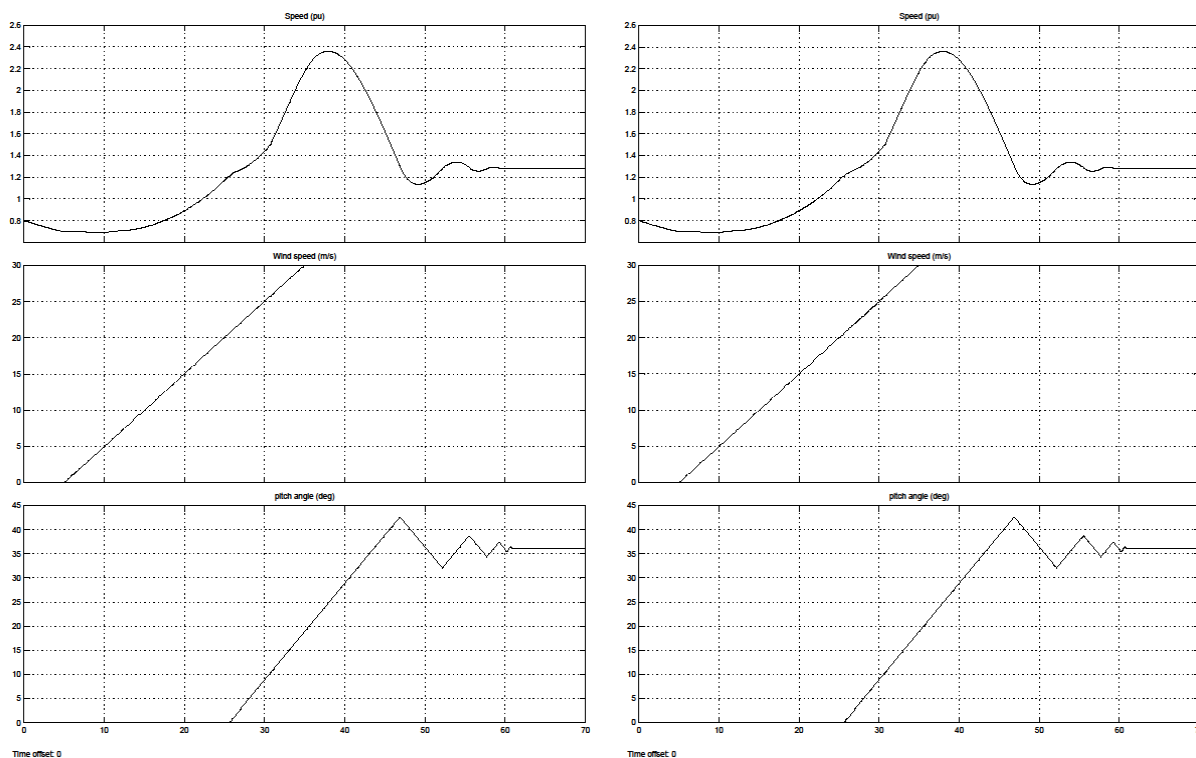
$n$  – vėjo elektrinių skaičius

$\eta$  – vėjo elektrinės naudingumo koeficientas (elektrinės dalies)

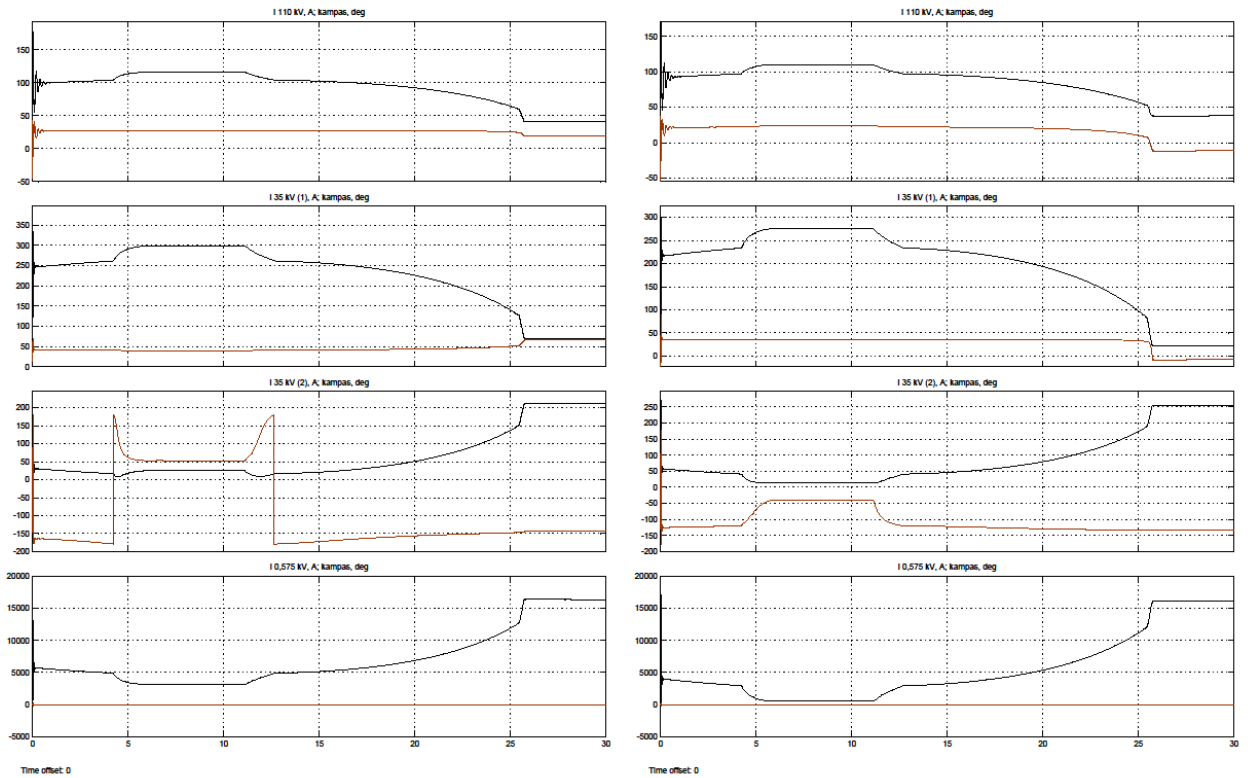
Kadangi VE yra silpnesnė už apkrovą, todėl VE galios nepakanka maitinti apkrovai. Dėl to atsiranda galios poreikis iš tinklo. Kadangi šiame modelyje srovės dydis yra parodomas absoliutinio dydžio (yra visada teigiamas), todėl srovės kryptį parodo tik srovės kampas. Iš 2.3 lentelės matyti, kad sausumos VE srovių kampai yra mažesni už jūrinės VE. Taip yra dėl reaktyvių varžų skirtumo tarp jūrinio kabelio ir oro linijos.

## 1.2. Staigus vėjo gūσιο įtaka vėjo elektrinėms

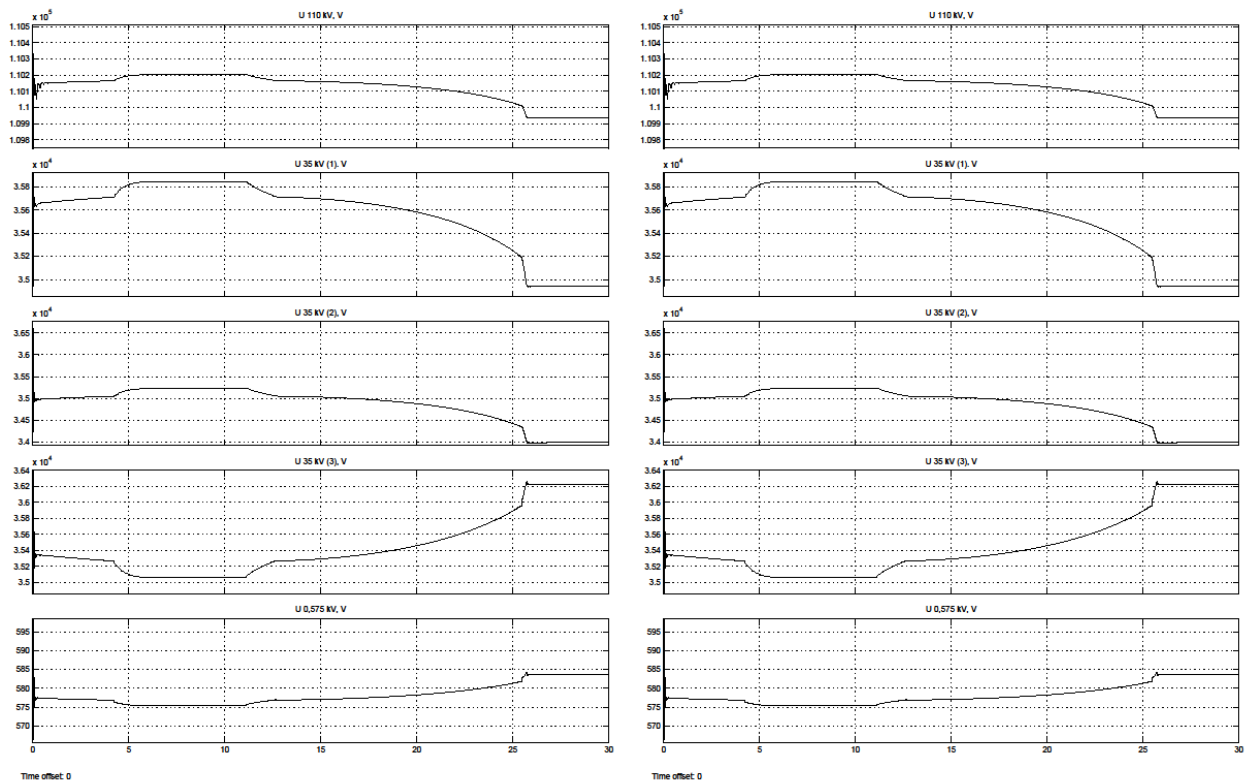
Vėjo elektrinės vengia staigių vėjo gūsių, kadangi jos paprastai sukelia įtampos švytavimus. Šio modeliavimo metu yra sumodeliuotas staigus vėjo gūsis, kada vėjas per 5 sekundes pasikeičia nuo 0 m/s iki 30 m/s. Šio modeliavimo rezultatai yra pavaizduoti 2 ir 5 prieduose. Nagrinėjama schema yra tokia pati kaip 2.4 pav.



2.5 pav. Vėjo elektrinės darbas vėjo gūσιο metu: generatoriaus greitis, santykiniais vienetais; vėjo greitis, m/s; VE menčių pakreipimo kampas, laipsniais.



2.6 pav. Jūrinēs vējo elektrinēs ir sausumos vējo elektrinēs srovēs ir kampai.



2.7 pav. Jūrinēs ir sausumos VE ītampas.

Tiek jūrinē vējo elektrīnē, tiek sausumos vējo elektrīnē atsijungia praējus 30,7 sekundēs dēļ per didelēs srovēs. Nors veiksnīu, veikiančīu abi vējo elektrīnes, suveikimo laikas yra

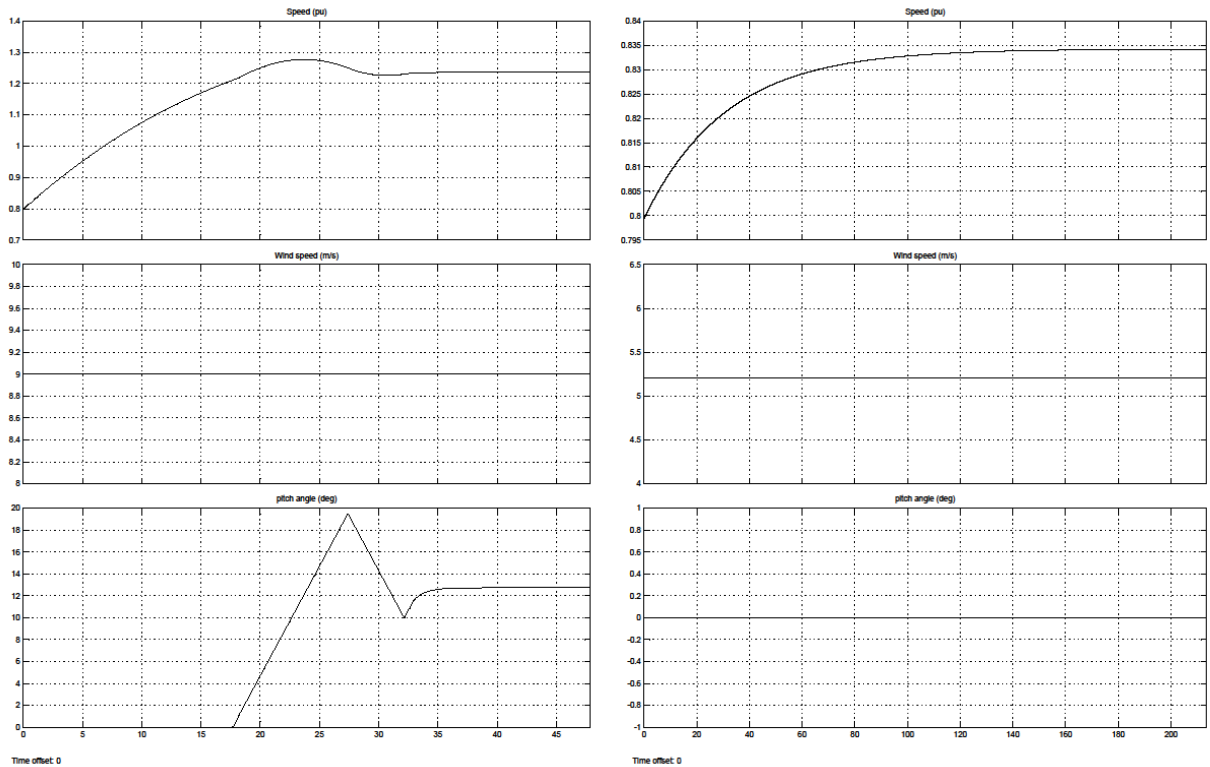
panašus, tačiau jūrinės vėjo elektrinės srovės yra didesnės už sausumos vėjo elektrinės (2.6 paveikslėlis). Jūrinės VE įtampos yra didesnės už sausumos VE (2.7 pav.). Jūrinėje vėjo elektrinėje nuo 4,23 sekundės iki 12,648 sekundės prie 35 kV dalyje prie apkrovos srovės kampas pasikeičia ir pralenkia vėjo elektrinės srovės kampą, o paskui vėl grįžta atgal ir atsilieka. Taip yra dėl vėjo elektrinės darbo kreivės, kur pradžioje VE generatorius yra smarkiai stabdomas, bet 9 sekundę jis pradeda greitėti. Kai generatoriaus sūkių viršija 2,38 karto savo nominalius sūkius, generatoriaus sūkių pradeda mažėti, tačiau nusistovi ties 1,28 karto didesniais negu nominaliais sūkių (2.5 pav.). Dėl to vėjo elektrinė generuoja per didelę galią, generuojama srovė viršija nominalią ir vėjo elektrinė 30,7 sekundę atsijungia nuo tinklo.

Sausumos vėjo elektrinė į vėjo trikdžius reaguoja panašiai, tačiau jos parametrų svyravimo diapazonas yra mažesnis už jūrinės vėjo elektrinės, todėl galima teigti, kad sausumos vėjo elektrinė dirba stabiliau už jūrinę vėjo elektrinę.

### **1.3. Maksimalios apkrovos taško ieškojimas**

Maksimalaus apkrovos galios taško paieškos principinė schema yra tokia pati, kaip 2.4 pav. Šio modeliavimo metu nuo 8 MW apkrova yra didinama, kol pasiekia tokį tašką, prie kurio vėjo elektrinė atsijungia. Jūrinė elektrinė atsijungia, kai vartotojo galia siekia 71,9898 MW. Sausumos VE atsijungia, kai vartotojo galia yra 63,924 MW. Šio modeliavimo duomenys yra pateikti 3 ir 6 prieduose.

Kol vartotojo galia yra mažesnė, elektrinės susitvarko su ja ir dirba stabiliai, kadangi trūkstamą galios dalį vartotojas pasiima iš maitinančio tinklo. Jūrinė vėjo elektrinė sugeba atlaikyti didesnę vartotojo apkrovą todėl, kad jos galia yra didesnė dėl didesnio vyraujančio vėjo greičio, kuris įtakoja VE galią. 2.8 paveiksle yra parodyta vėjo elektrinių darbo charakteristikos. Sausumos VE generatoriaus greitis nusistovi tolygiai prie 0,834 nominalių apsisukimų (VE jau atsijungusi). Jūrinės VE generatoriaus greitis vis didėja, kol galiausiai VE atsijungia. Atsijungusios VE generatoriaus apsisukimai viršija nominalius apsisukimus, todėl valdymo sistema bando suvaldyti padėtį mažindama VE tuščios veikos galią. Galiausiai VE sūkių nusistovi prie 1,24 nominalių sūkių, tačiau jie vis tiek viršija nominalius VE parametrus.



2.8 pav. Jūrinės ir sausumos VE generatoriaus sūkliai (santykiniais vienetais); vėjo greitis (m/s); menčių pakreipimo kampas (laipsniais).

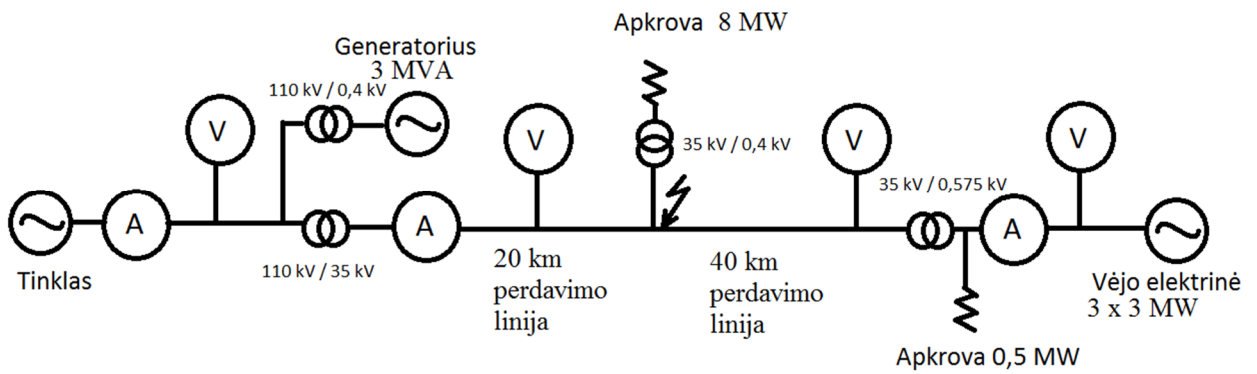
2.4 lentelė. Šynų įtampos maksimalios vartotojo galios modeliavimo metu.

	Jūrinė VE	Sausumos VE
$U_{110 \text{ kV šynų}}, \text{ V}$	108967,28	109119,43
$U_{35 \text{ kV šynų (1)}}, \text{ V}$	32967,19	33332,44
$U_{35 \text{ kV šynų (2)}}, \text{ V}$	24755,50	25807,18
$U_{35 \text{ kV šynų (3)}}, \text{ V}$	25571,07	25571,08
$U_{0,575 \text{ kV šynų}}, \text{ V}$	431,25	431,25

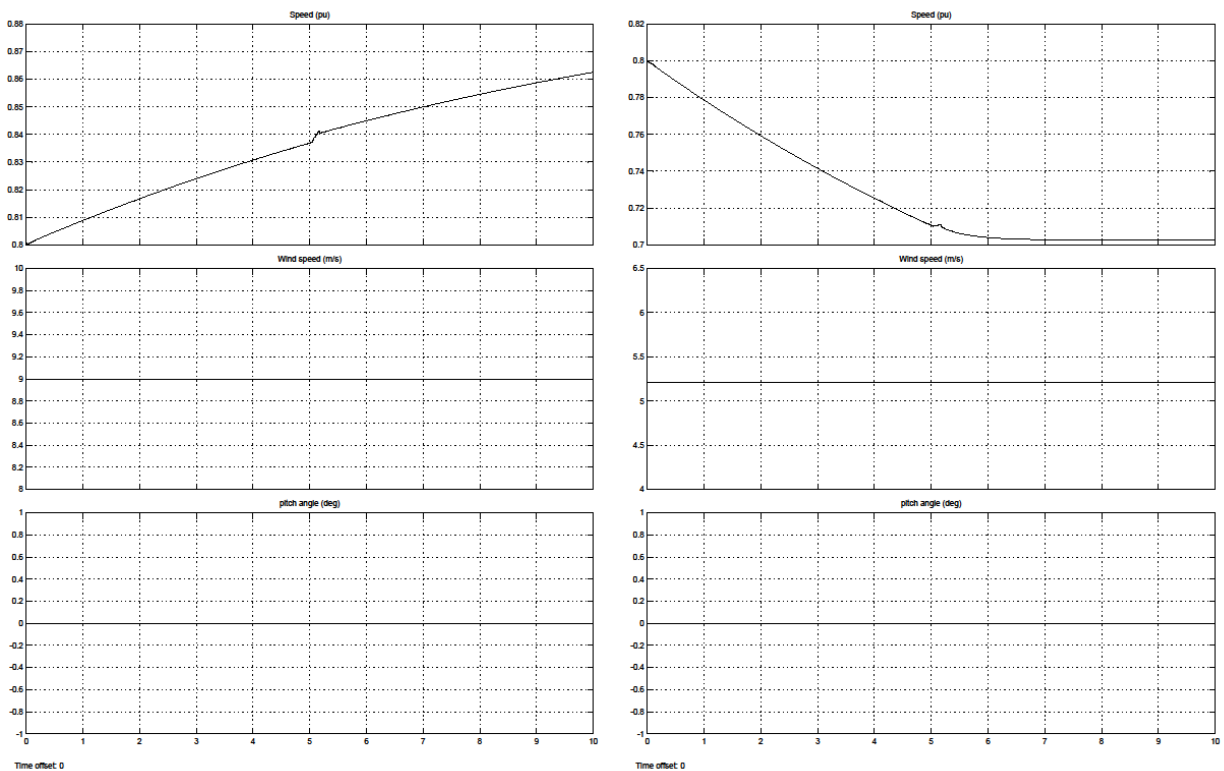
2.4 lentelėje matyti, kad, prieš elektrinėms atsijungiant, sausumos vėjo elektrinės įtampos yra didesnės už jūrinės VE įtampas. Pačių VE įtampos yra vienodos, tačiau, kadangi jūrinės VE srovė yra didesnė, už sausumos VE, todėl jūrinė VE generuoja daugiau galios. Vadinasi jūrinei elektrinei veikiant, iš tinklo galios reikia mažiau. Tai ir sąlygoja skirtingą įtampų pasiskirstymą.

#### 1.4. Fazės trikdžio įtaka

Fazės trikdžio modeliavimo metu A fazėje įvyksta trumpas jungimas, kaip pavaizduota 2.9 pav. Jis yra trumpas, todėl vėjo elektrinės neatsijungia. Trikdžio įtaka vėjo elektrinėms yra pavaizduota 7 ir 8 prieduose.

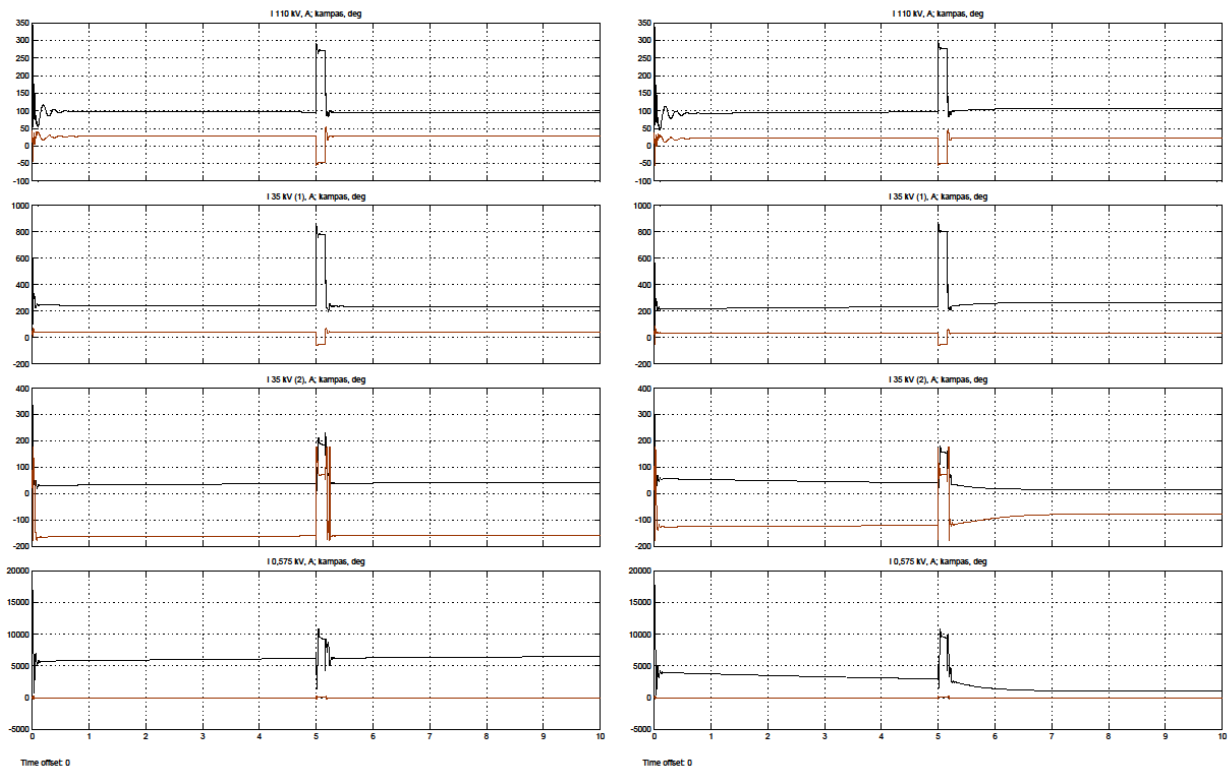


2.9 pav. Principinė tinklo schema, kuriame A fazėje įvyko trumpas jungimas.

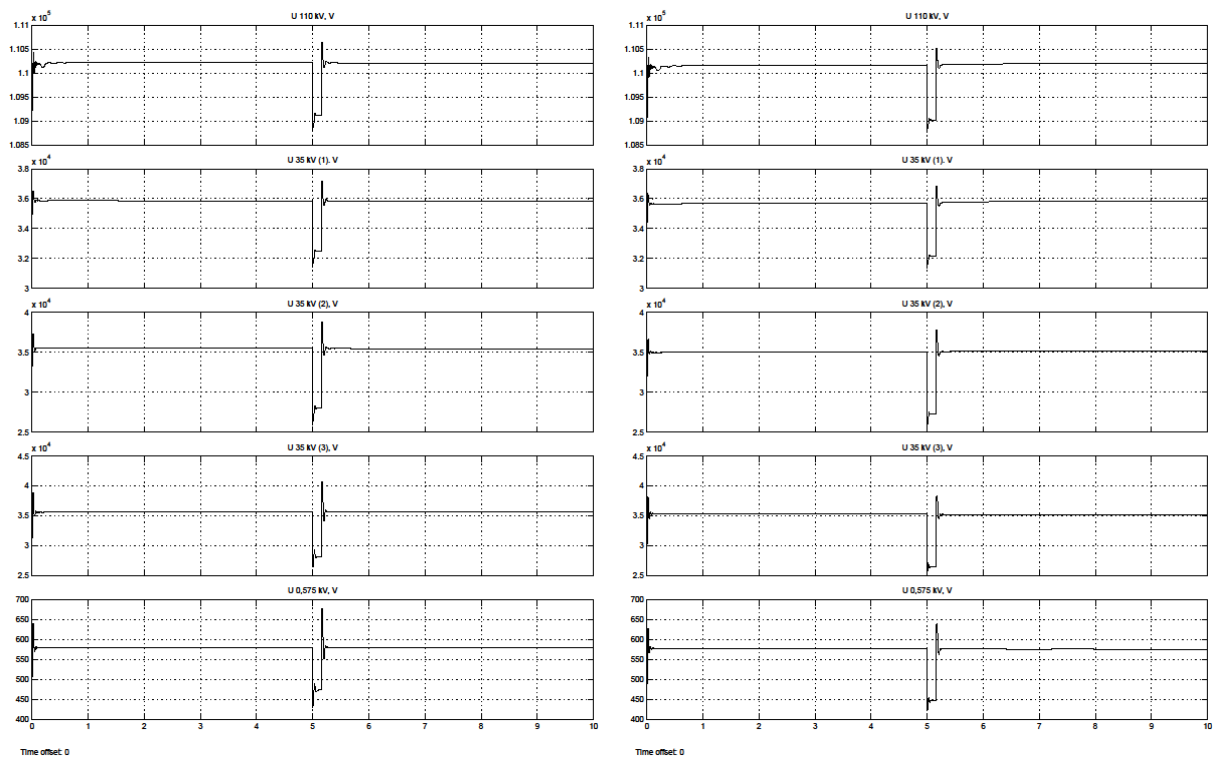


2.10 pav. Jūrinės ir sausumos VE generatoriaus darbas, įvykus trumpam jungimui tinkle A fazėje.

2.10 paveiksle yra pavaizduota jūrinės VE ir sausumos VE generatoriaus apsisukimai, vėjo greitis ir VE menčių pakreipimo kampas. Kadangi jūrinės VE vėjo greitis yra didesnis, todėl jos generatoriaus apsisukimai didėja. Sausumos VE vėjo greitis yra mažas, todėl jos generatoriaus apsisukimai yra krintantys. Nepaisant to, 5 sekundę įvykęs trumpas jungimas įneša menką trikdį.



2.11 pav. Jūrinēs ir sausumos VE srovēs ir kampai, kai tinkle įvyksta trumpas jungimas.



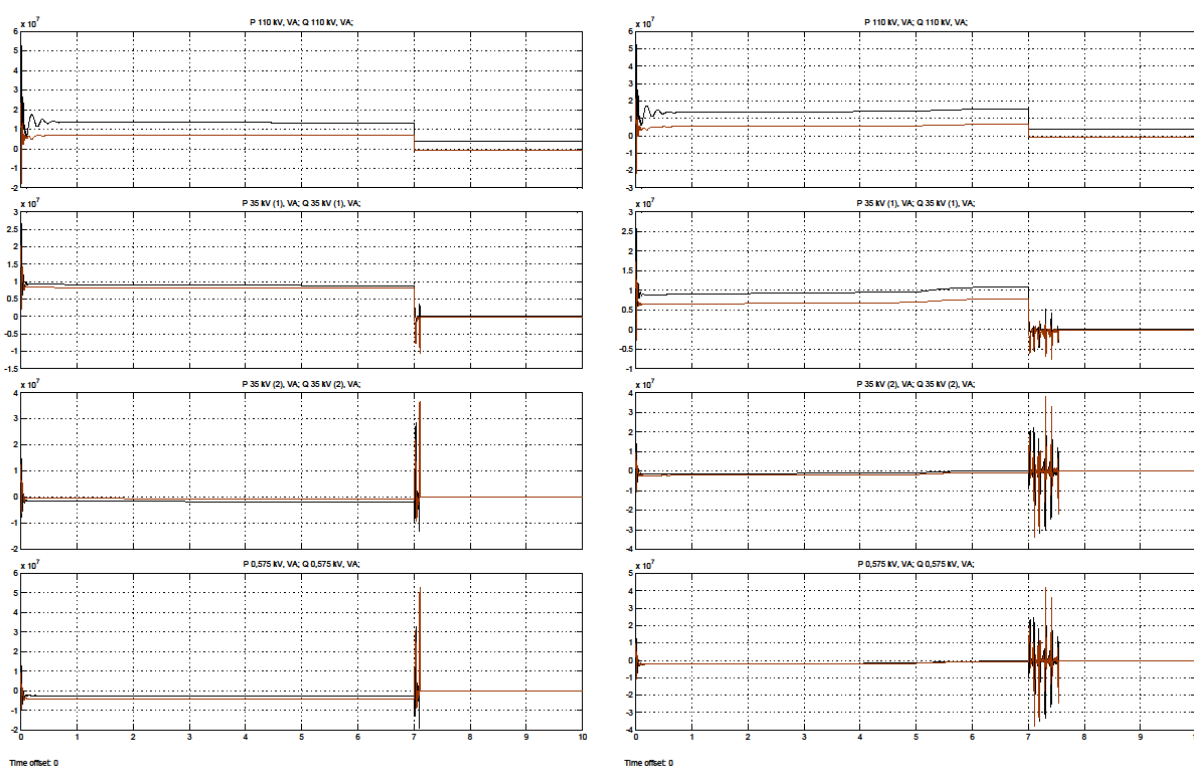
2.12 pav. Jūrinēs ir sausumos VE įtampos skirtinguose tinklo taškuose.

2.11 paveiksle matyti, kad dėl didesnės jūrinės VE galios į apkrovą iš jūrinės VE teka didesnė srovė, negu iš sausumos VE. Iš tinklo – atvirkščiai: jūrinės VE modelyje į apkrovą teka

mažesnė srovė, o sausumos VE modelyje, iš tinklo apkrovai teka didesnė srovė, nes yra didesnis galios deficitas. Jūrinės VE modelyje taip pat yra didesnės įtampos. Dėl vienodos tinklo galios ir skirtingų VE galių jūrinės VE trikdžių amplitudė yra didesnė, negu sausumos VE. Tai rodo, kad sausumos VE tinkle dirba kiek stabiliau, nes jos svyravimai yra mažesni už jūrinės VE.

### 1.5. VE atsijungia nuo tinklo

VE atsijungimo nuo tinklo modeliavimo rezultatai yra pateikti 9 ir 10 prieduose. Bandymo metu VE veikia normaliu režimu iki 7 sekundės. 7 sekundę tinklas visiškai atsijungia nuo perdavimo tinklo ir VE pradeda dirbti salos režimu. Tiek jūros, tiek sausumos VE turi išlaikyti 8,5 MW apkrovas.



2.13 pav. Aktyvios ir reaktyvios galios pasiskirstymas skirtingose tinklo vietose.

2.13 paveiksle matyti, kad atsijungus tinklui galia iš tinklo pusės greitai nukrinta. Tuo pat metu vėjo elektrinė stengiasi išlaikyti apkrovą ir galia iš vėjo elektrinės staigiai auga. Kadangi vėjo elektrinės srovė pasiekia maksimalią savo vertę, todėl vėjo elektrinė yra atjungiamą. Skirtumas tarp sausumos ir vėjo elektrinių yra tas, kad sausumos vėjo elektrinė atsijungia vėliau, negu jūrinė vėjo elektrinė. Nors laiko tarpas tarp atsijungimų nedidelis, tačiau tai vis tiek įrodo, kad sausumos vėjo elektrinė yra stabilesnė už jūrinę vėjo elektrinę.

## Išvados

1. Kadangi jūrinės vėjo elektrinės vėjas yra 1,728 karto didesnis už sausumos, todėl jūrinė VE dirba 6,54 karto didesne galia. Dėl šios priežasties ir dėl didesnio kabelinės linijos talpumo jūrinės VE įtampa yra 0,61 % didesnė.
2. Normaliu režimu veikianti sausumos VE generuoja santykinai daugiau reaktyvios galios negu jūrinė VE (  $[\cos\varphi_{\text{jūrinės VE}} = 0,56] < [\cos\varphi_{\text{sausumos VE}} = 0,5]$  ).
3. Jūrinė VE dirba didesne galia už sausumos VE esant tokiam pačiam stipriam vėjo gūsiui. Tačiau vėjo gūsis vis tiek sutrikdo abiejų VE darbą.
4. 9 MW jūrinė vėjo elektrinė atsijungia nuo tinklo prie 71,99 MW vartotojo aktyvios galios, o 9 MW sausumos vėjo elektrinė atsijungia prie 63,92 MW vartotojo galios. Tai rodo, kad jūrinė VE dirba didesne galia negu sausumos VE.
5. Trumpasis jungimas, atsiradęs fazėje A, sausumos vėjo elektrinės tinkle sukelia mažesnius svyravimus negu jūrinės vėjo elektrinės tinkle.
6. Po tinklo atsijungimo nuo VE jūrinė VE dar dirba 0,12 sekundes, o sausumos VE – 0,65 sekundes. Laiko tarpas skiriasi taip smarkiai todėl, kad jūrinė VE pasiekia maksimalią leistiną srovės vertę greičiau negu sausumos VE.
7. Sausumos VE geriau atlaiko staigius galios šuolius arba tinklo avarijas, ilgiau išlieka darbo būsenoje, kada yra atjungta nuo tinklo, nes turi didesnę galios rezervą, tačiau jūrinė VE išlaiko didesnę prijungtą vartotojo galią.

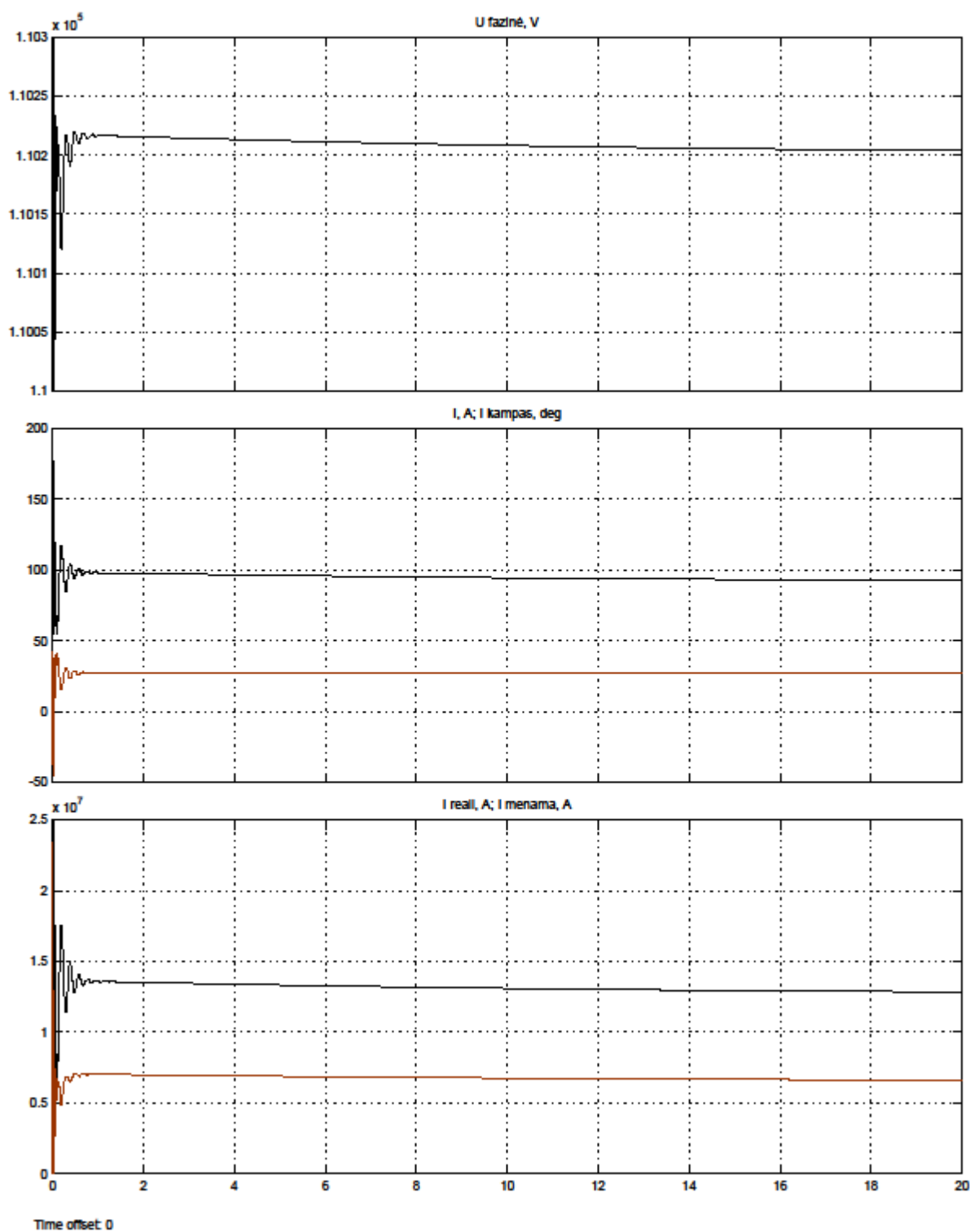


## Literatūros sąrašas

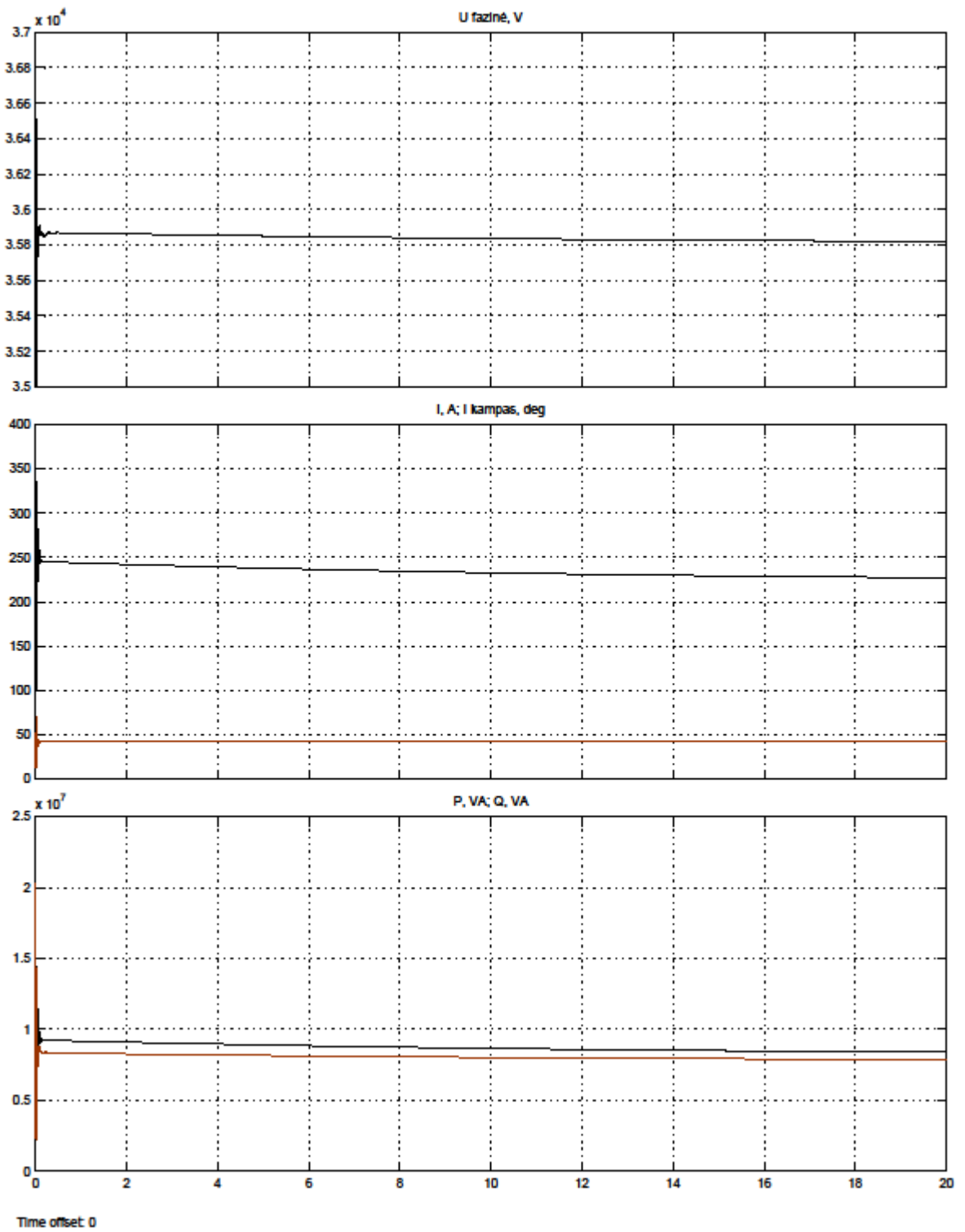
1. Wang Li, Dinh-Nhon Throung. Dynamic Stability Improvement of Four Parallel-Operated PMSG-Based Offshore Wind Turbine Generators Fed to a Power System Using a STATCOM [interaktyvus]. Jan. 2013, vol. 28, no 1. ISSN: 0885-8977; E-ISSN: 1937-4208; DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2222937. 111-119 psl. [žiūrėta 2015 m. birželio 7]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6354013>
2. Ronan Meere, Terence O'Donnell, Andrew Keane. Comparison of wind turbine/generator configurations for future offshore wind farms [interaktyvus]. In Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'. 2013-01-(2-5) [žiūrėta 2015 m. birželio 7]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/xpls/icp.jsp?arnumber=6714954>
3. H. Li, B. Zhao, H. W. Chen, Z. Chen. Analysis and estimation of transient stability for a grid-connected wind turbine with induction generator [interaktyvus]. In Renewable Energy, 2011, Vol. 36(5), psl.: 1469-1476. ISSN: 0960-1481 ; DOI: 10.1016/j.renene.2010.08.023 [žiūrėta 2015 m. birželio 8]. Prieiga per internetą:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003939>.
4. Roy, N.K.; Pota, H.R.; Hossain, M.J.; Cornforth, D. Impact of SCIG and DFIG type wind turbine on the stability of distribution networks: Static and dynamic aspects [interaktyvus]. In Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference, 18-25 May 2012. 543-548 p. ISBN: 978-1-4577-1830-4; DOI: 10.1109/EEEIC.2012.621436. [žiūrėta 2015 m. birželio 8]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/xpls/icp.jsp?arnumber=6221436>
5. Rorato Londero, R.; De Mattos Affonso, C.; Abreu Vieira Long-Term. Voltage Stability Analysis of Variable Speed Wind Generators. Power Systems, IEEE Transactions on, Jan. 2015, p. 439-447. Žiūrėta: 2015-06-09. Internetinė prieiga:  
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/xpls/icp.jsp?arnumber=6822646>
6. Arani, M.F.M.; Mohamed, Y.A.-R.I. Analysis and Impacts of Implementing Droop Control in DFIG-Based Wind Turbines on Microgrid/Weak-Grid Stability. Power Systems. IEEE Transactions, 2015, p. 385-396. ISSN: 0885-8950. Žiūrėta: 2015-06-09. Internetinė prieiga:  
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/xpls/icp.jsp?arnumber=6820794>
7. Dvigubo maitinimo narvelinių rotoriumi vėjo elektrinės fazorių modelis MatLab Simulink sistemoje. Prieiga per internetą:  
<http://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46294-simple-wind-turbine-pmsg-mdl>

8. Lietuvos regionų daugiamečių vėjo greitis (m/s) 10 ir 50 m aukštyje. [žiūrėta 2015-12-27].  
Prieiga per internetą:  
<http://de2.lt/naudinga-informacija/lentel%C4%97s/299-vidutinis,-metinis-v%C4%97jo-greitis-lietuvoje>
9. Vidutinis vėjo greitis Baltijos jūroje. [žiūrėta 2015-12-27]. Prieiga per internetą:  
[http://www.lsta.lt/files/seminarai/090615\\_LRS\\_AAK\\_vejas/Saulius%20GulbinskasVEJ\\_galimyb%20bes\\_juroje\\_090615.pdf](http://www.lsta.lt/files/seminarai/090615_LRS_AAK_vejas/Saulius%20GulbinskasVEJ_galimyb%20bes_juroje_090615.pdf)
10. Algirdas Bertulis. 10 kV linijų techninių finansinių rodiklių tyrimas. Magistro darbas. [žiūrėta 2016-01-4]. 17 psl. Prieiga per internetą:  
<http://talpykla.elaba.lt/elaba-fedora/objects/elaba:2062120/datastreams/MAIN/content>
11. Nexans Olex. Power Cable Catalogue. 35 kV kabelių specifikacija. 198 psl. [žiūrėta 2016-03-4]. Prieiga per internetą:  
<http://www.nexans.co.nz/NewZealand/2013/Power%20Cable%20Catalogue%20Full%20version%202012.pdf>
12. Alfredas Stašelis, Stanislovas Merkevičius, Virginijus Stašelis. Aukštos įtampos elektros tinklų oro linijų magnetinių laukų tyrimai. Atstumai tarp 35 kV oro linijos fazinių laidų. 5 psl. [žiūrėta 2016-07-4]. Prieiga per internetą:  
[http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:J.04~2005~ISSN\\_1392-1134.V\\_37.N\\_1.PG\\_144-153/DS.002.0.01.ARTIC](http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:J.04~2005~ISSN_1392-1134.V_37.N_1.PG_144-153/DS.002.0.01.ARTIC)
13. P. Kundur. Power system stability and control. Oro elektros linijų charakteristikos. 220-221 psl. [žiūrėta 2016-03-20].

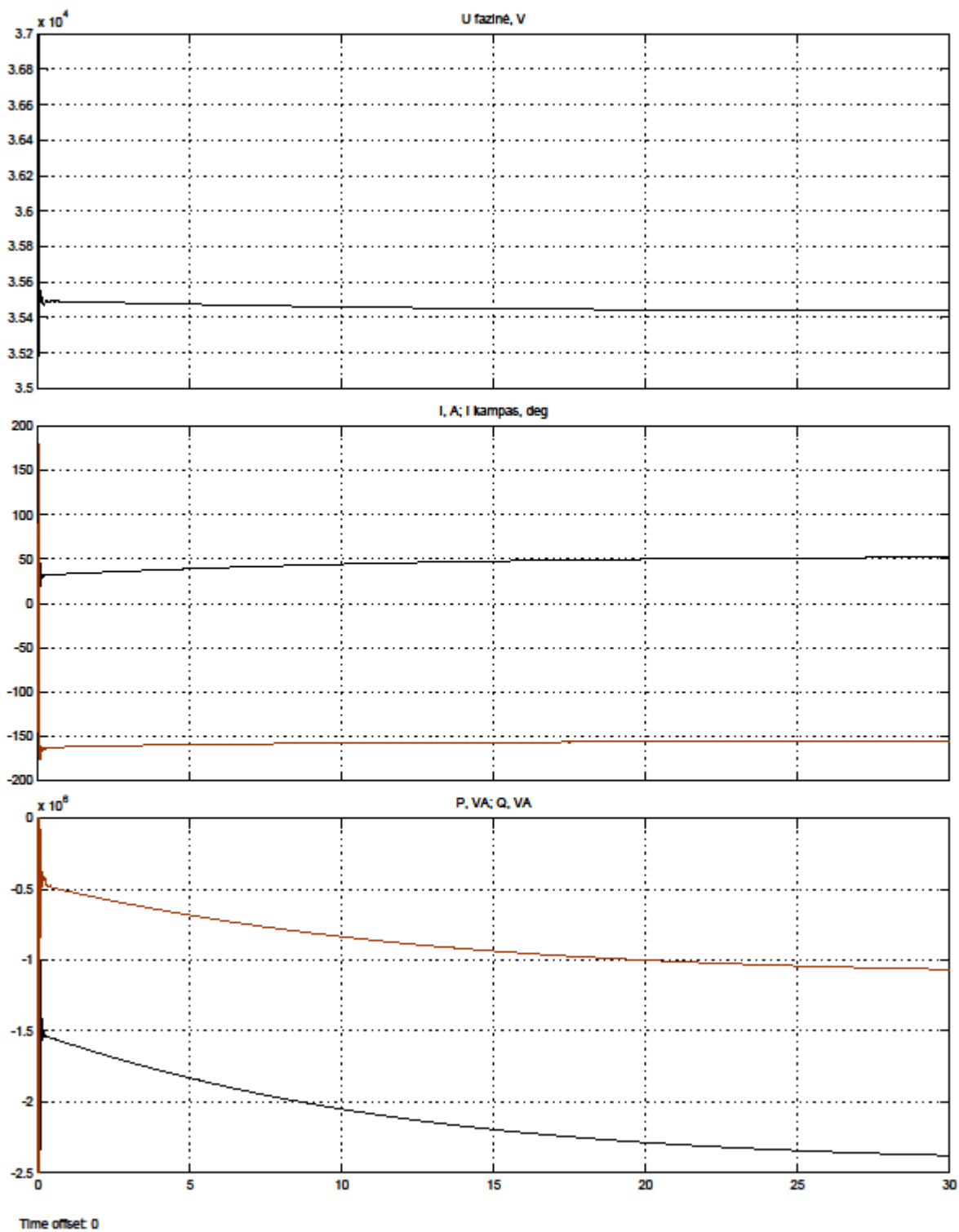
1 PRIEDAS. Jūrinės elektrinės kontrolinio modeliavimo rezultatai



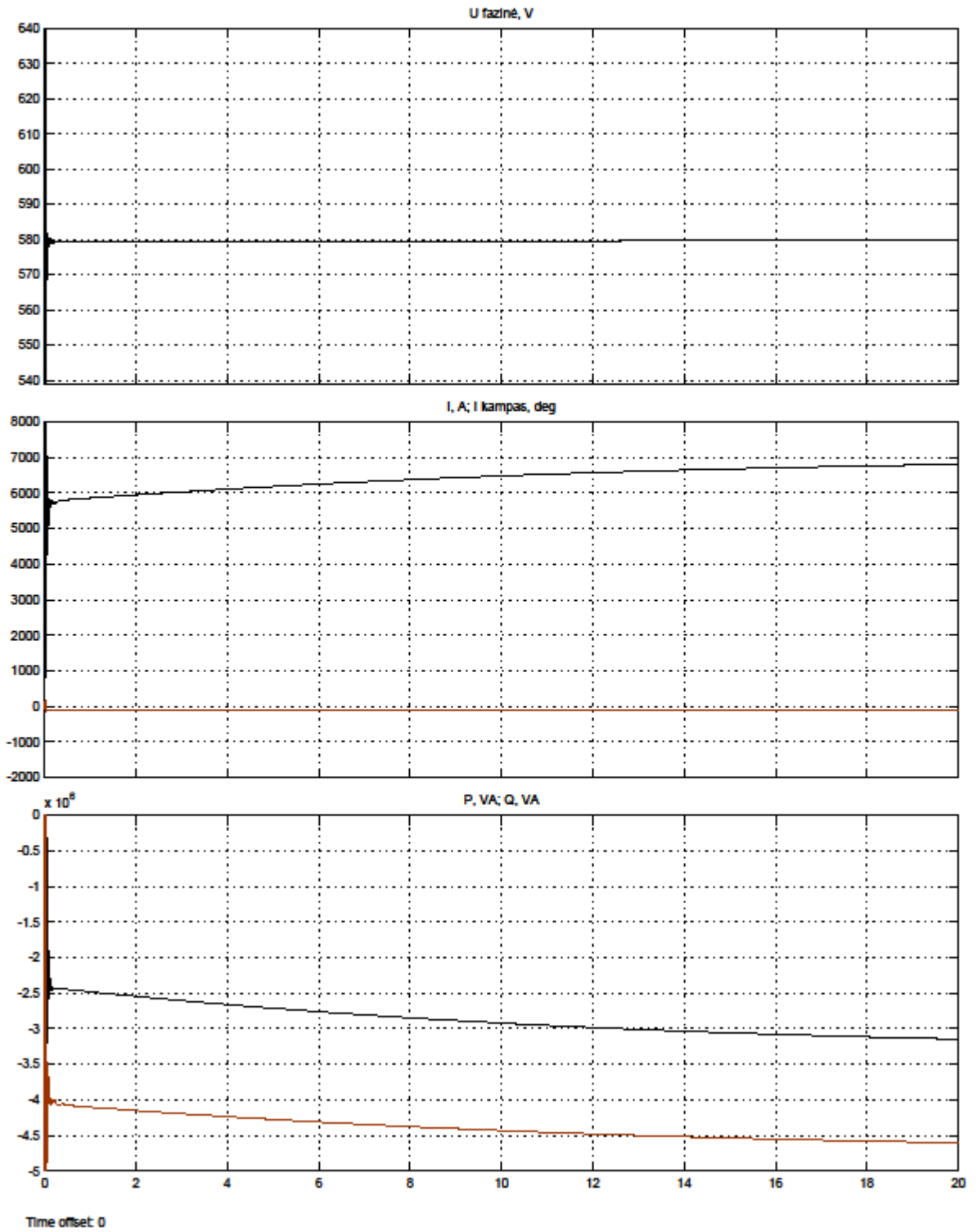
1 pav. 110 kV šynos.  $U=110203,67$  V;  $I=92,65e^{27.23}$  A;  $P=128390,91$  VA;  $Q=6607303,75$  VA.



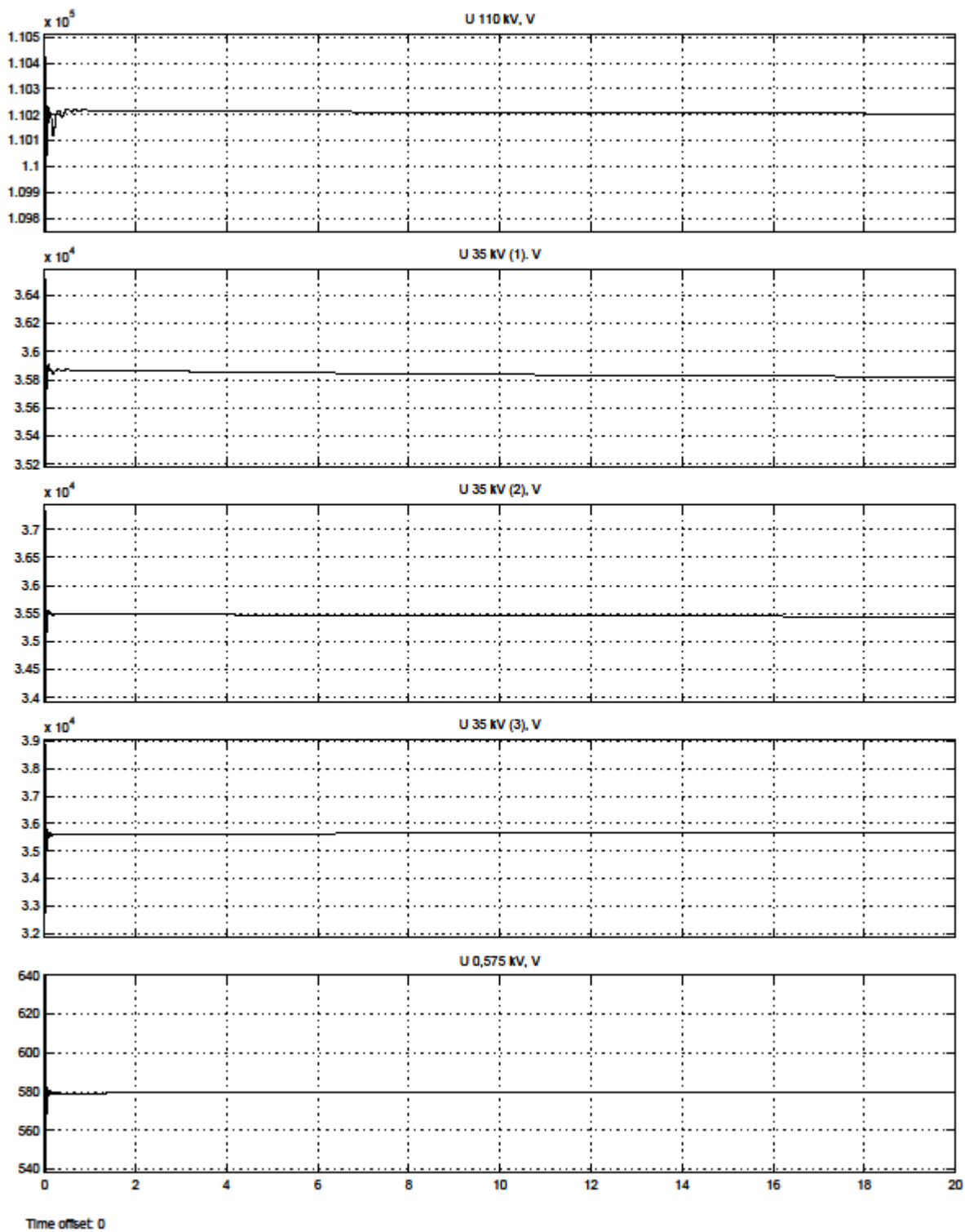
2 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=35820.07$  V;  $I=227e^{43.14}$  A;  $P=8390587.78$  VA;  $Q=7863110.73$  VA.



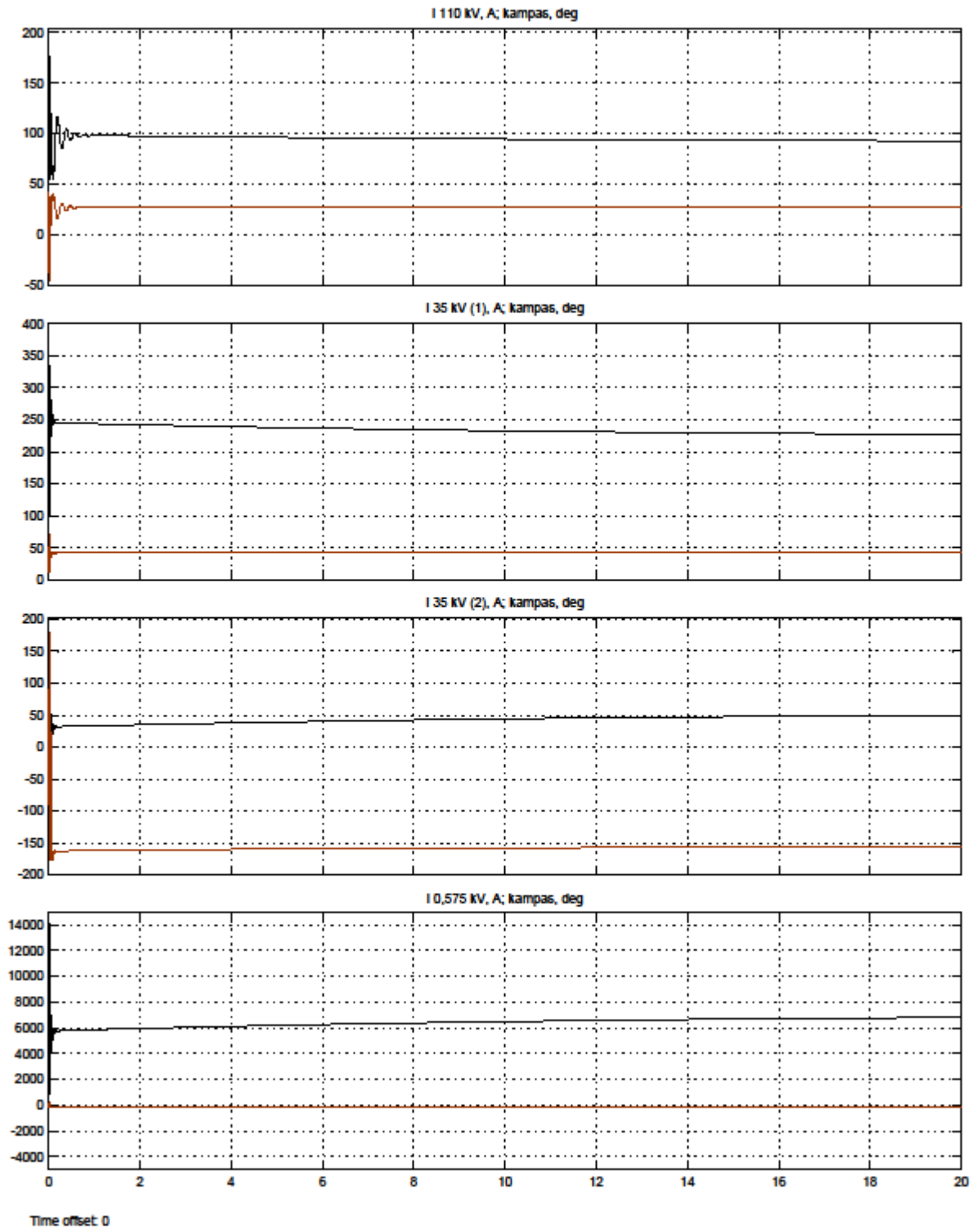
3 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=35443.80$  V;  $I=49.80e^{-156.35}$  A;  $P=-2286621.05$  VA;  $Q=-1001378.34$  VA.



4 pav. 575 V šynos.  $U=579.69$  V;  $I=6802.78e^{-124.35}$  A;  $P=-3146959.29$  VA;  $Q=-4604230.1$  VA.

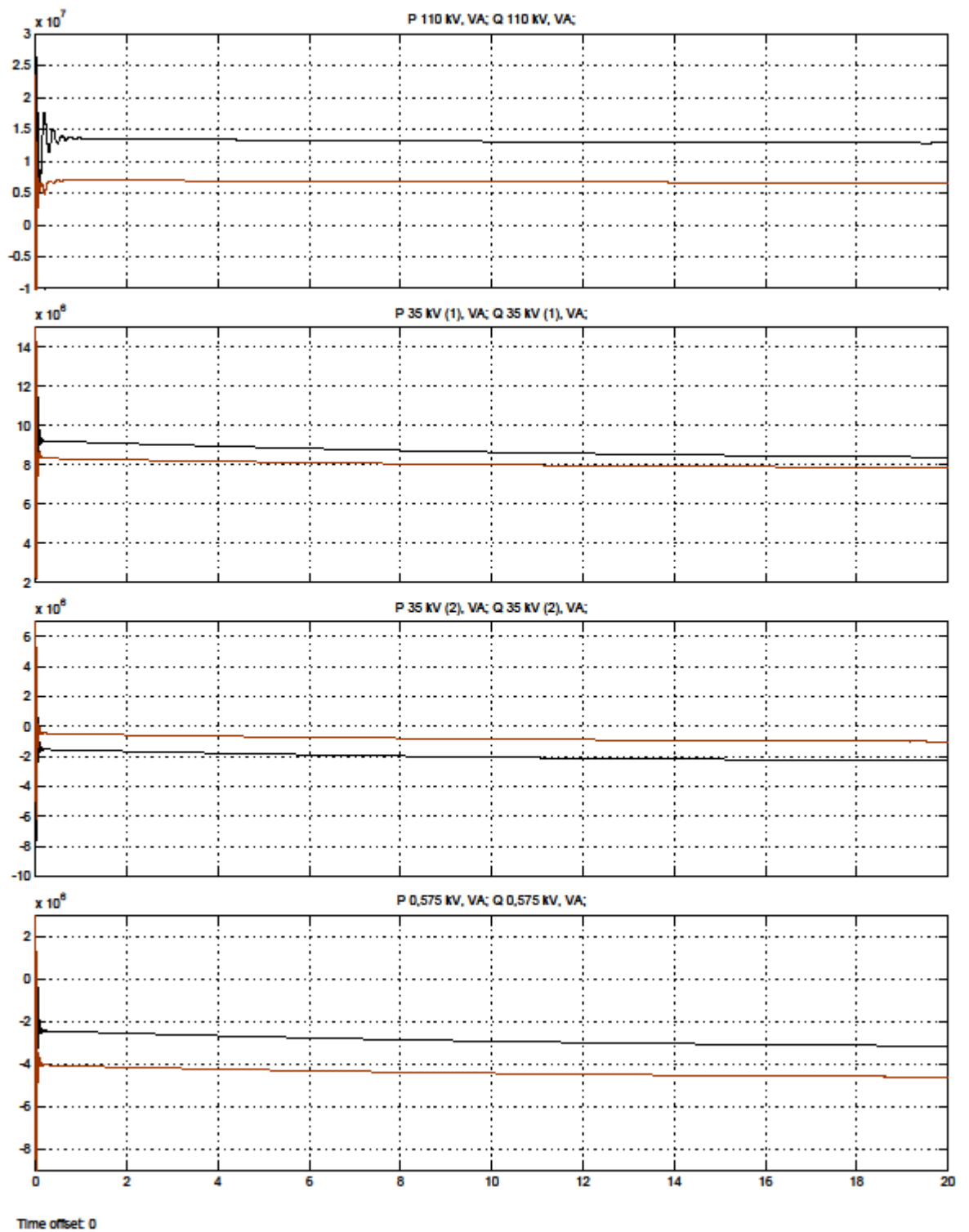


5 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=110203.67\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=35820.07\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=35443.80\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=35675.79\text{ kV}$ ;  $U_{575\text{ V}}=579.69\text{ V}$ .

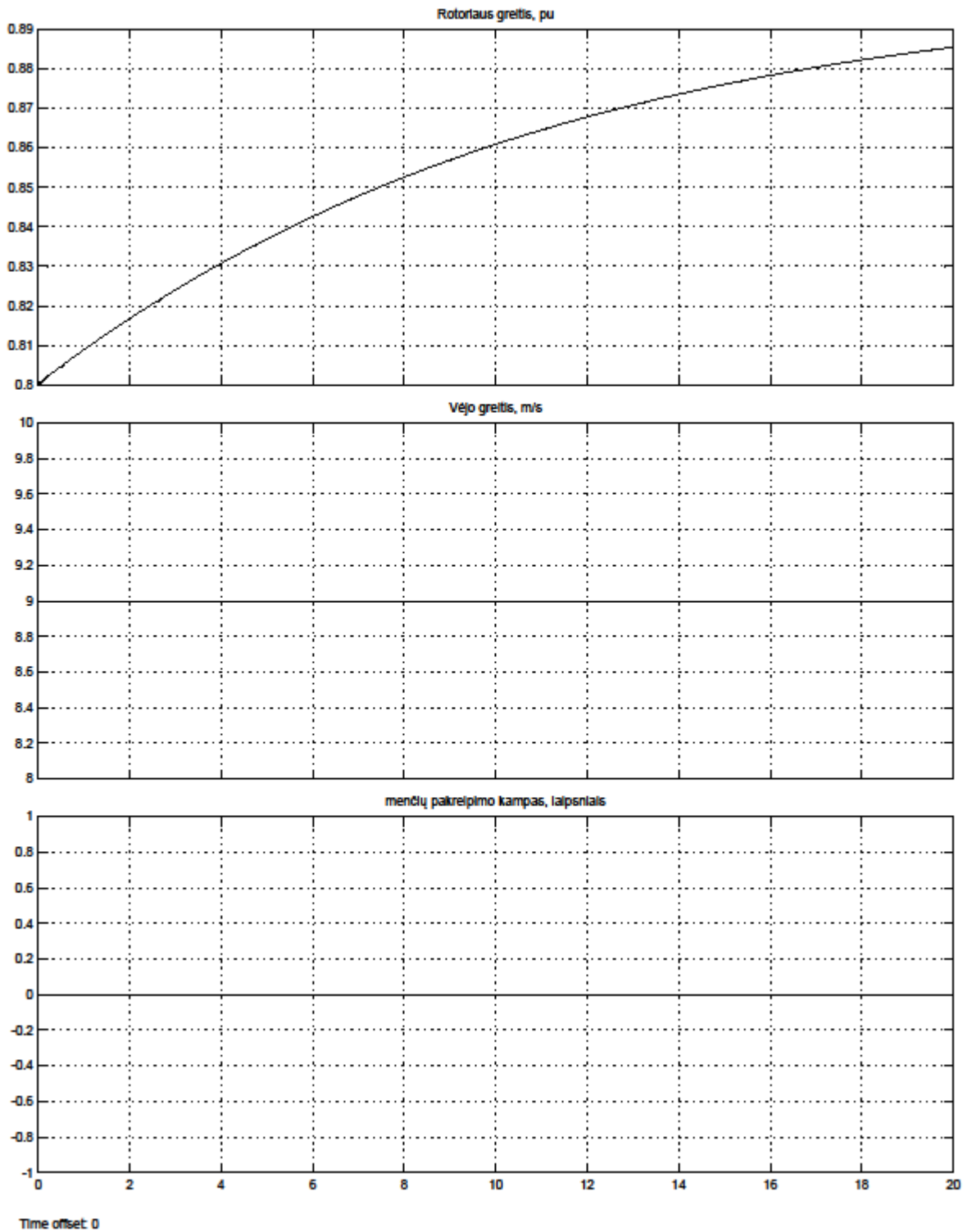


6 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=92.65e^{27.23}$  A;  $I_{135\text{ kV}(1)}=227e^{43.14}$  A;  $I_{135\text{ kV}(2)}=49.80e^{-156.35}$  A;  $I_{0.575\text{ kV}}=6802.78e^{-124.35}$  A;





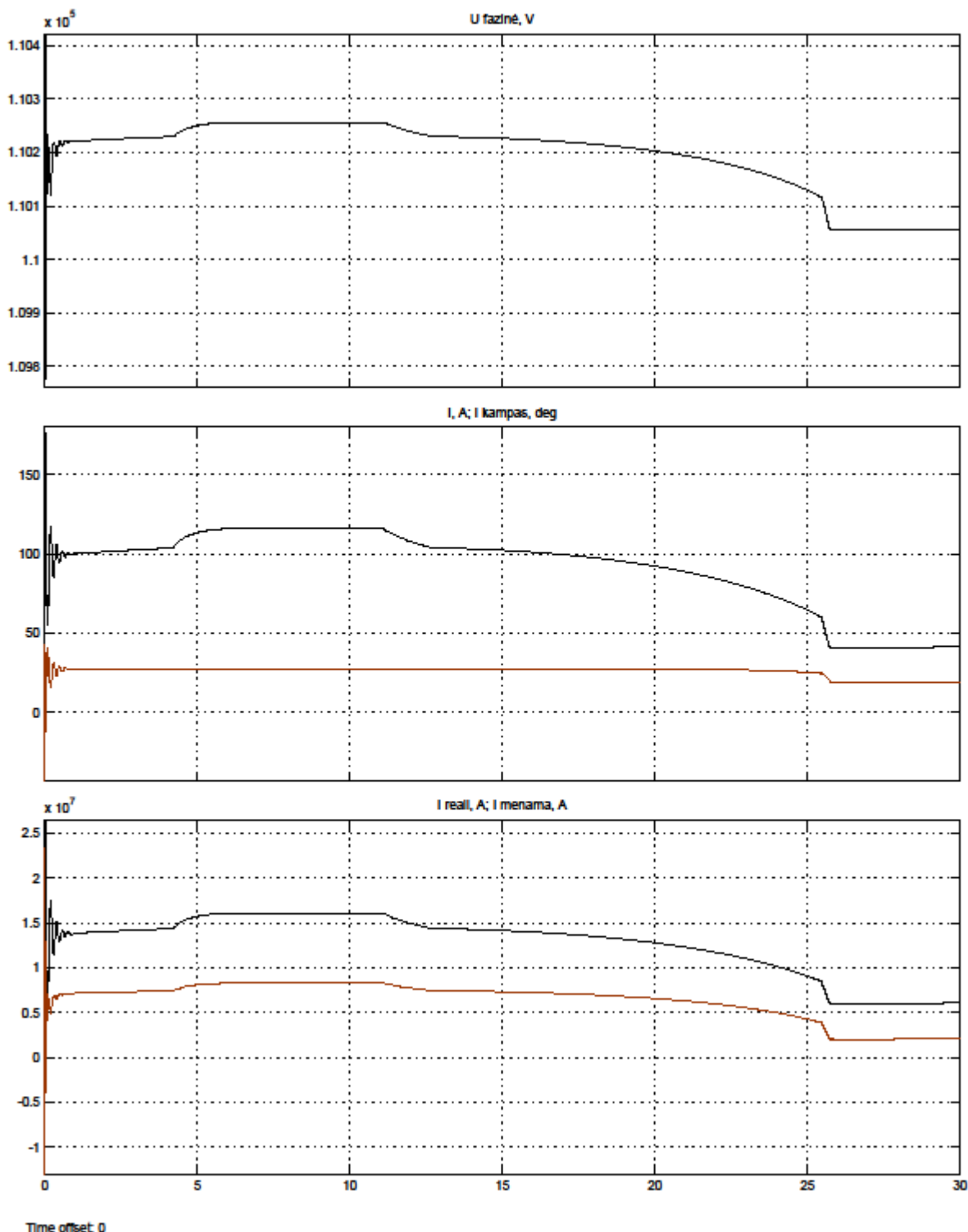
7 pav.  $P_{110\text{ kV}}=12839035.91\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=6607303.75\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=8390587.78\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (1)}}=7863110.73\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=-2286621.05\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=-1001378.34\text{ VA}$ ;  $P_{0.575\text{ kV}}=-3146959.29\text{ VA}$ ;  $Q_{0.575\text{ kV}}=-4604230.10\text{ VA}$ ;



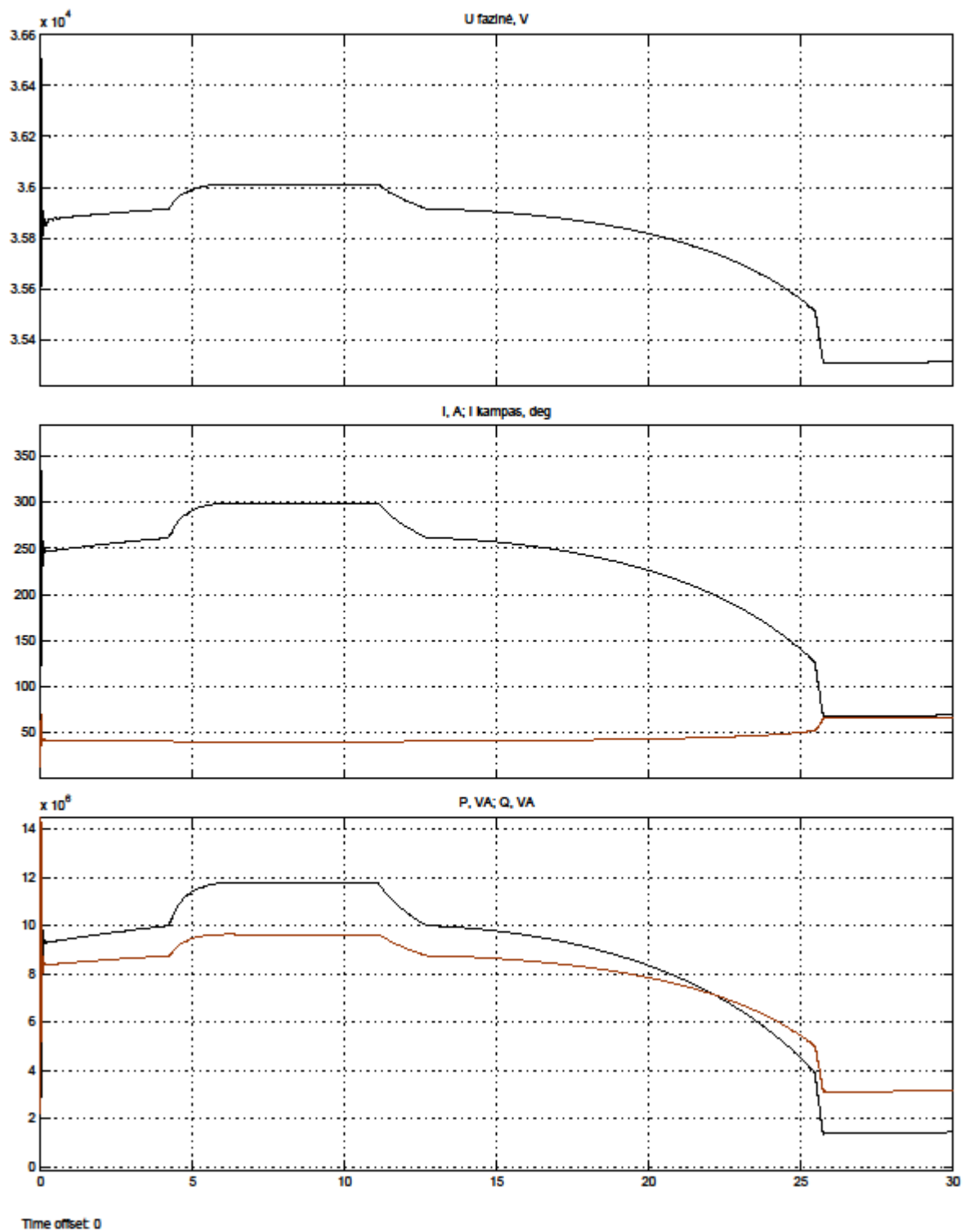
8 pav. VE. Greitis=0.89;  $v_{vėjo}=9$  m/s;  $\delta_{menčių}=0^0$

2 PRIEDAS. Staigaus vėjo gūsis jūrinei elektrinei.

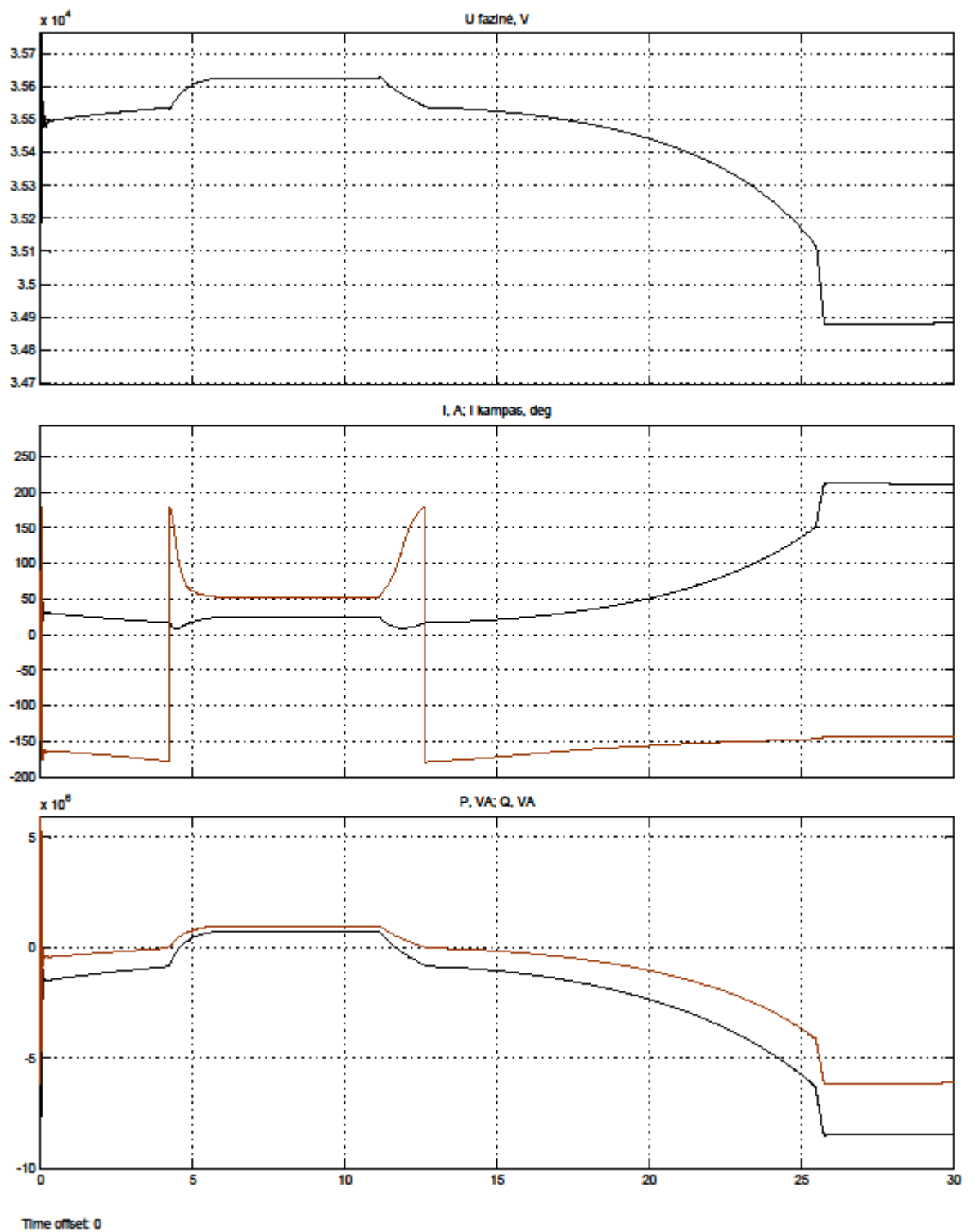
Vėjo greitis čia yra keičiamas nuo 0 m/s iki 30 m/s, kai žingsnio laikas yra 5 s.



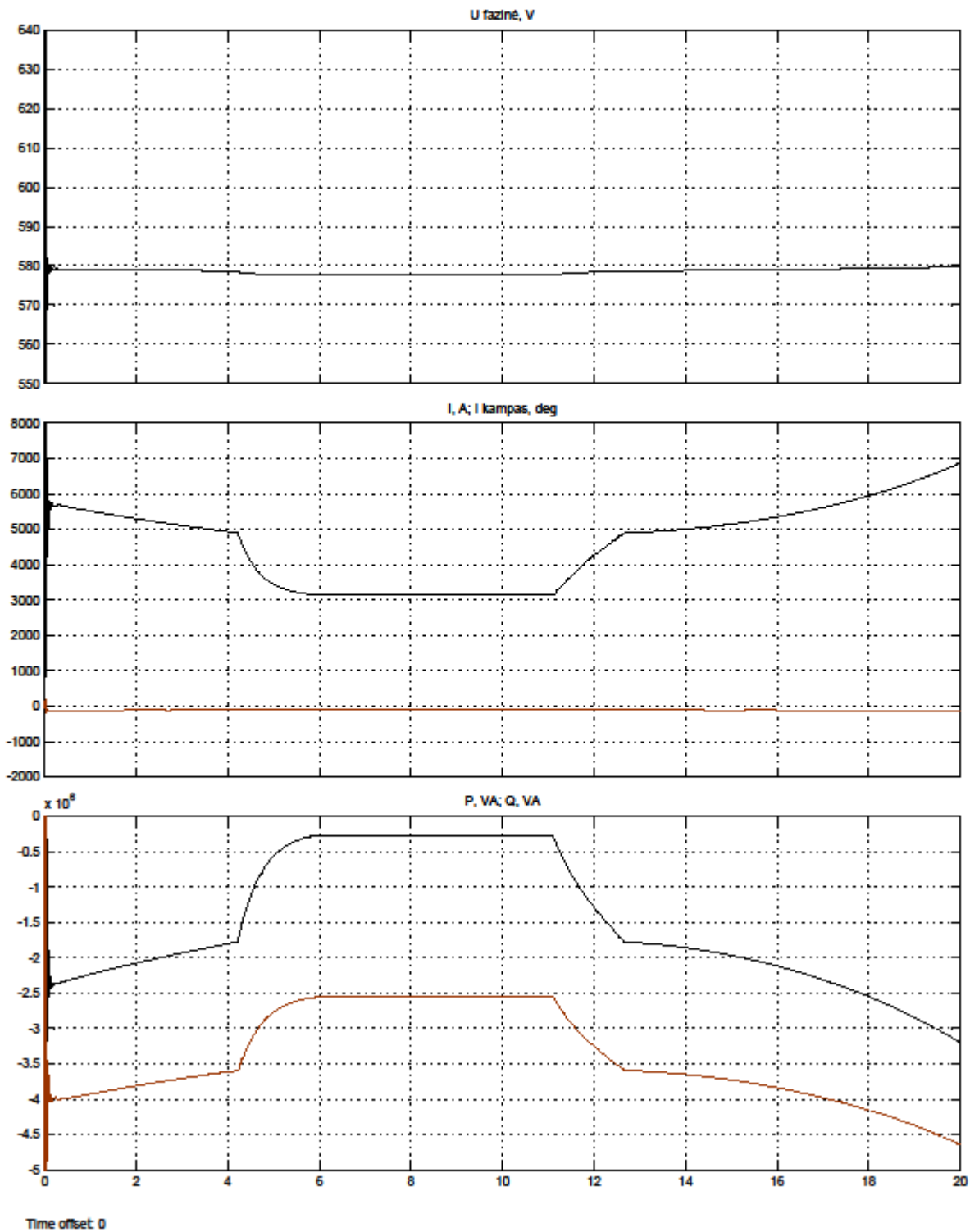
9 pav. 110 kV šynos.  $U=110\ 203,67$  V;  $I=92.65e^{27.23}$  A;  $P=128390.91$  VA;  $Q=6607303.75$  VA.



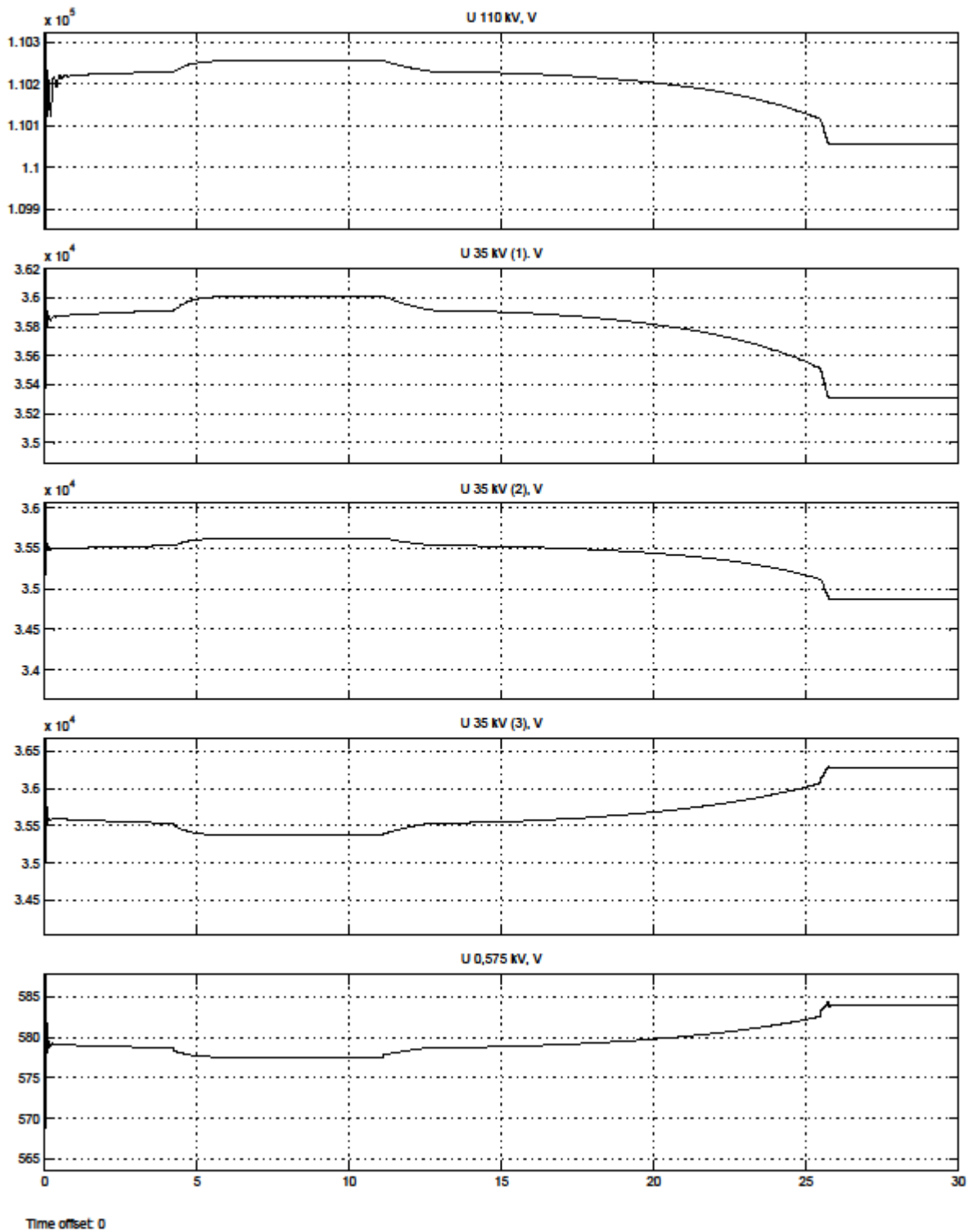
10 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=35820.07$  V;  $I=227e^{43.14}$  A;  $P=8\,390\,587.78$  VA;  $Q=7\,863\,110.73$  VA.



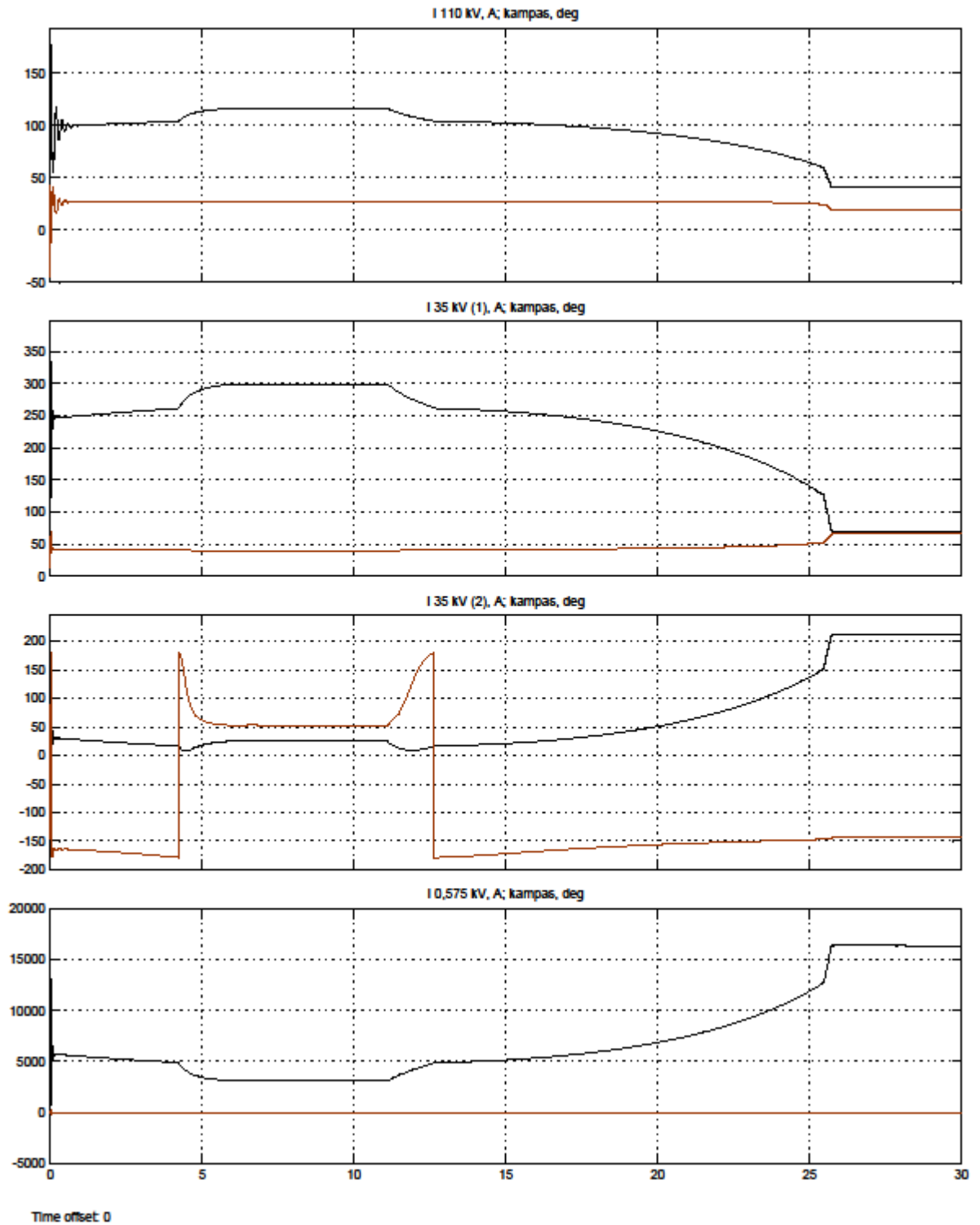
11 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=35443.80$  V;  $I=49.80e^{-156.35}$  A;  $P=-2286621.05$  VA;  $Q=-1001378.34$  VA.



12 pav. 575 V šynos.  $U=579.69$  V;  $I=6802.78e^{-124.35}$  A;  $P=-3146959.29$  VA;  $Q=-4604230.1$  VA.

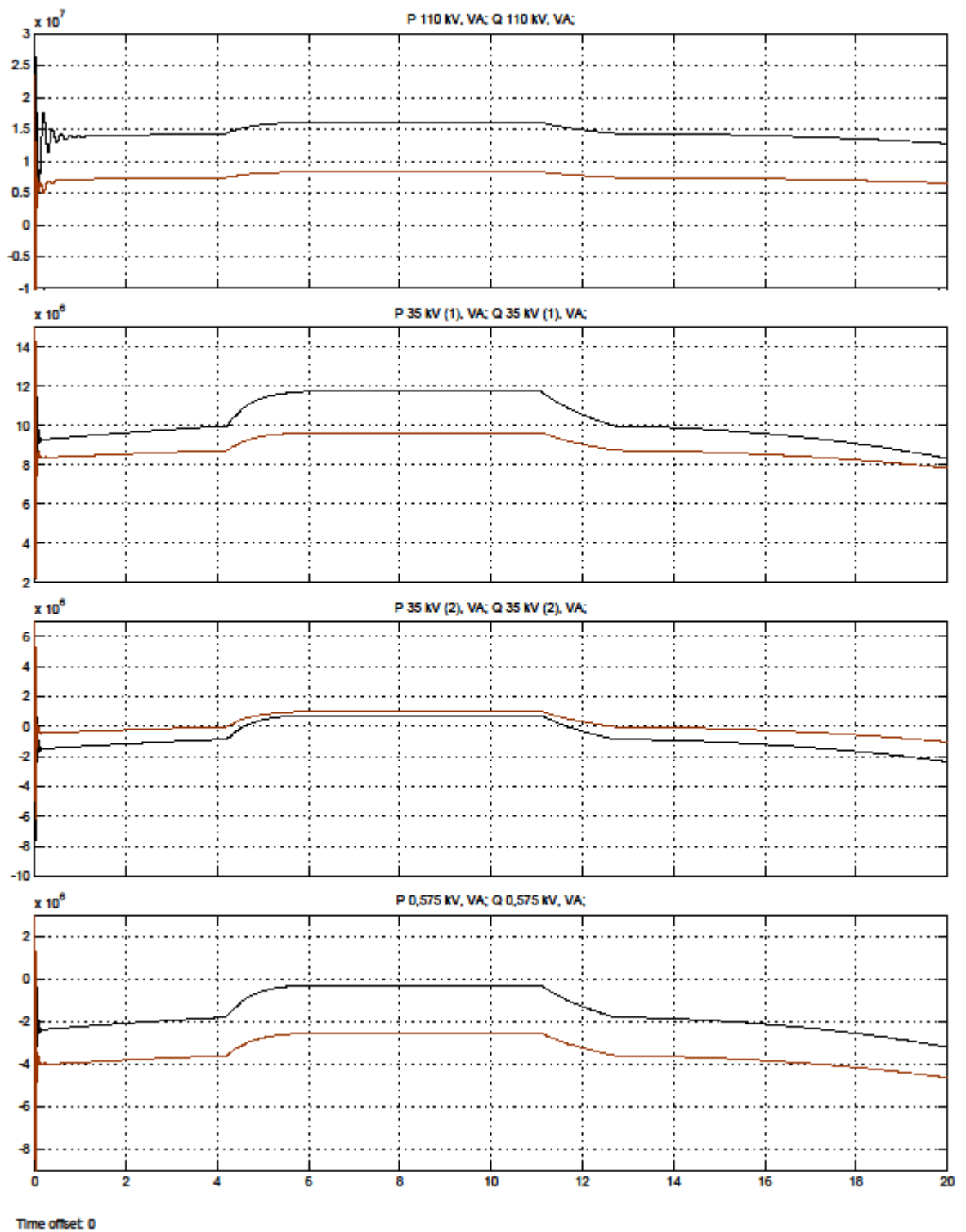


13 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=110203.67\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=35820.07\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=35443.80\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=35675.79\text{ kV}$ ;  $U_{575\text{ V}}=579.69\text{ V}$ .

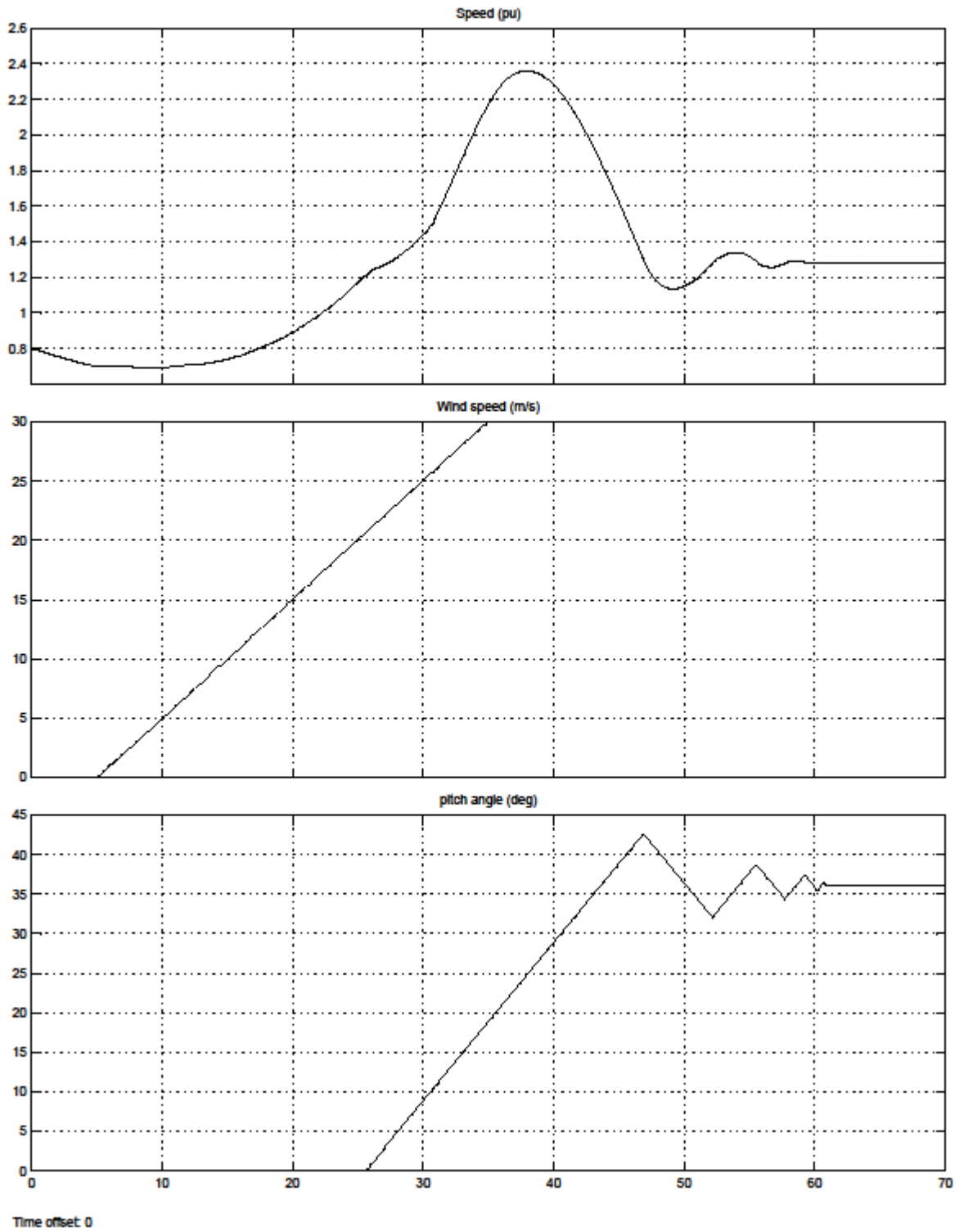


14 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=92.65e^{27.23}$  A;  $I_{35\text{ kV (1)}}=227e^{43.14}$  A;  $I_{35\text{ kV (2)}}=49.80e^{-156.35}$  A;  $I_{0.575\text{ kV}}=6802.78e^{-124.35}$  A;





15 pav.  $P_{110\text{ kV}}=12839035.91\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=6607303.75\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=8390587.78\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (1)}}=7863110.73\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=-2286621.05\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=-1001378.34\text{ VA}$ ;  $P_{0.575\text{ kV}}=-3146959.29\text{ VA}$ ;  $Q_{0.575\text{ kV}}=-4604230.10\text{ VA}$ ;

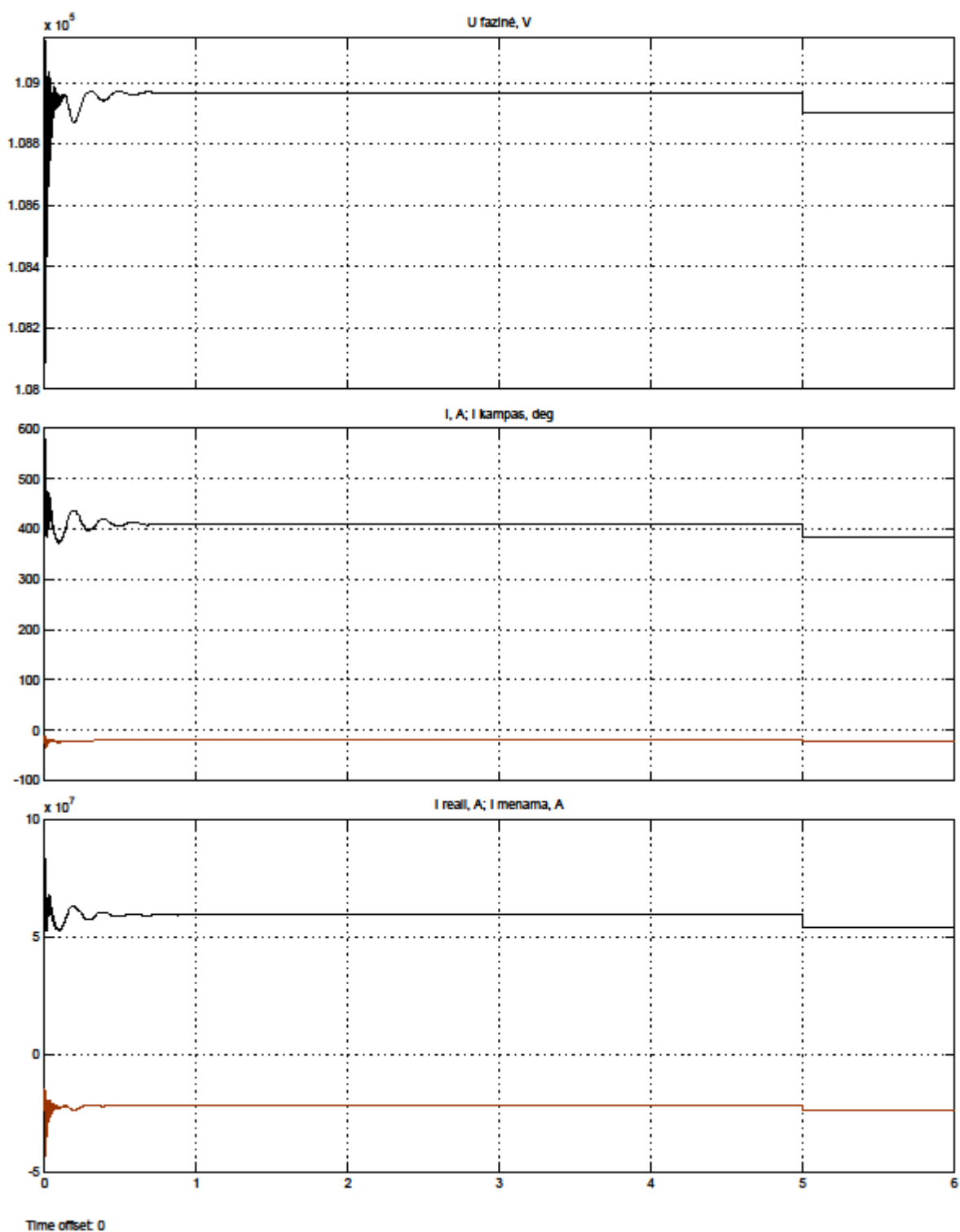


16 pav. VE. Greitis=0.89;  $v_{v\acute{e}jo}=9$  m/s;  $\delta_{men\check{c}iu}=0^0$

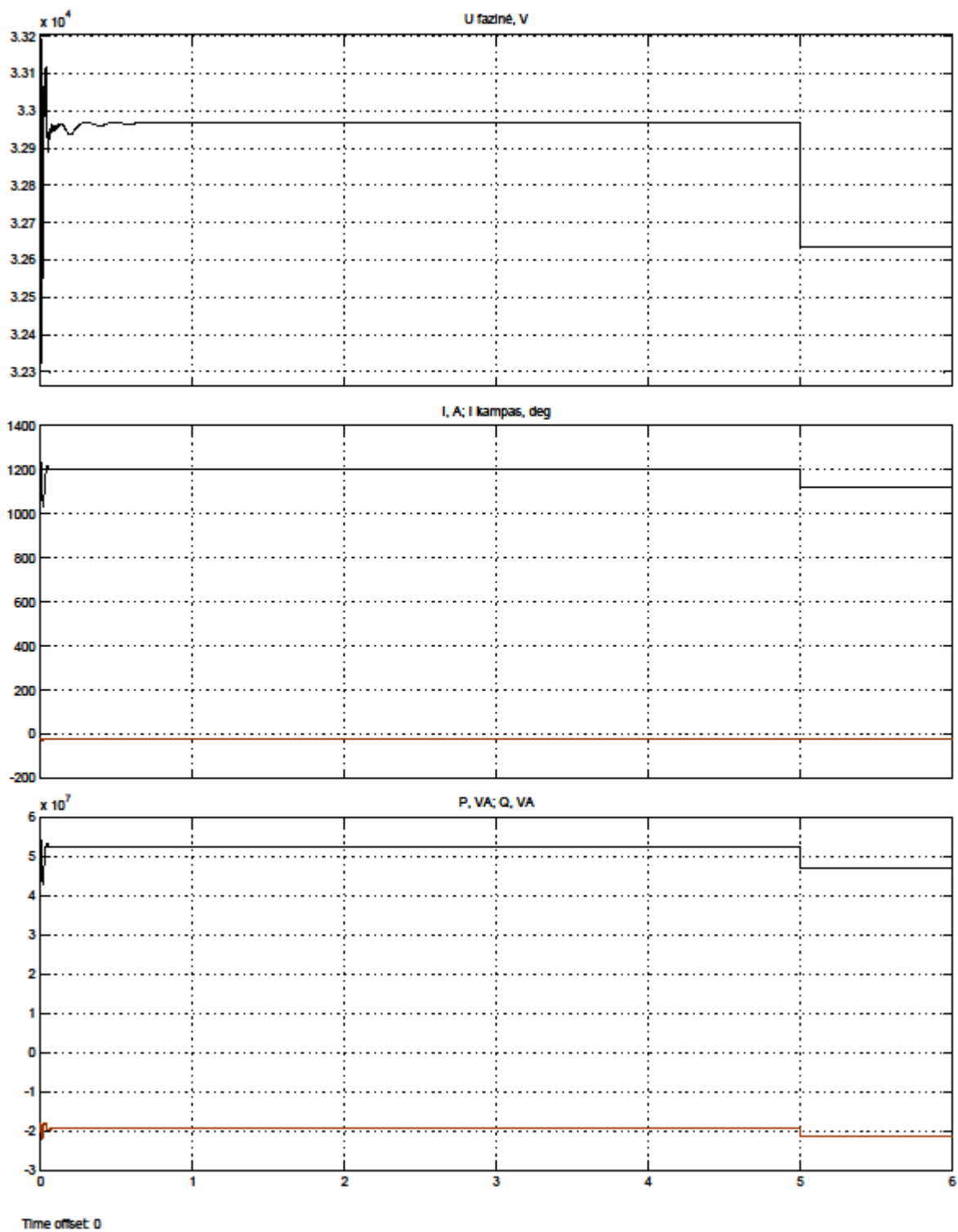
### 3 PRIEDAS. Maksimalios vartotojo galios įtaka jūrinei vėjo elektrinei.

$P_{\text{vartotojo}}=71989,8 \text{ kW}$

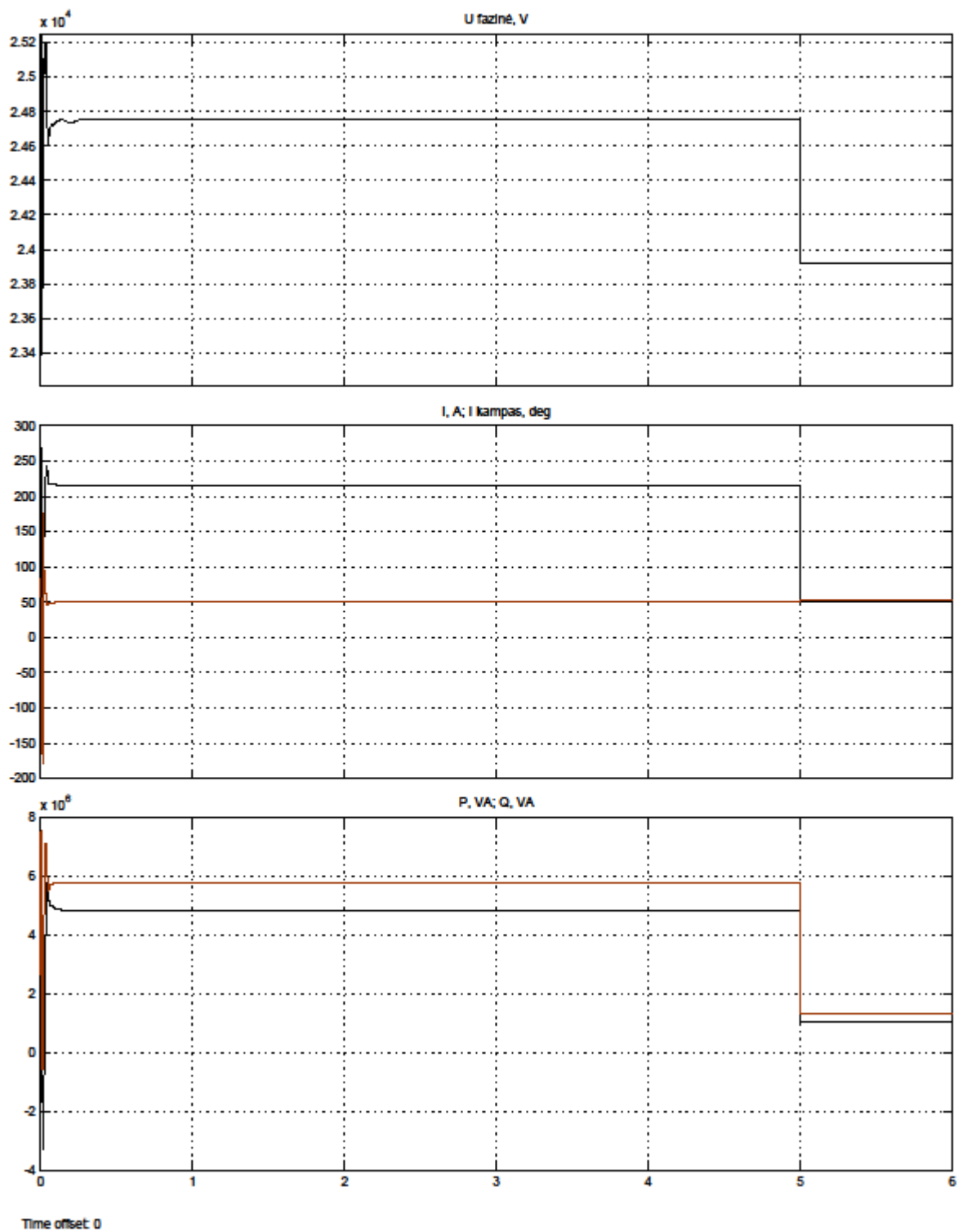
$t_{\text{matavimų}}=4,99 \text{ s}$



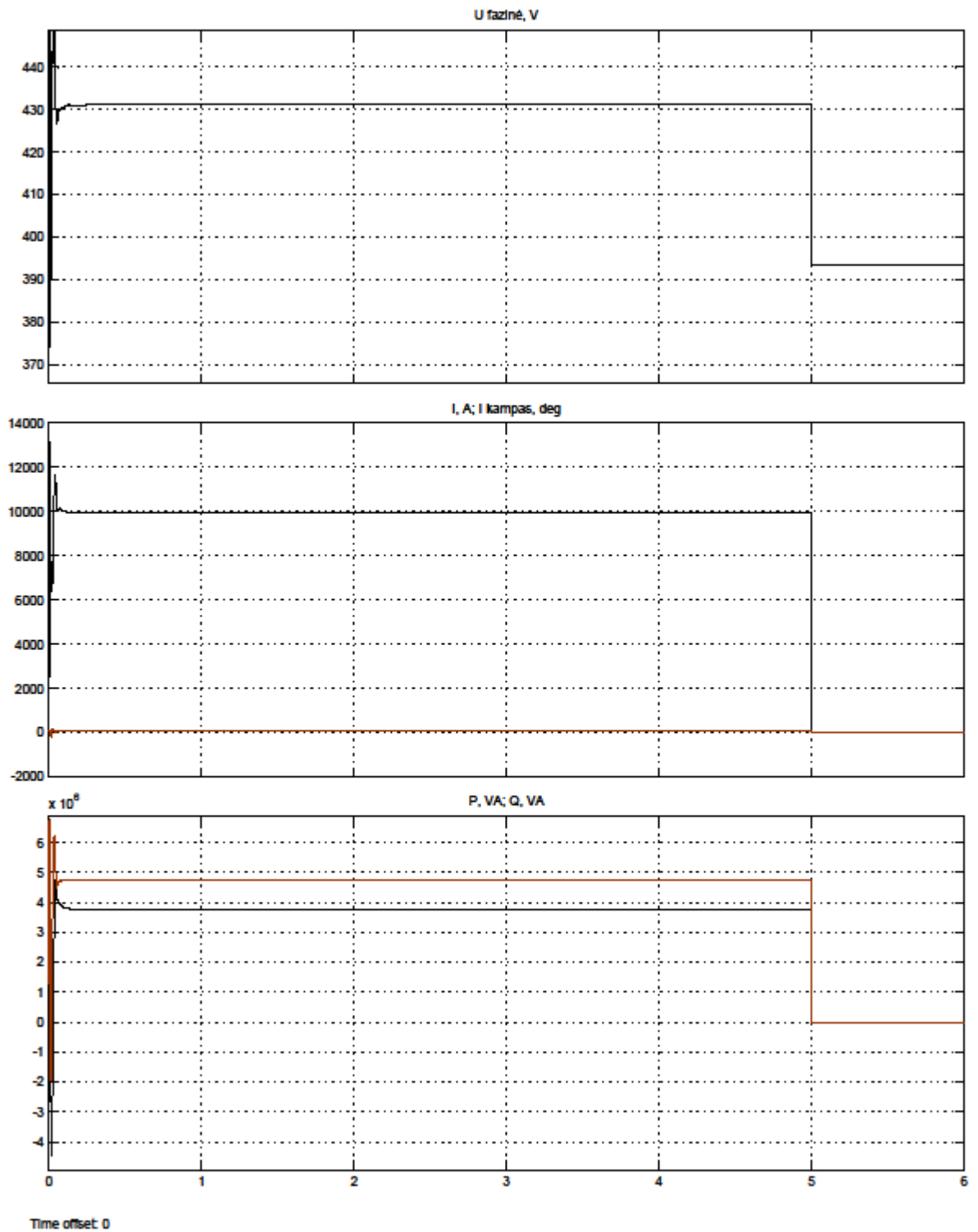
17 pav. 110 kV šynos.  $U=108967,28 \text{ V}$ ;  $I=410,2e^{-19,86} \text{ A}$ ;  $P=59456390,73 \text{ VA}$ ;  $Q=-21481654,73 \text{ VA}$ .



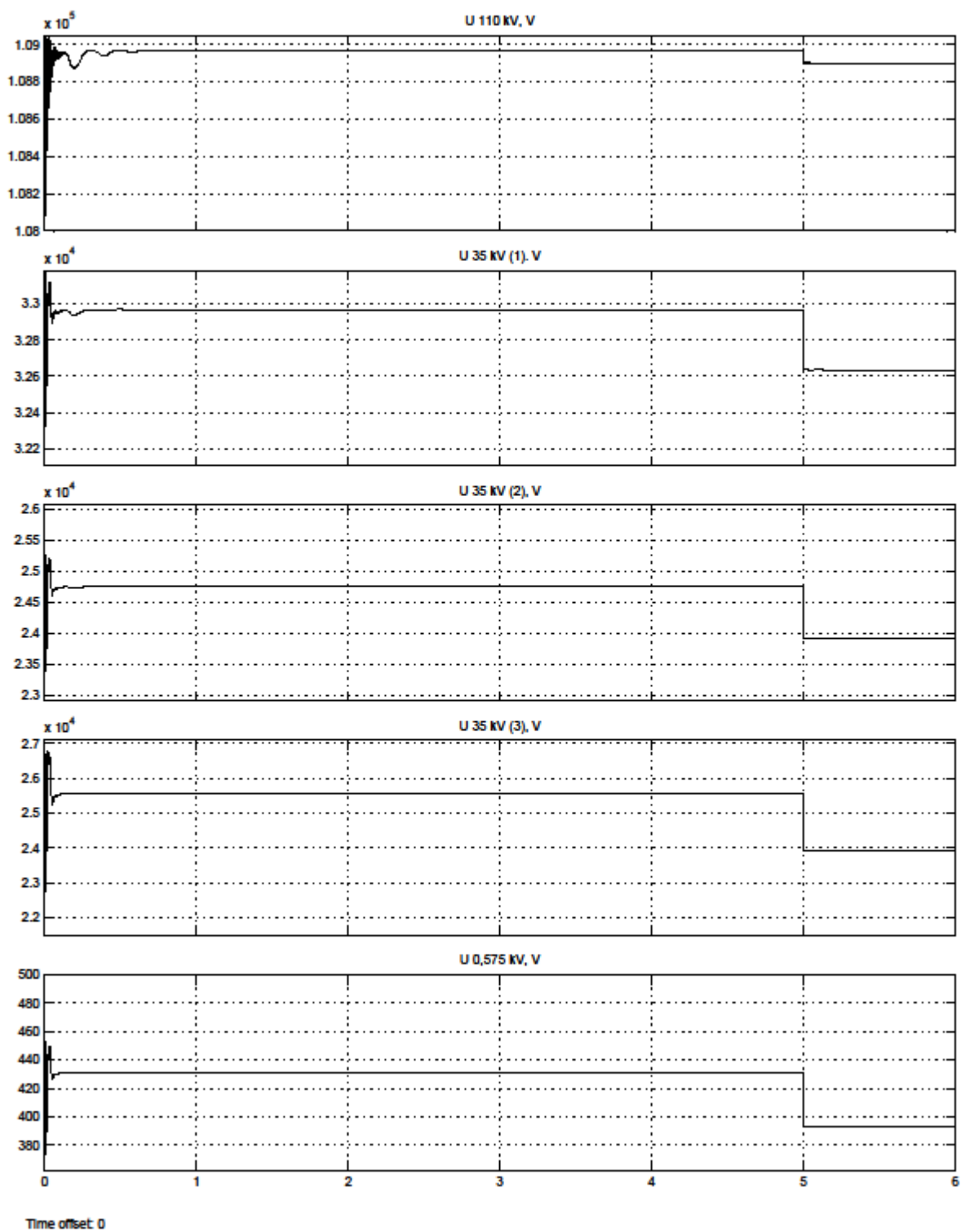
18 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=32967,19$  V;  $I=1200,26e^{-20,32}$  A;  $P=52478175,60$  VA;  $Q=-19428386,02$  VA.



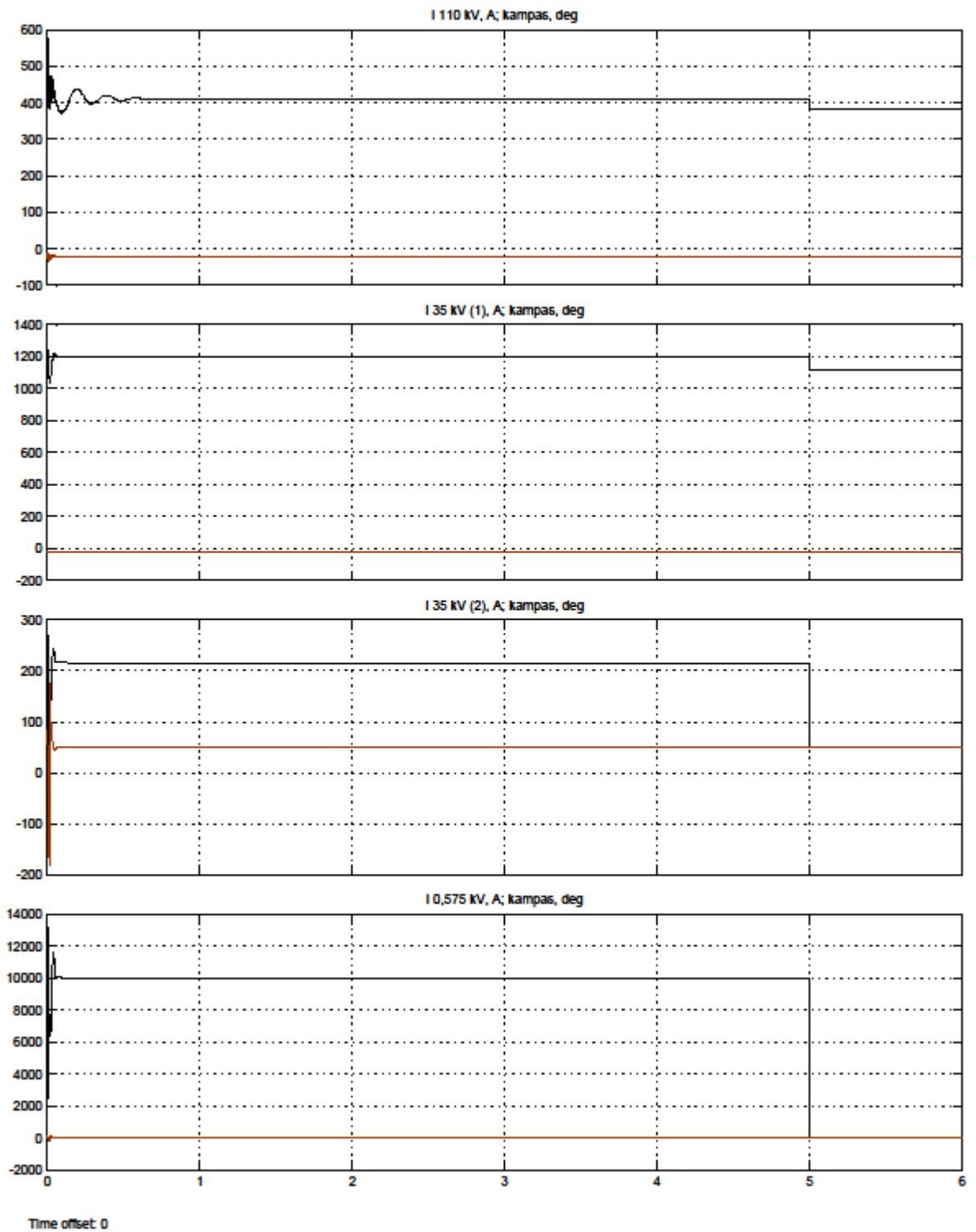
19 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=24755,50$  V;  $I=215,07e^{50,08}$  A;  $P=4831918,50$  VA;  
 $Q=5774529,19$  VA.



20 pav. 575 V šynos.  $U=431,25$  V;  $I=9942,50e^{51,62}$  A;  $P=3764423,35$  VA;  $Q=4753721,05$  VA.

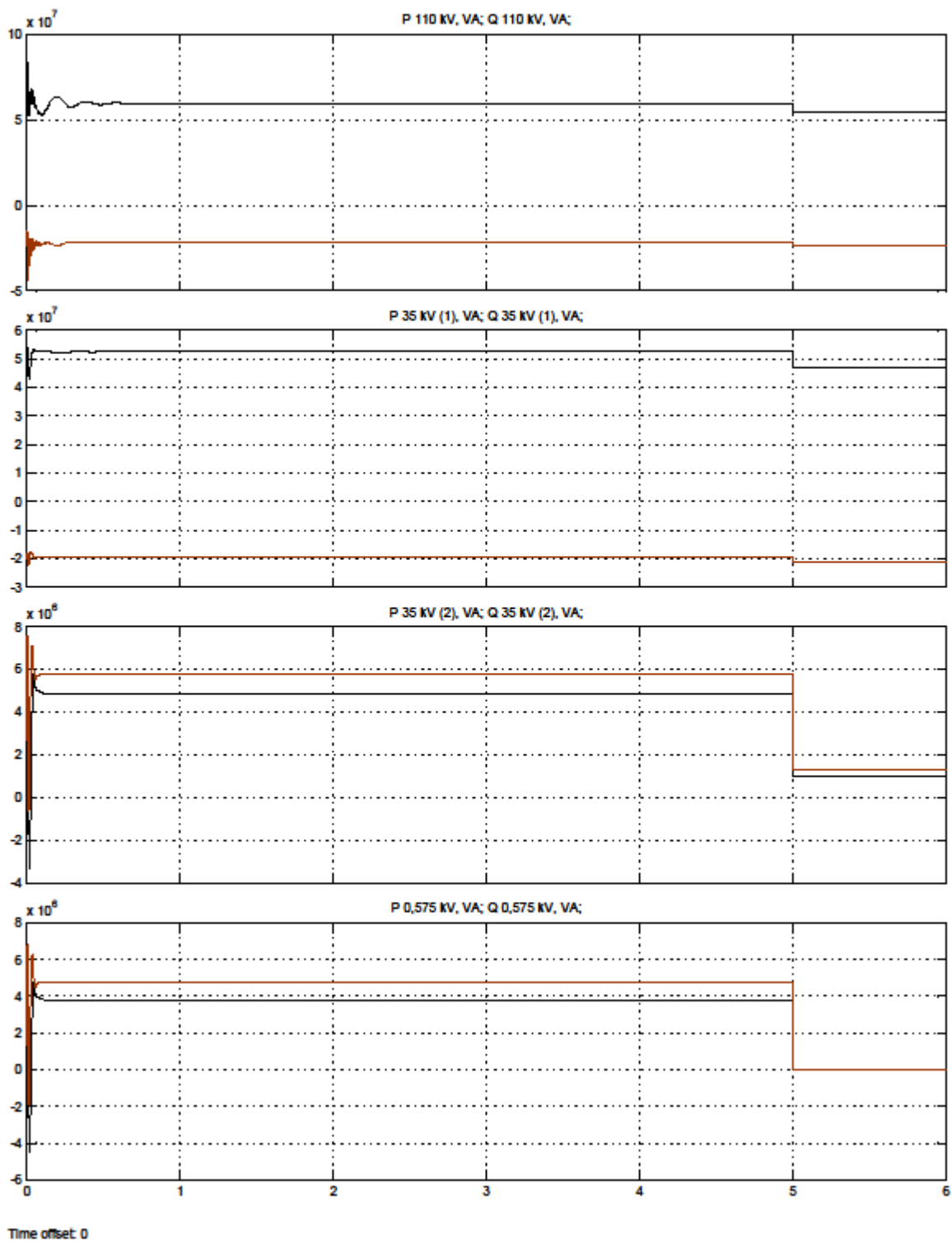


21 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=108967,28\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=32967,19\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=24755,50\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=25571,07\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=431,25\text{ V}$ .

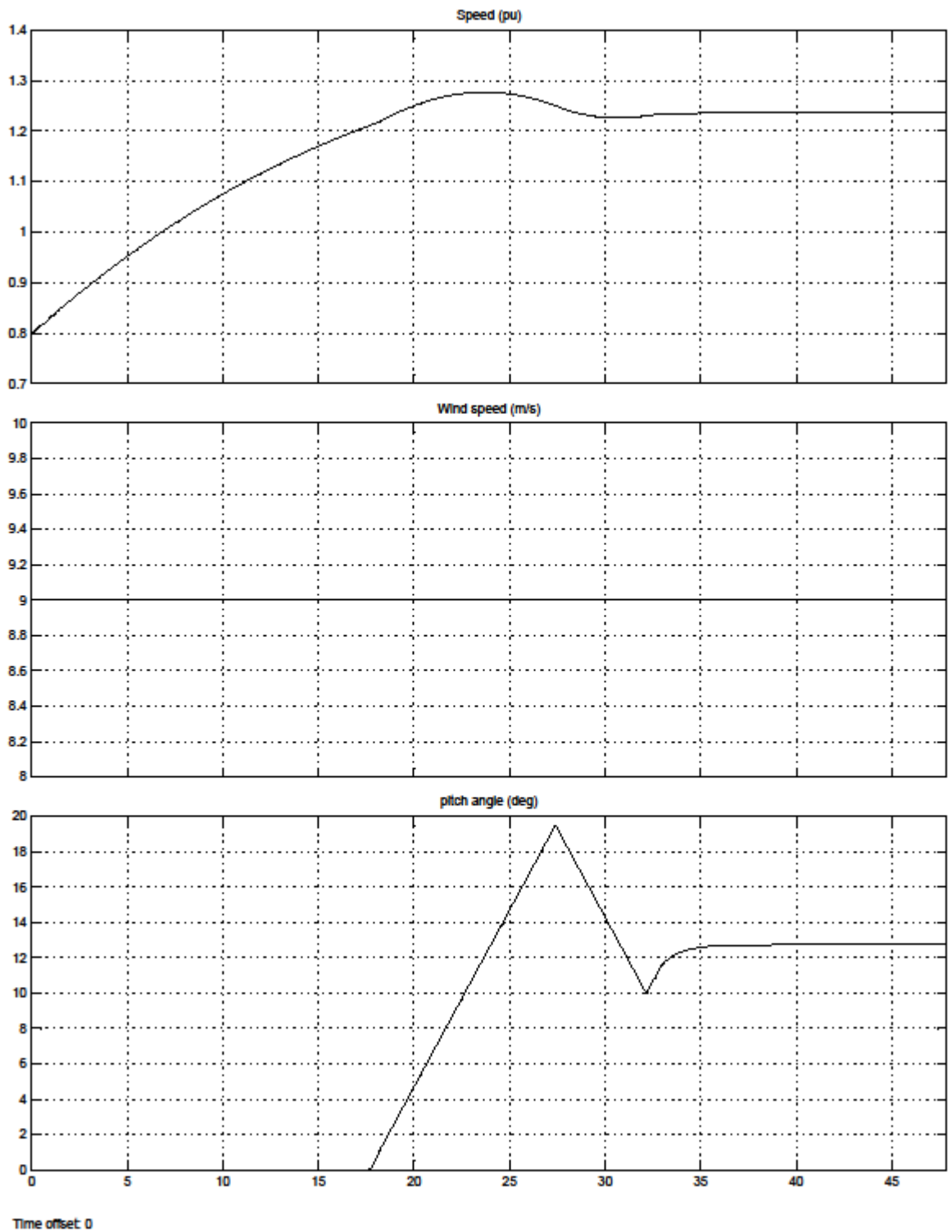


22 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=410,23e^{-19,86}$  A;  $I_{35\text{ kV (1)}}=1200,26e^{-20,32}$  A;  $I_{35\text{ kV (2)}}=215,07e^{50,08}$  A;  $I_{0,575\text{ kV}}=9942,50e^{51,62}$  A;





23 pav.  $P_{110\text{ kV}}=59456390,73\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=-21481654,73\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=52478175,60\text{ VA}$ ;  
 $Q_{35\text{ kV (1)}}=-19428386,02\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=4831918,50\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=5774529,19\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=3764423,35\text{ VA}$ ;  
 $Q_{0,575\text{ kV}}=4753721,05\text{ VA}$ ;

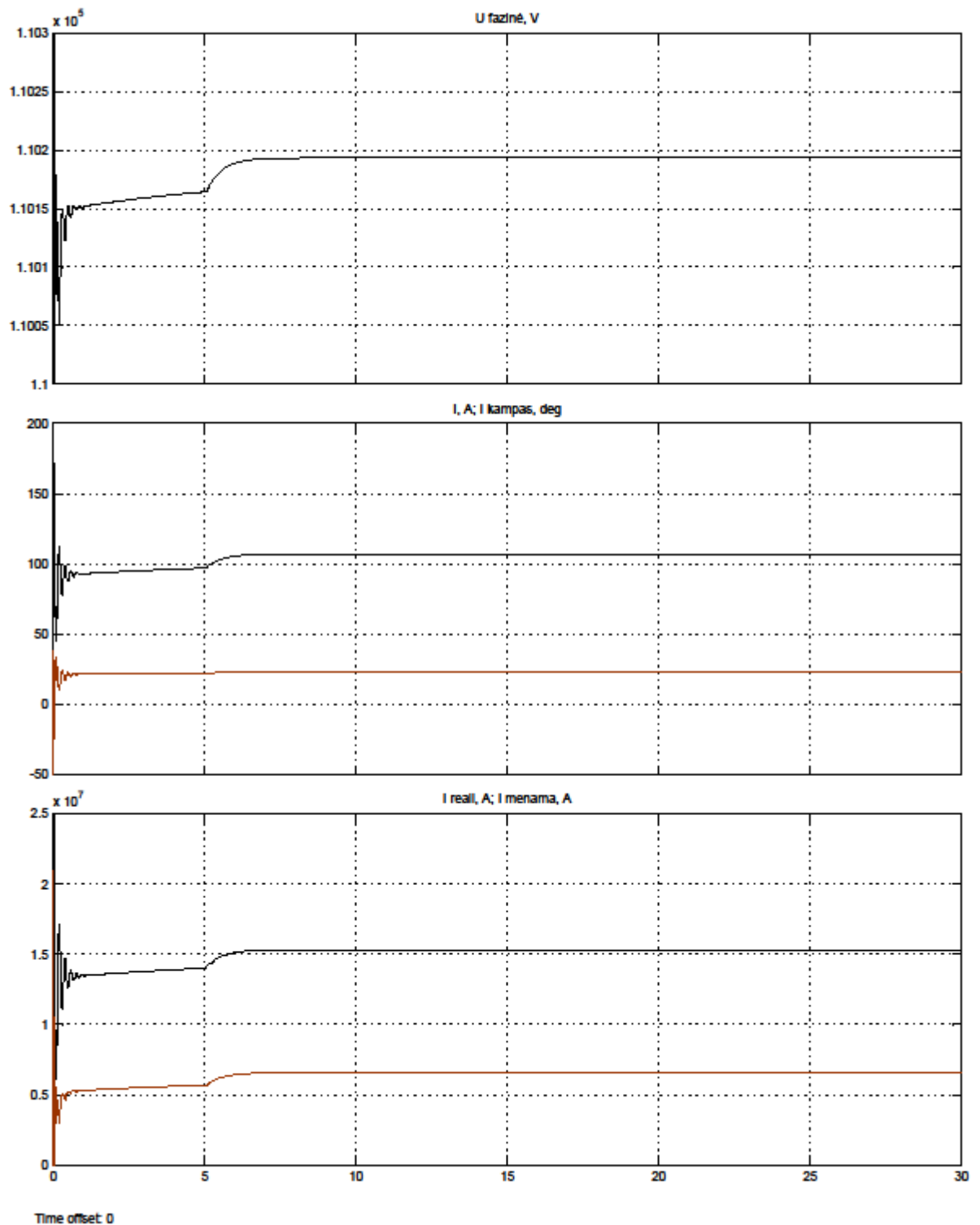


24 pav. VE. Greitis=1.24;  $v_{v\acute{e}j\acute{o}}=9,00$  m/s;  $\delta_{men\check{c}i\check{u}}=12,73^{\circ}$

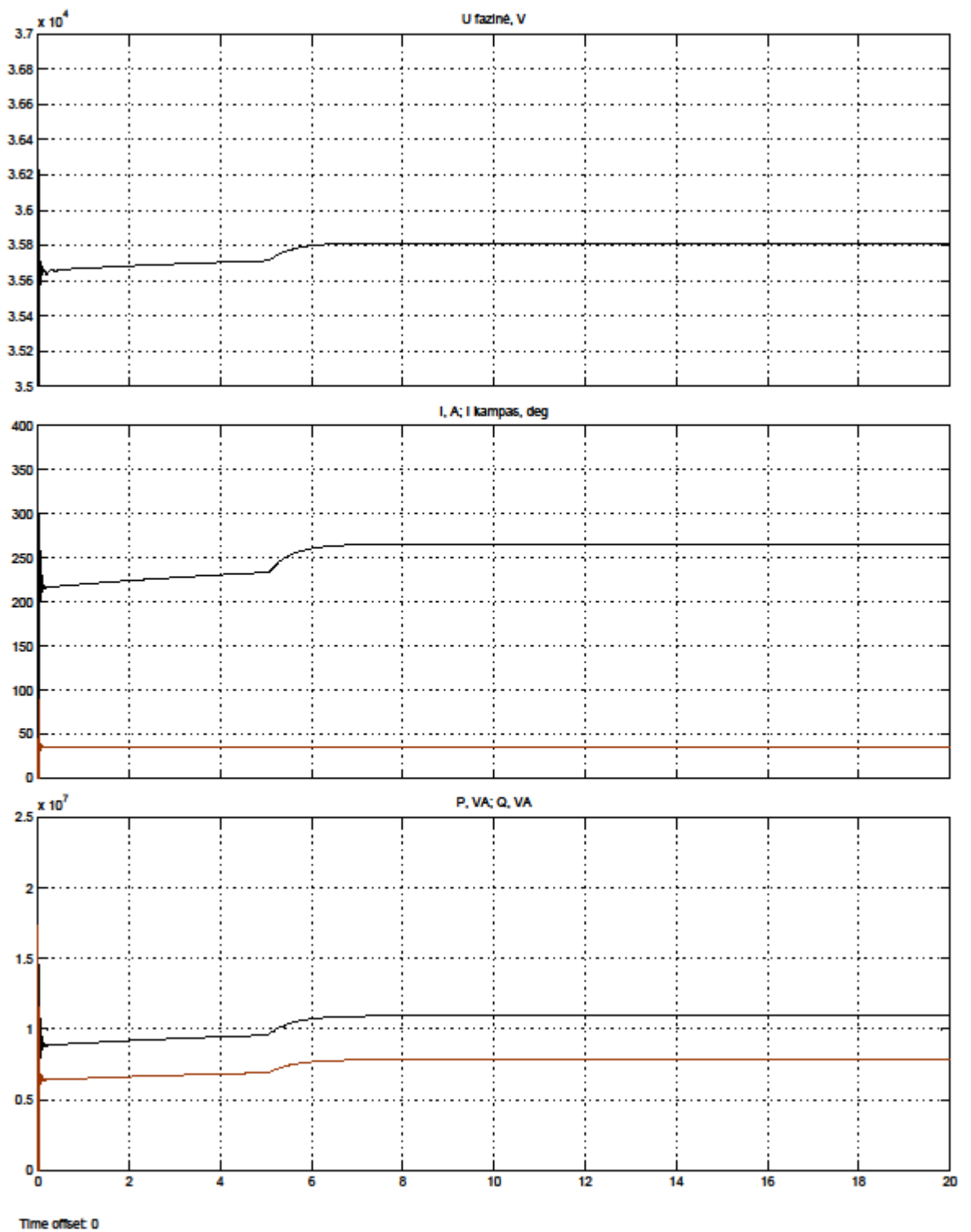
4 PRIEDAS. Sausumos vėjo elektrinės kontrolinio modeliavimo rezultatai.

$P_{akrovo} = 500 \text{ kW}$

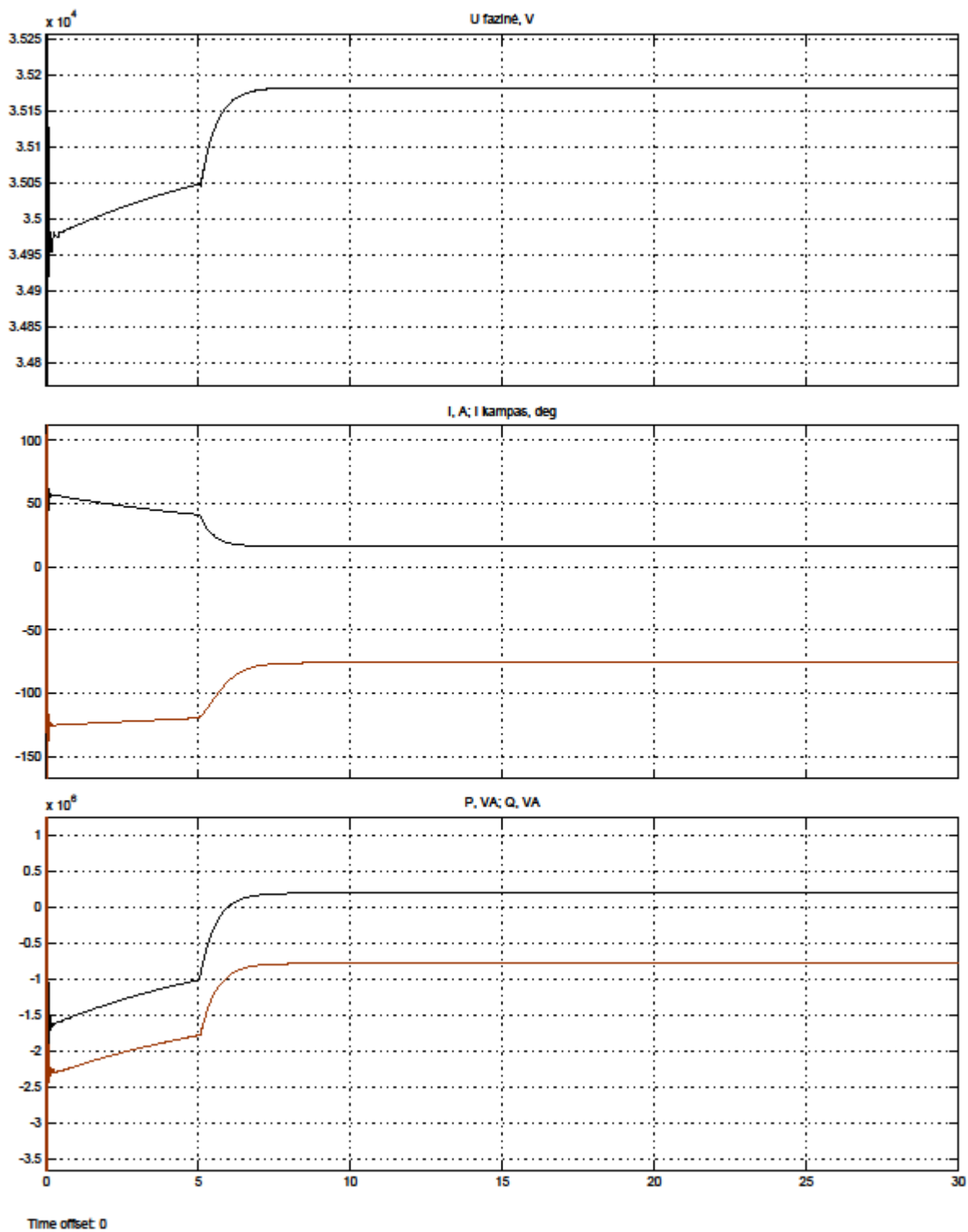
$v_{vėjo} = 5,207 \text{ m/s}$



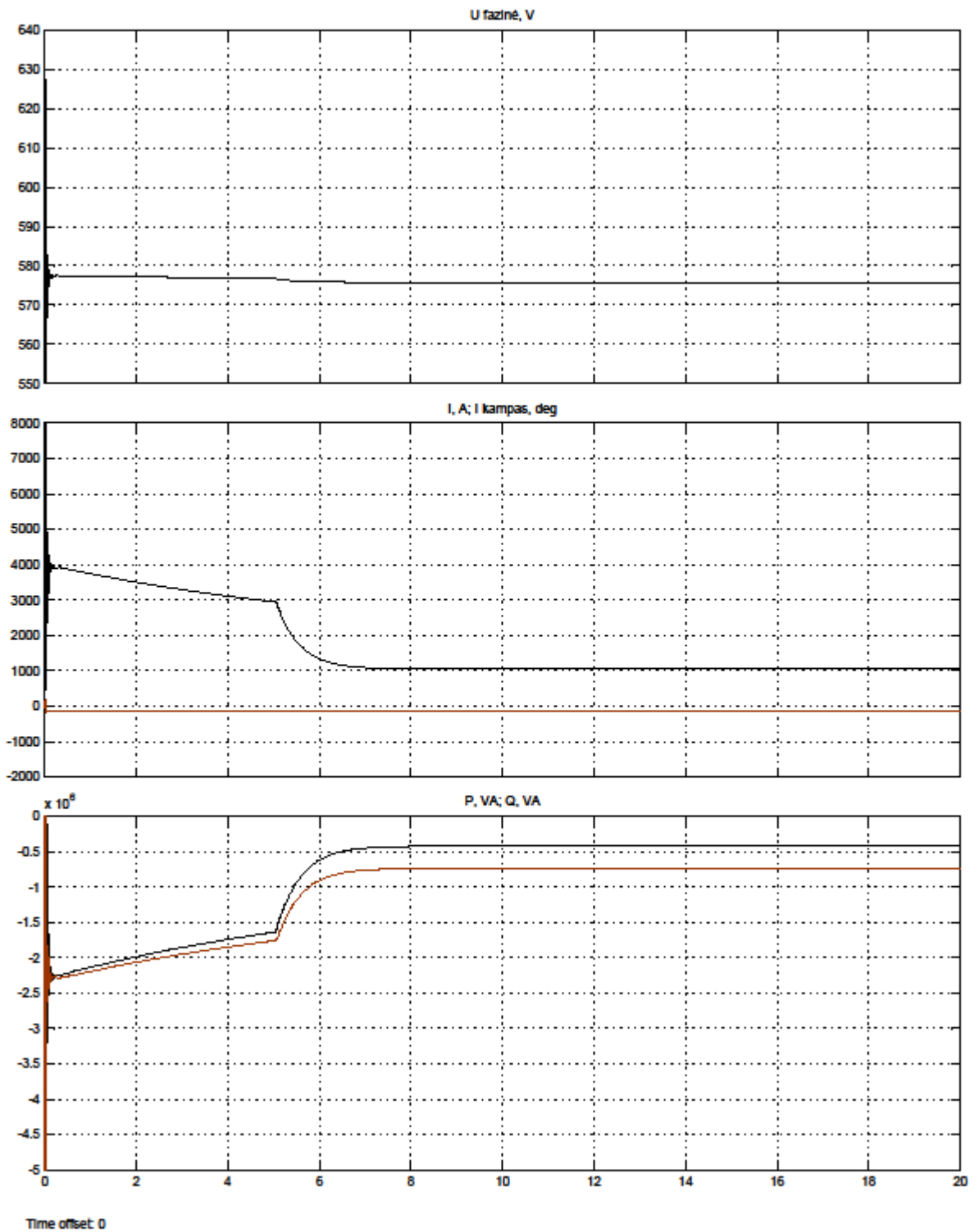
25 pav. 110 kV šynos.  $U = 110193,22 \text{ V}$ ;  $I = 107e^{23,2} \text{ A}$ ;  $P = 15321346,44 \text{ VA}$ ;  $Q = 6567773,14 \text{ VA}$ .



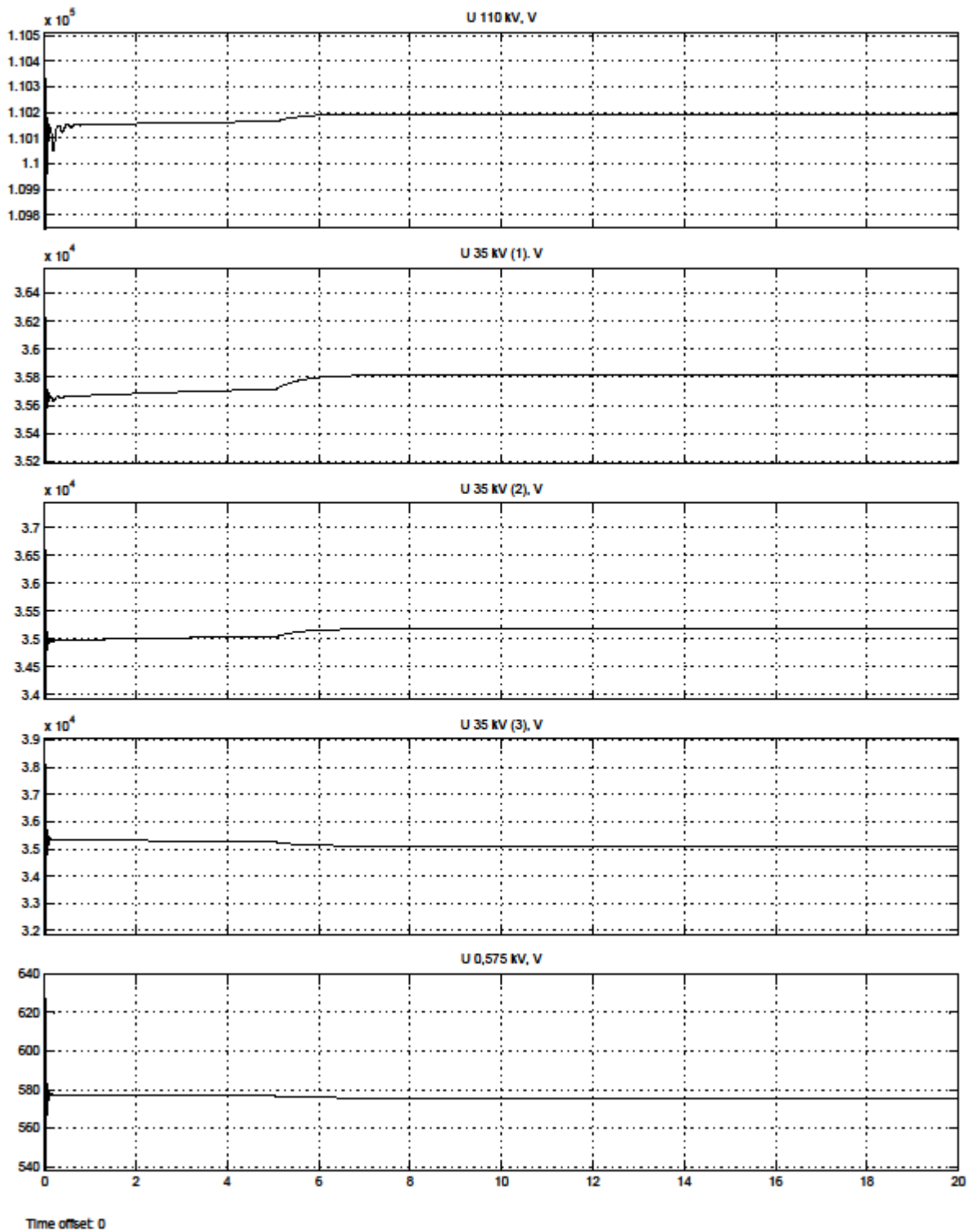
26 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=35814,65$  V;  $I=265,64e^{35,58}$  A;  $P=10942549,49$  VA;  
 $Q=7828635,56$  VA.



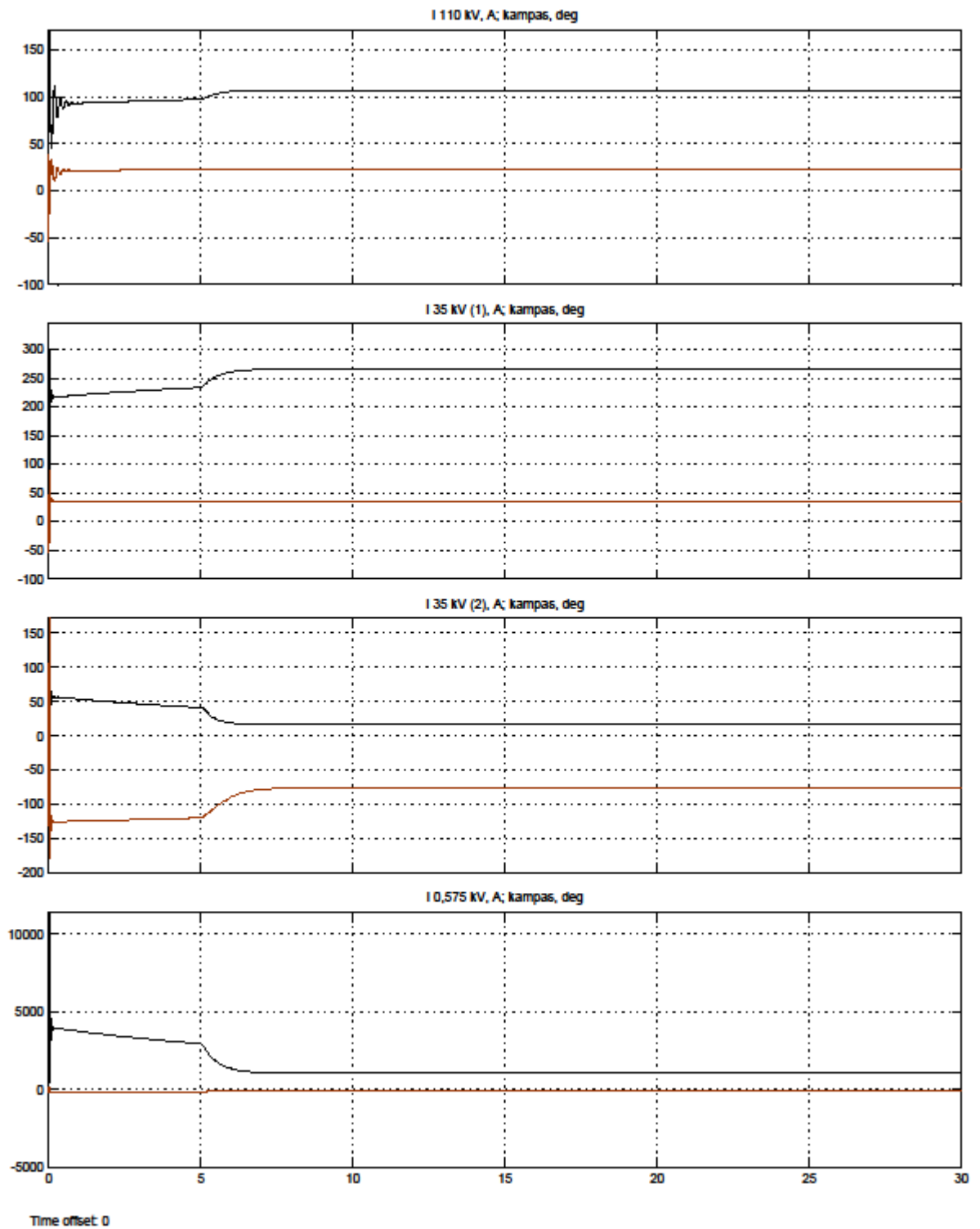
27 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=35182,31$  V;  $I=16,22e^{-75,94}$  A;  $P=196059,65$  VA;  $Q=-782704,65$  VA.



28 pav. 575 V šynos.  $U=575,77$  V;  $I=1046,97e^{-119,85}$  A;  $P=-424368,98$  VA;  $Q=-739384,81$  VA.

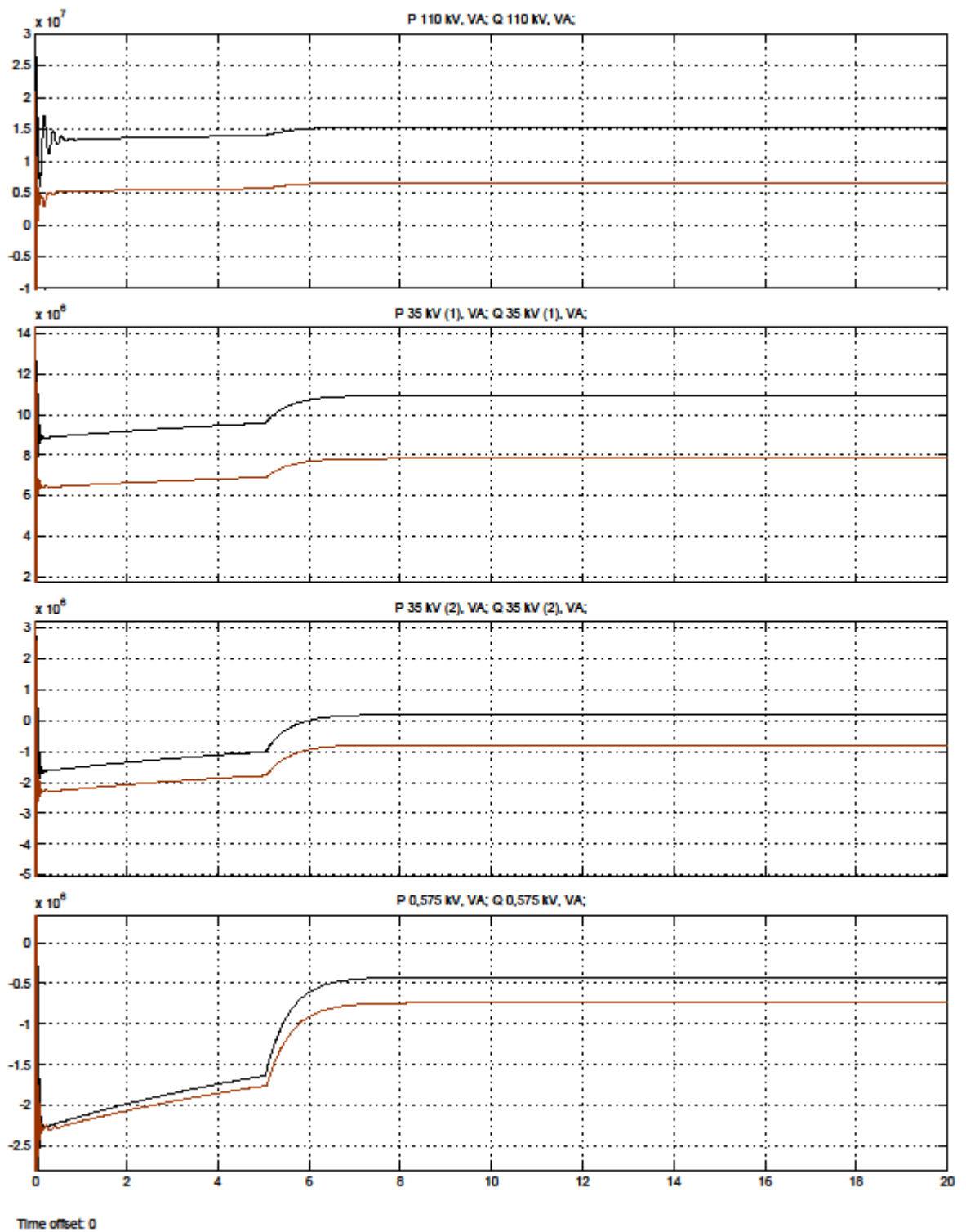


29 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=110193,22\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=35814,65\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=35182,31\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=35113,07\text{ kV}$ ;  $U_{575\text{ V}}=575,77\text{ V}$ .

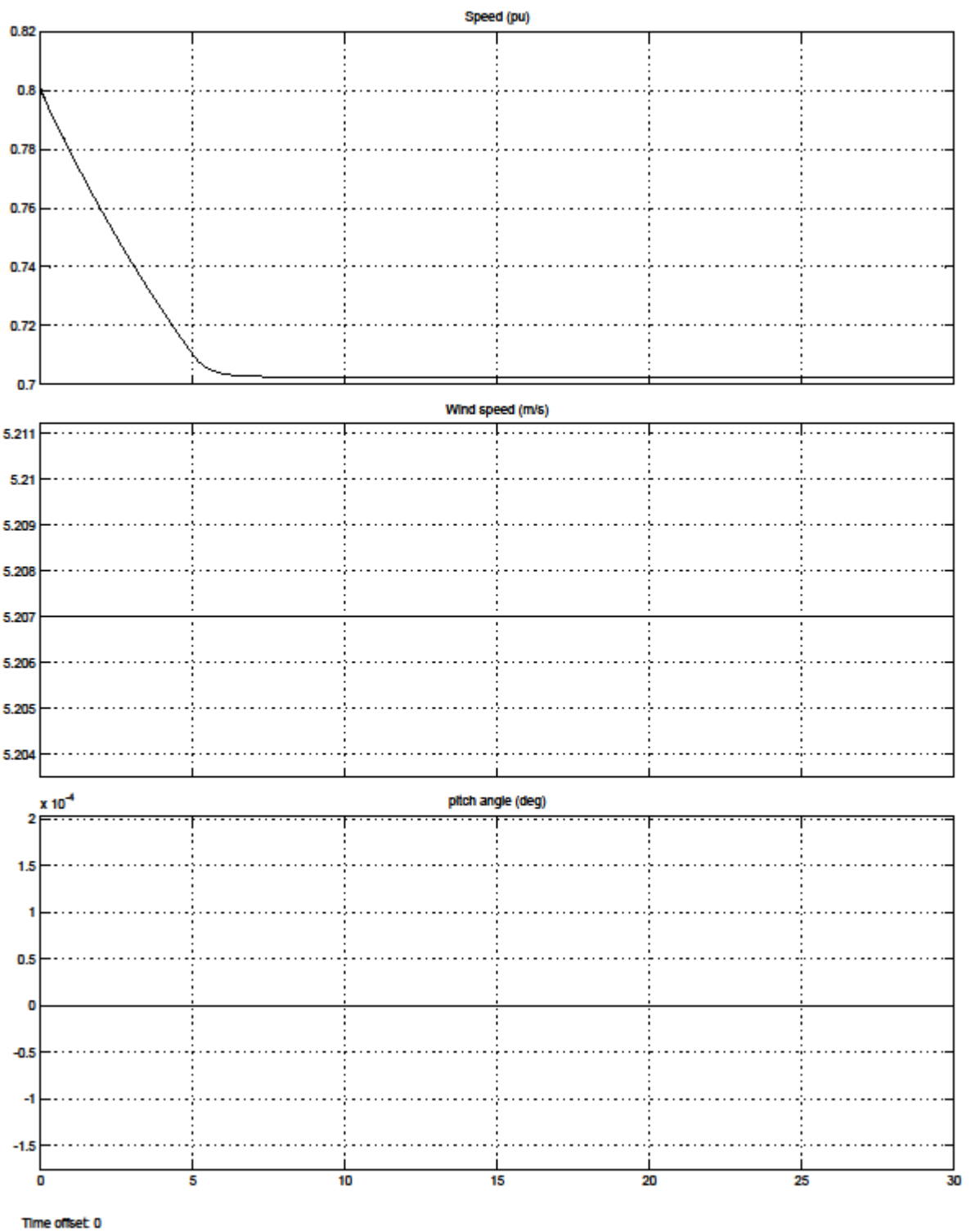


30 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=106,97e^{23,20}$  A;  $I_{35\text{ kV (1)}}=265,64e^{35,58}$  A;  $I_{35\text{ kV (2)}}=16,22e^{-75,94}$  A;  
 $I_{0,575\text{ kV}}=1046,97e^{-119,85}$  A;





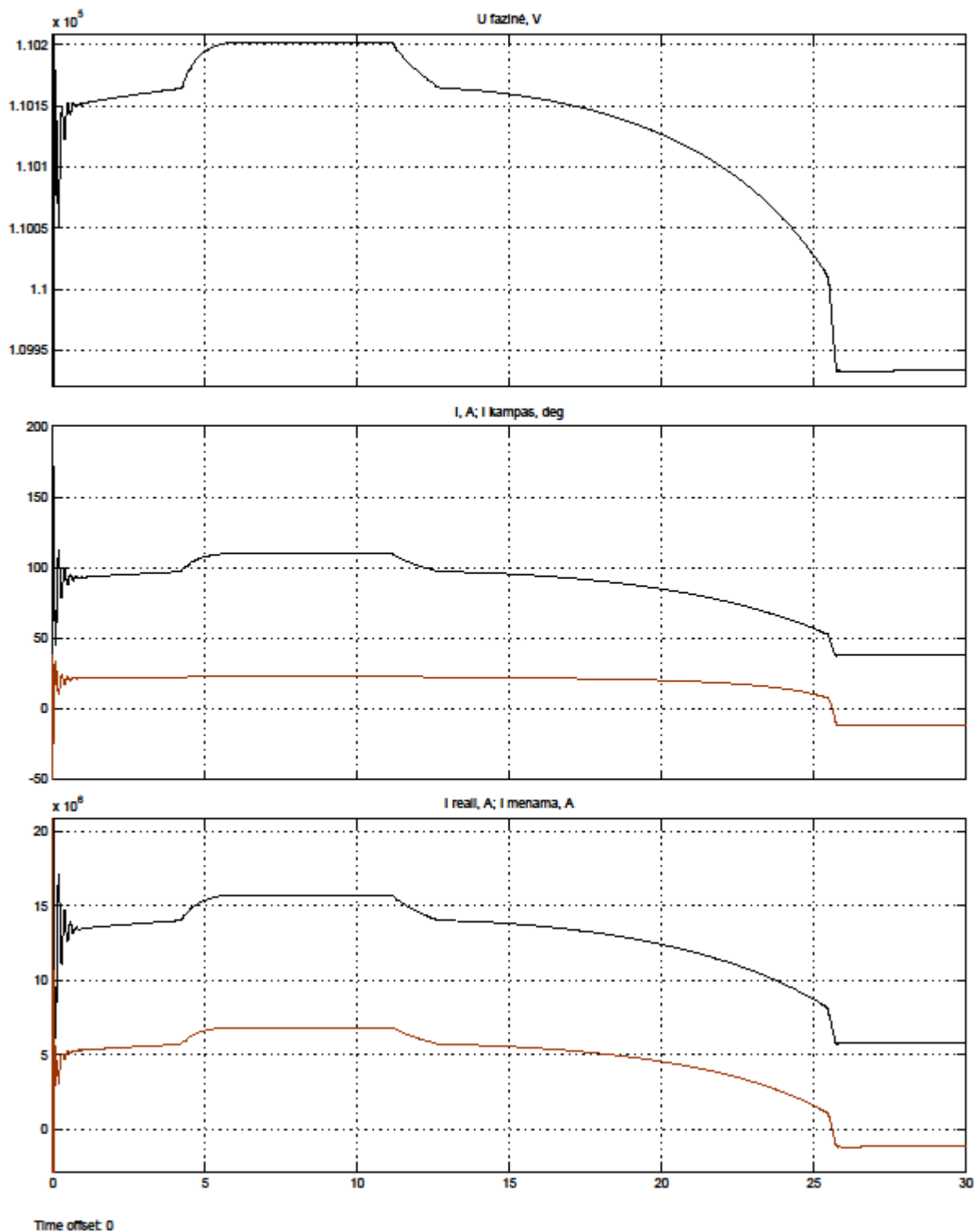
31 pav.  $P_{110\text{ kV}}=15321346,44\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=6567773,14\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(1)}=10942549,49\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(1)}=7828635,56\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(2)}=196059,65\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(2)}=-782704,65\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=-424368,98\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=-739384,81\text{ VA}$ ;



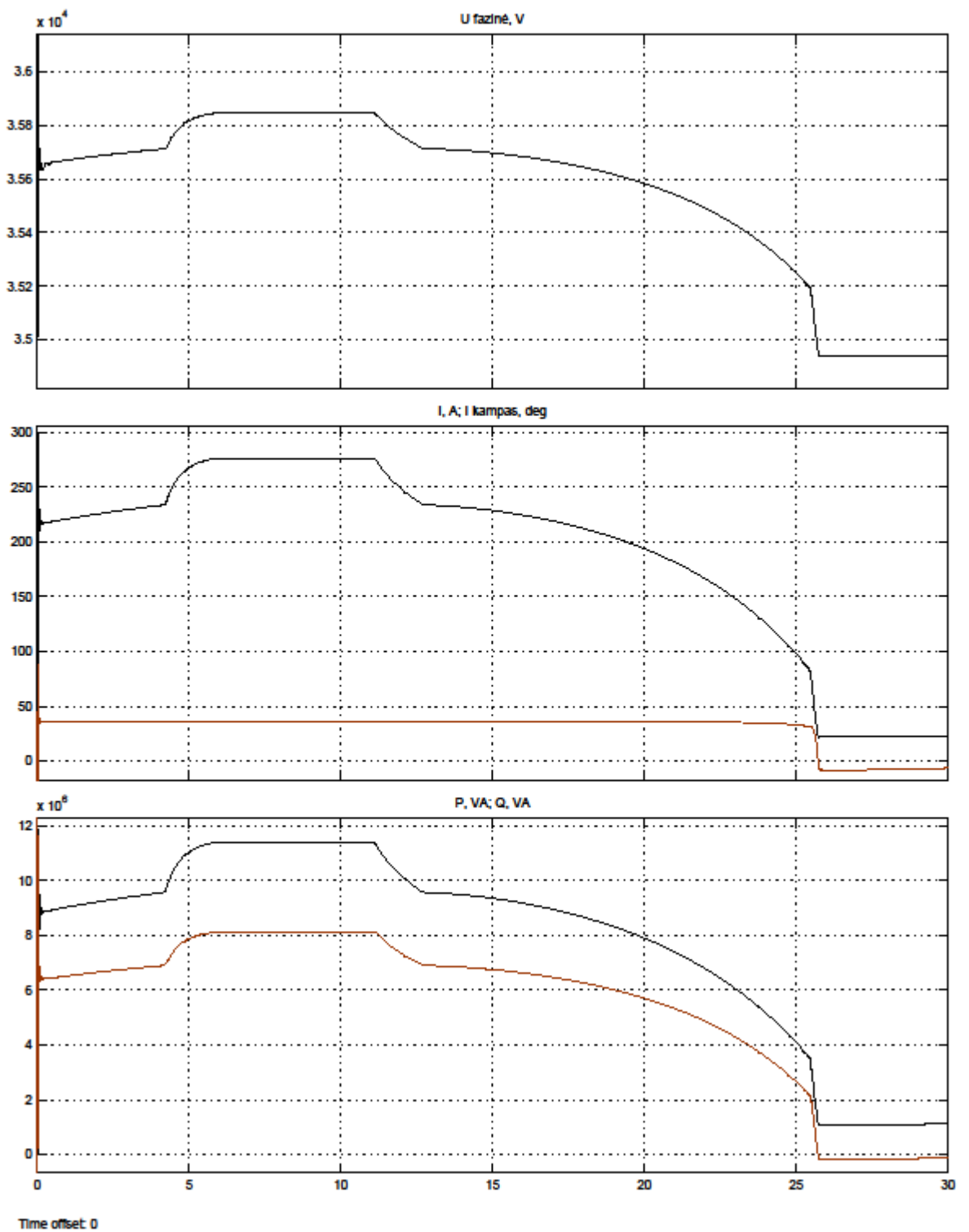
32 pav. VE. Greitis=0.7;  $v_{\text{vėjo}}=5,21$  m/s;  $\delta_{\text{menčių}}=0^0$

5 PRIEDAS. Staigus vėjo gūσιο įtaka sausumos elektrinei.

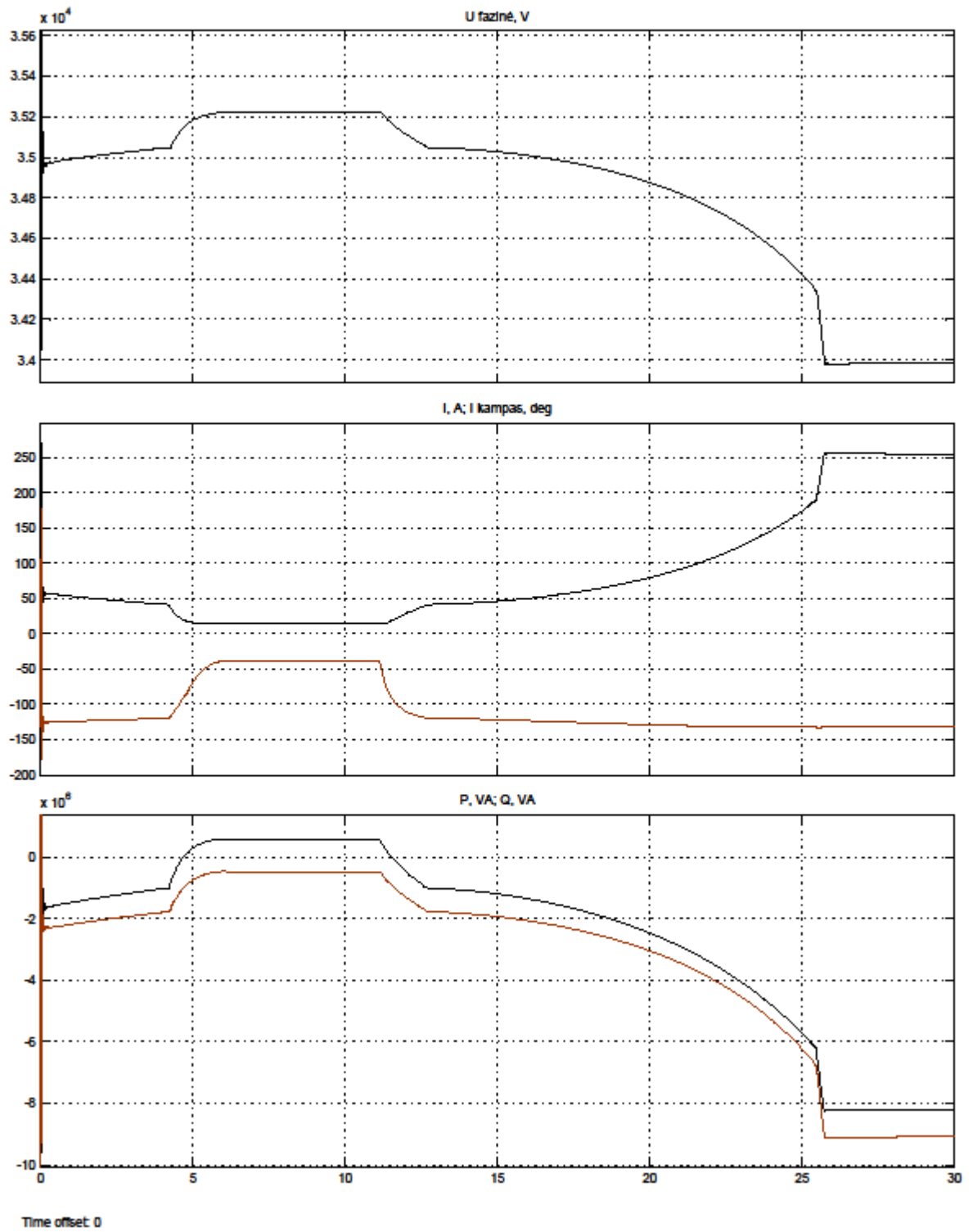
Šio modeliavimo metu vėjo greitis yra keičiamas nuo 0 m/s iki 30 m/s per 5 s.



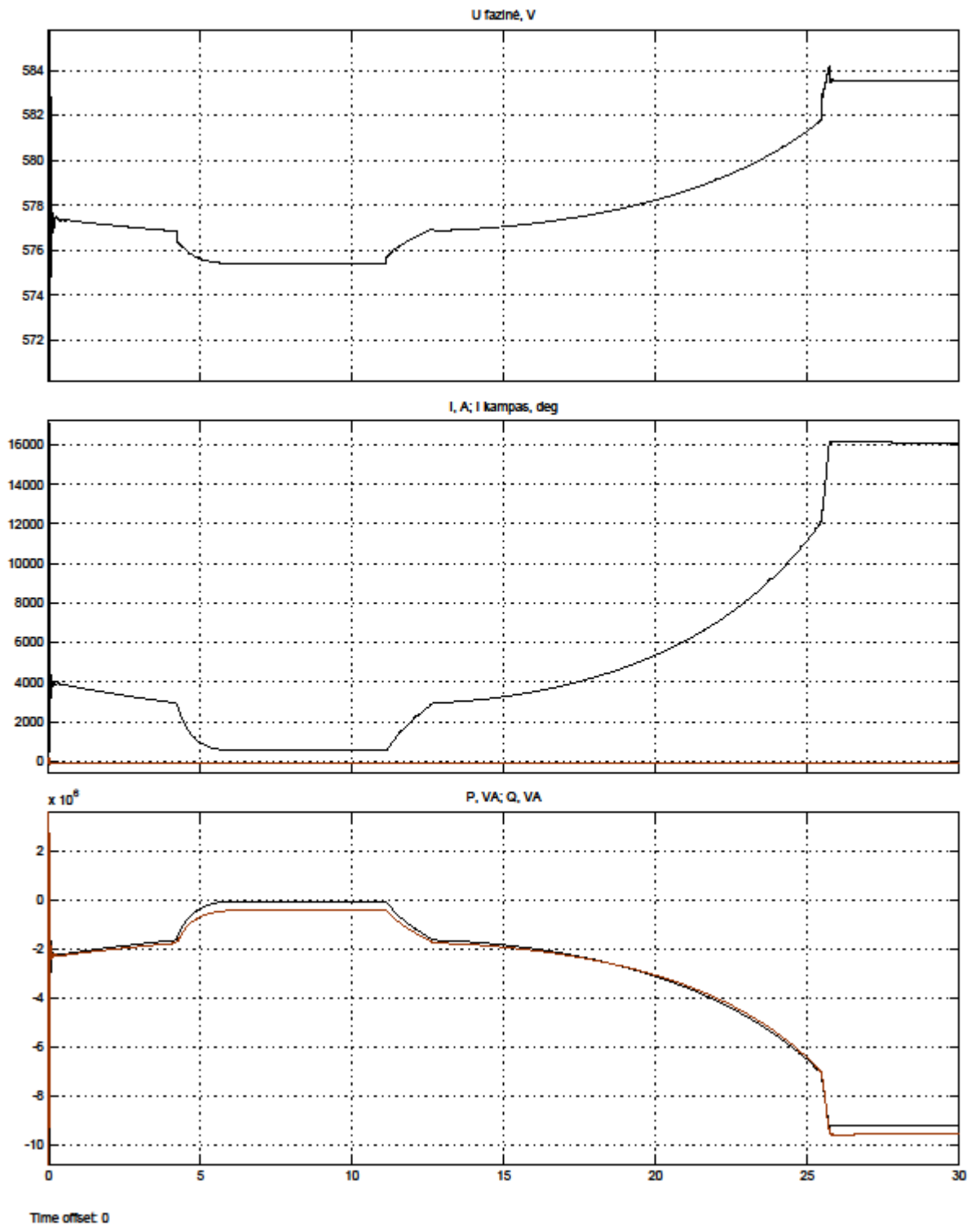
33 pav. 110 kV šynos.  $U=109934,26$  V;  $I=37,92e^{-11,26}$  A;  $P=5781809,89$  VA;  $Q=-1151475,75$  VA.



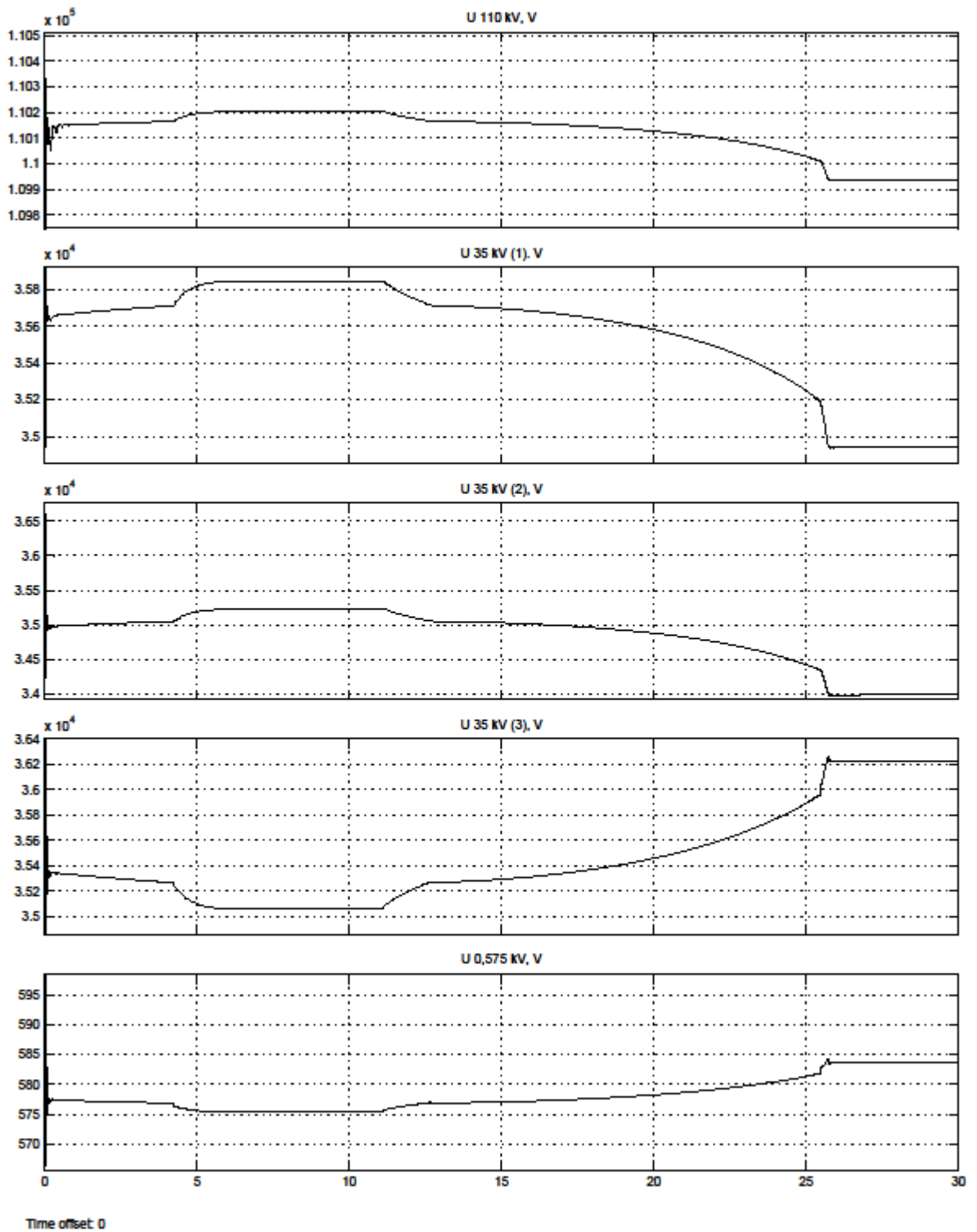
34 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=34942,13$  V;  $I=22,86e^{-6,34}$  A;  $P=1122887,16$  VA;  $Q=-1151475,75$  VA.



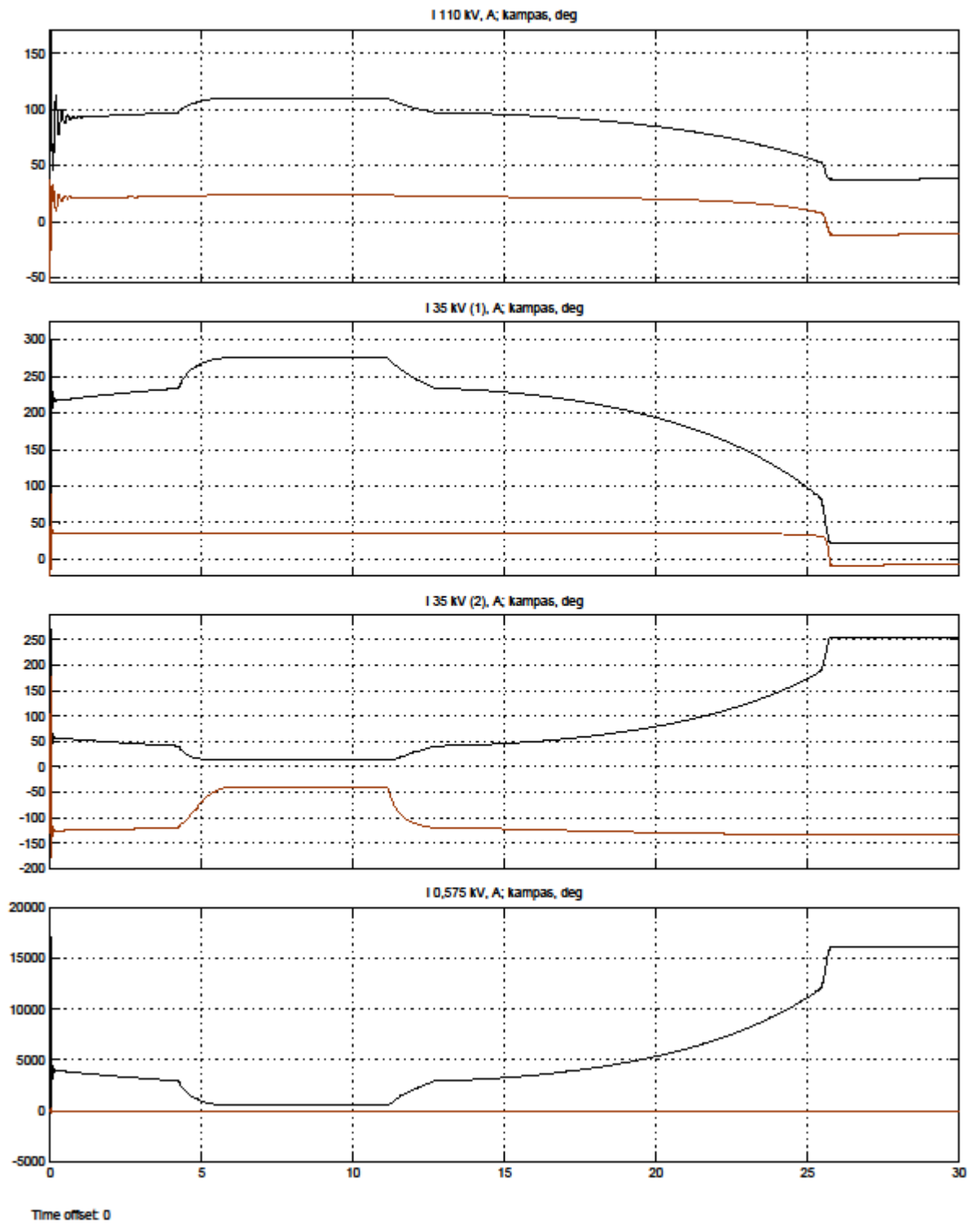
35 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=33986,37$  V;  $I=254,43e^{-132,12}$  A;  $P=-8201107,25$  VA;  $Q=-9071077,86$  VA.



36 pav. 575 V šynos.  $U=583,52$  V;  $I=16080,95e^{-133,92}$  A;  $P=-9205190,28$  VA;  $Q=-9558584,31$  VA.

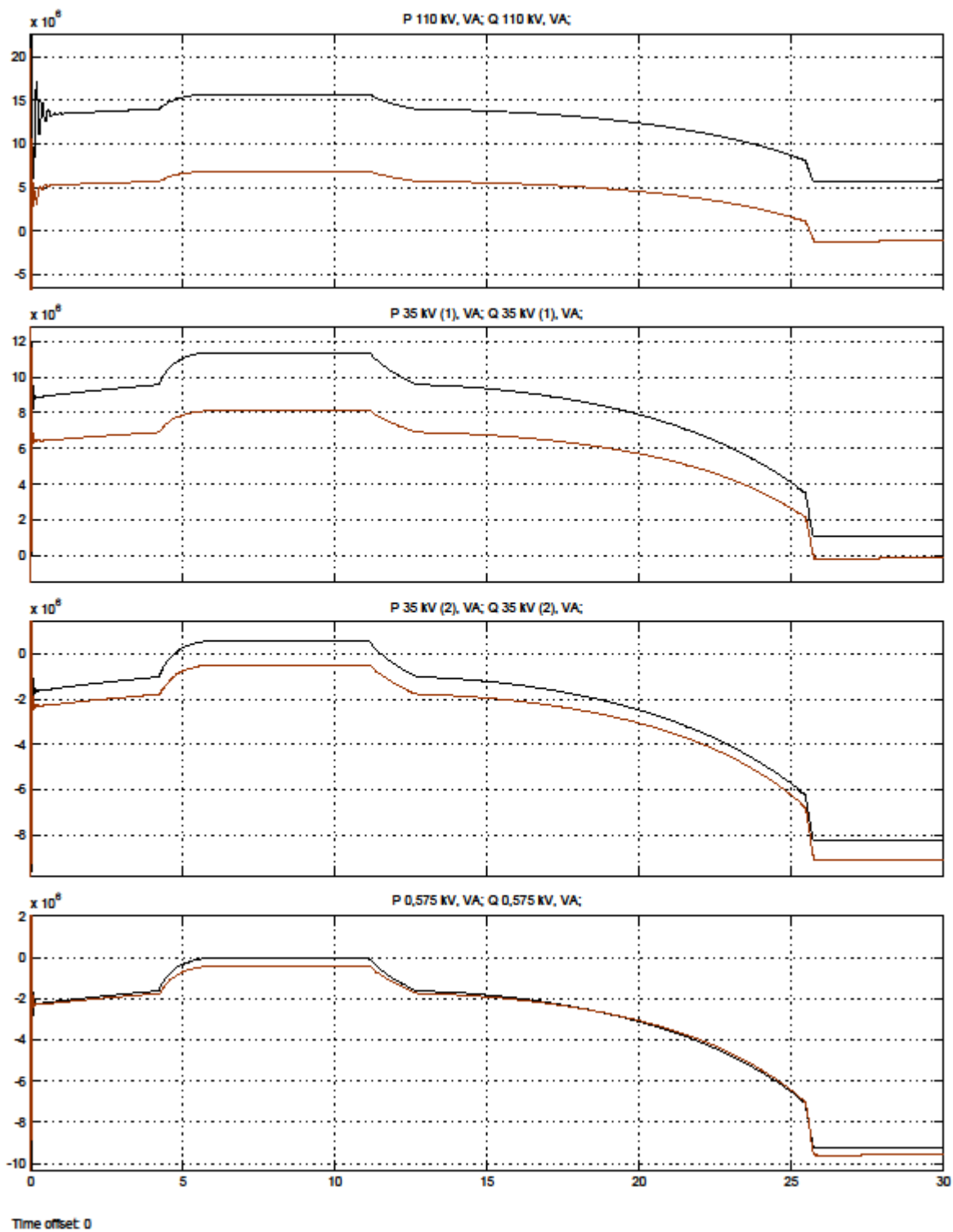


37 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=109934,26\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=34942,13\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=33986,37\text{ kV}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=36220,51\text{ kV}$ ;  $U_{575\text{ V}}=583,52\text{ V}$ .

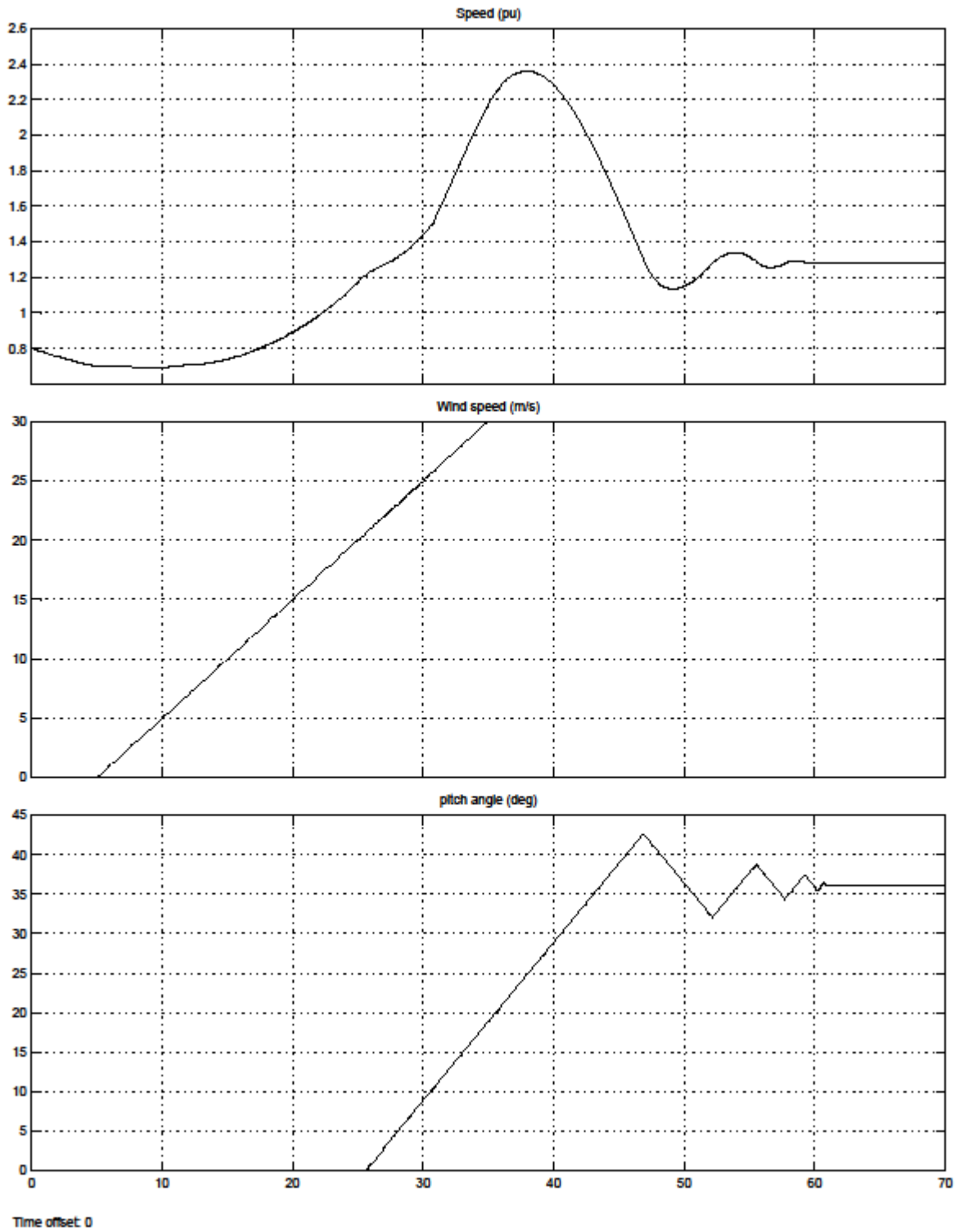


38 pav. I ir kampai.  $I_{110 \text{ kV}}=37,92e^{-11,26} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (1)}}=22,86e^{-6,34} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (2)}}=254,43e^{-132,12} \text{ A}$ ;  
 $I_{0,575 \text{ kV}}=16080,95e^{-133,92} \text{ A}$ ;





39 pav.  $P_{110\text{ kV}}=5781809,89\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=-1151475,75\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=1122887,16\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (1)}}=-124832,04\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=-8201107,25\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=-9071077,86\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=-9205190,28\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=-9558584,31\text{ VA}$ ;

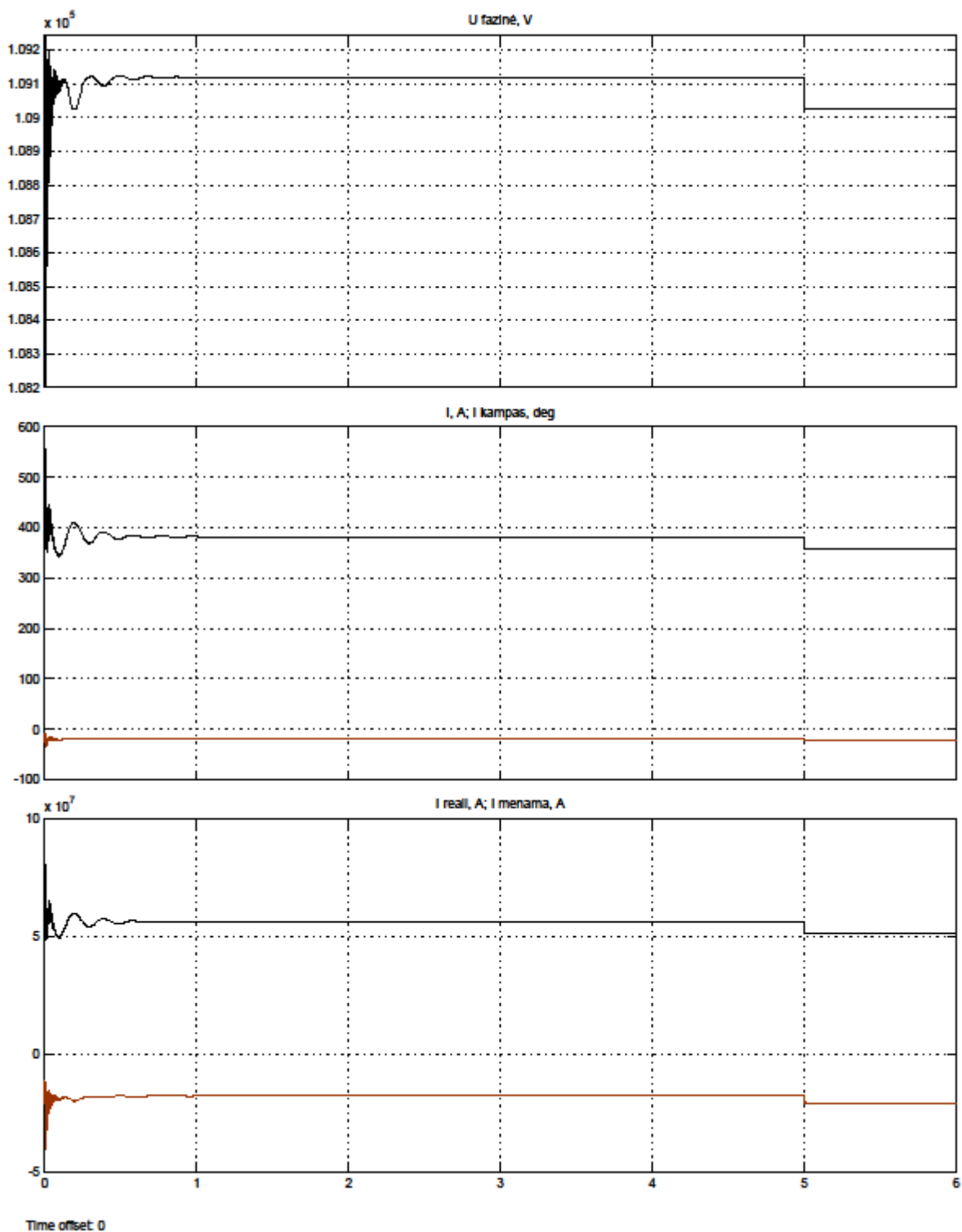


40 pav. VE. Greitis=1,28;  $v_{\text{vėjo}}=30$  m/s;  $\delta_{\text{menčių}}=36,14^{\circ}$

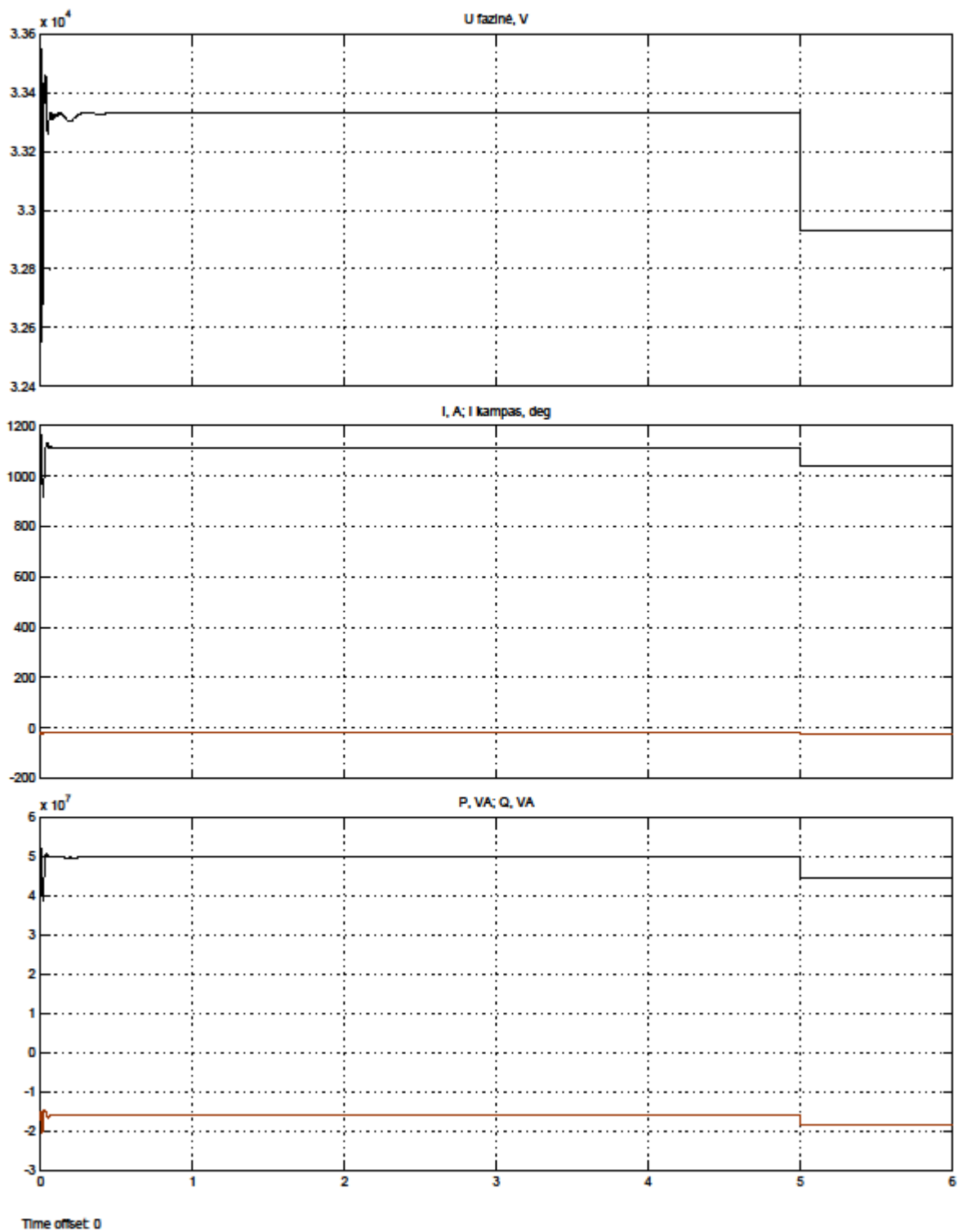
6 PRIEDAS. Maksimalios vartotojo galios įtaka sausumos vėjo elektrinei.

$P_{\text{vartotojo}}=63\,924\text{ kW}$

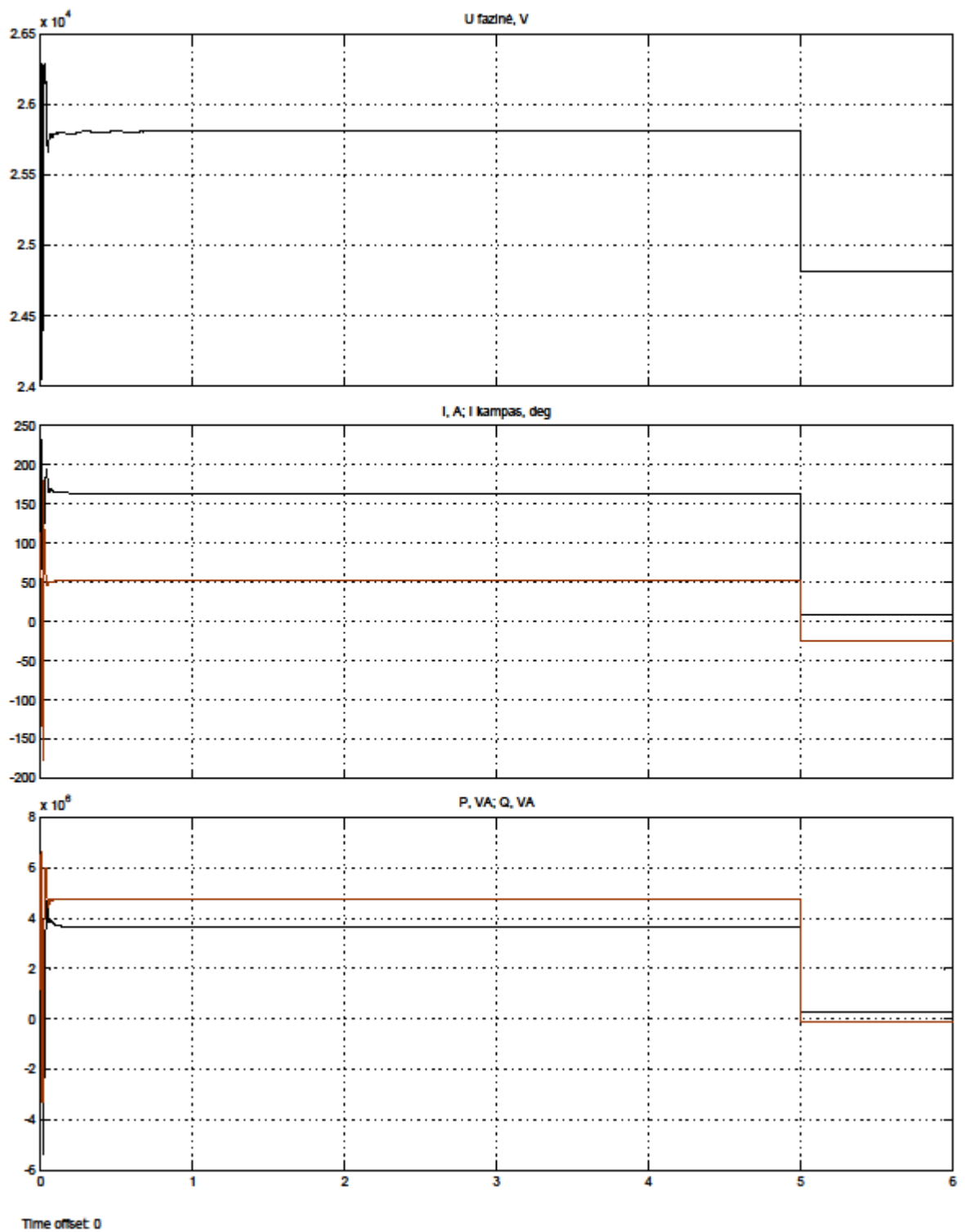
$t_{\text{matavimų}}=4,99\text{ s}$



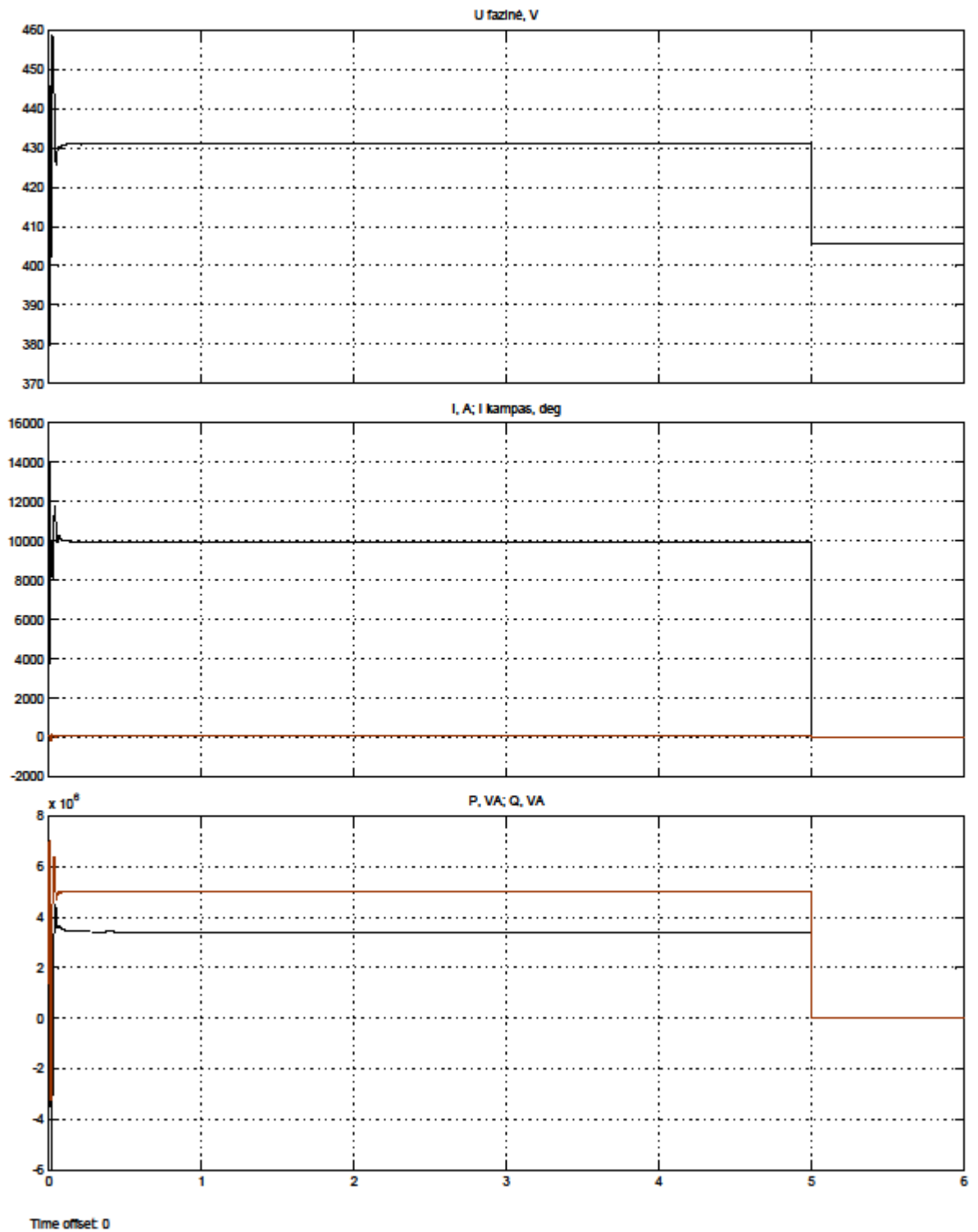
41 pav. 110 kV šynos.  $U=109119,43\text{ V}$ ;  $I=382e^{-17,6}\text{ A}$ ;  $P=56195439,22\text{ VA}$ ;  $Q=-17825512,52\text{ VA}$ .



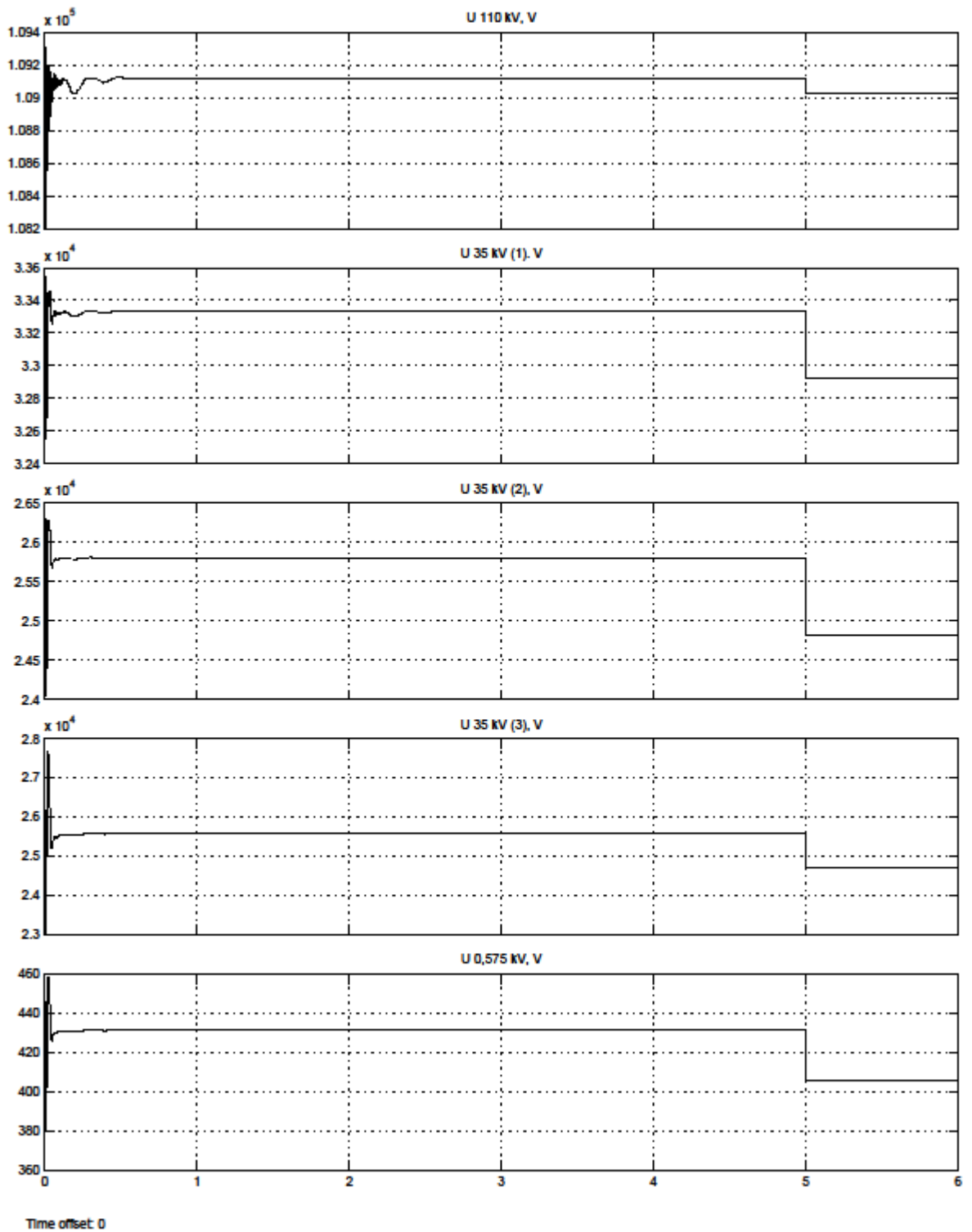
42 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=33332,44$  V;  $I=1110,80e^{-17,90}$  A;  $P=49827703,77$  VA;  $Q=-16094192,08$  VA.



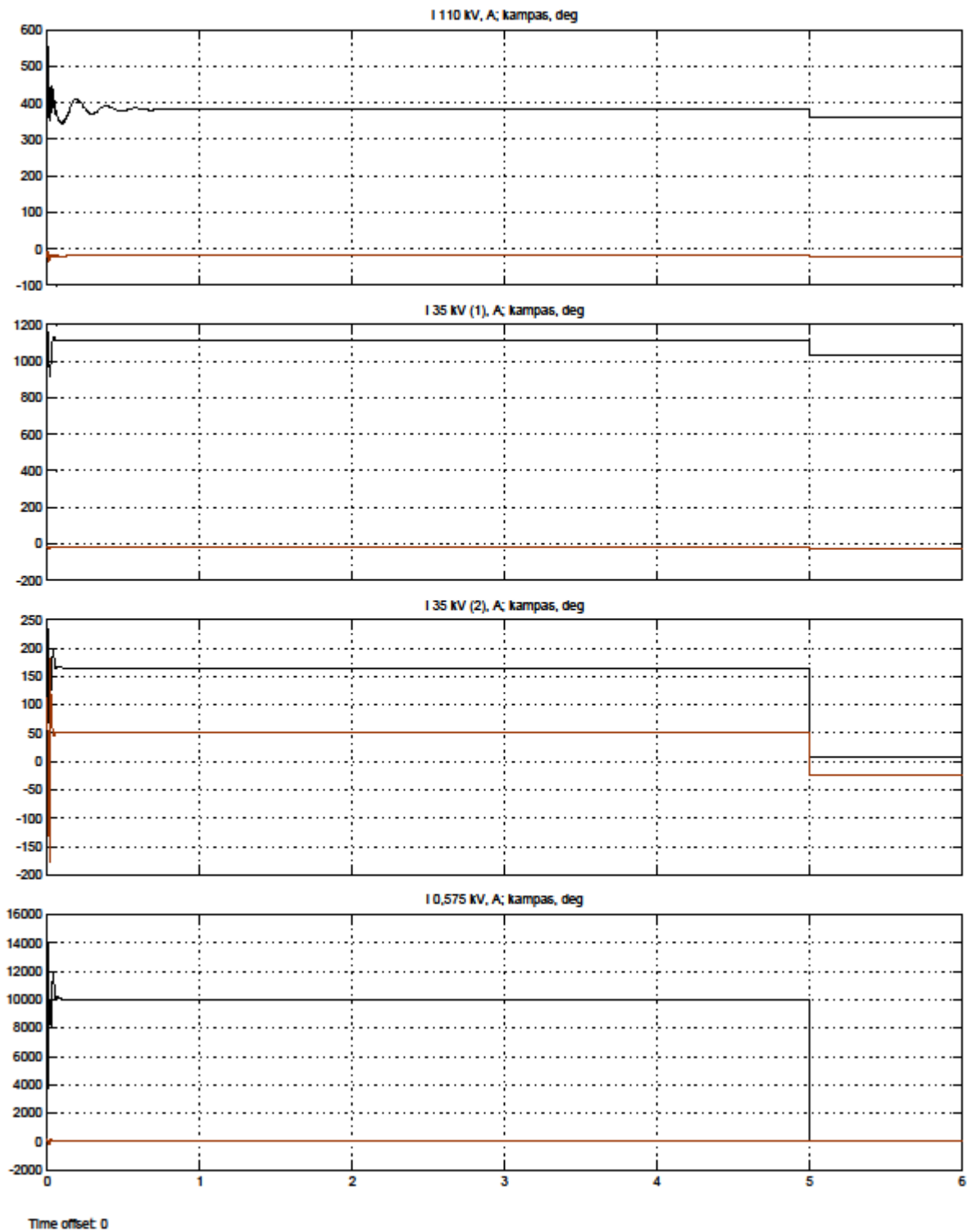
43 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=25807,18$  V;  $I=164,05e^{52,33}$  A;  $P=3659251,70$  VA;  
 $Q=4738937,13$  VA.



44 pav. 575 V šynos.  $U=431,25$  V;  $I=9942,40e^{55,59}$  A;  $P=3426321,16$  VA;  $Q=5002837,67$  VA.

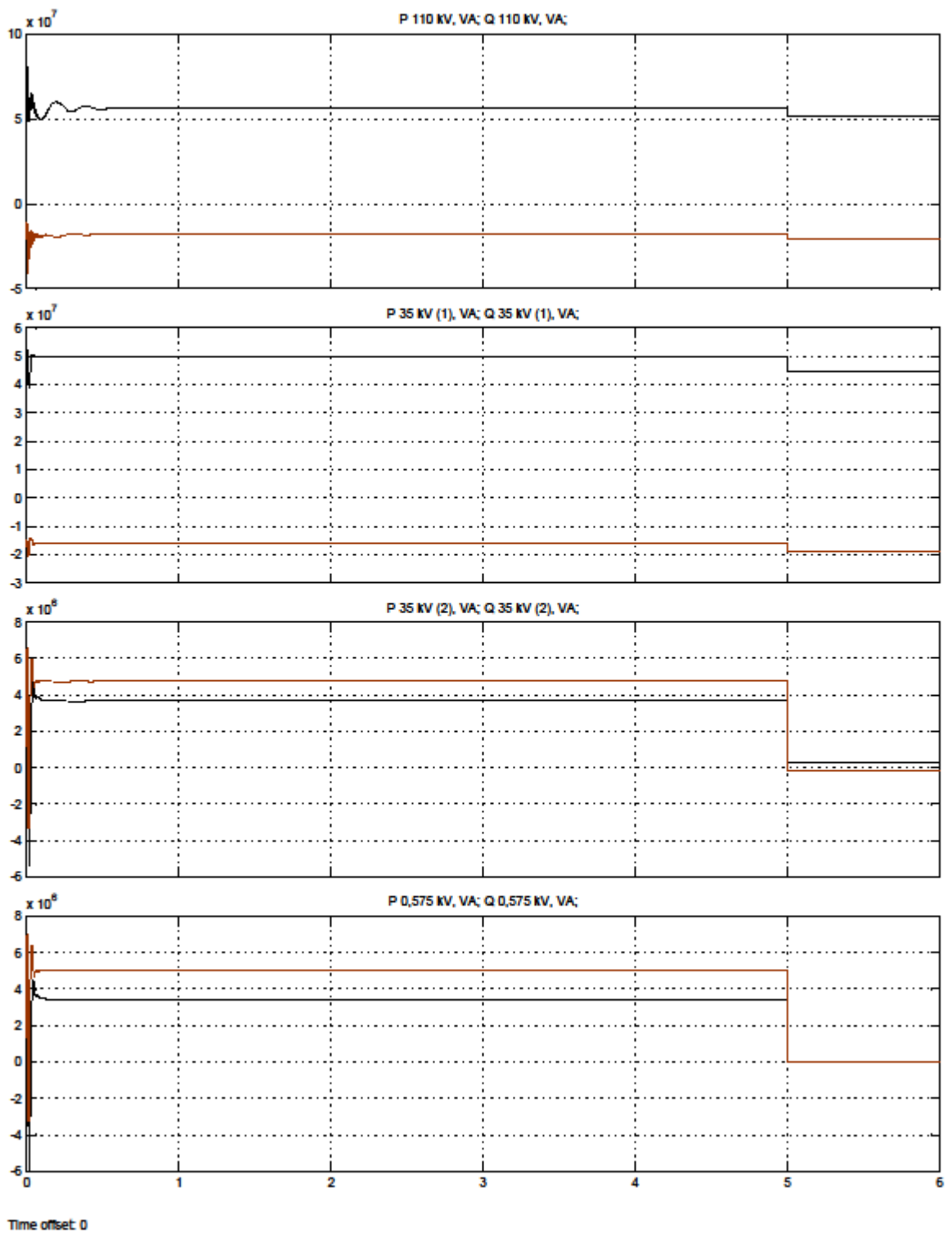


45 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=109119,43\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=33332,44\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=25807,18\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=25571,08\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=431,25\text{ V}$ .

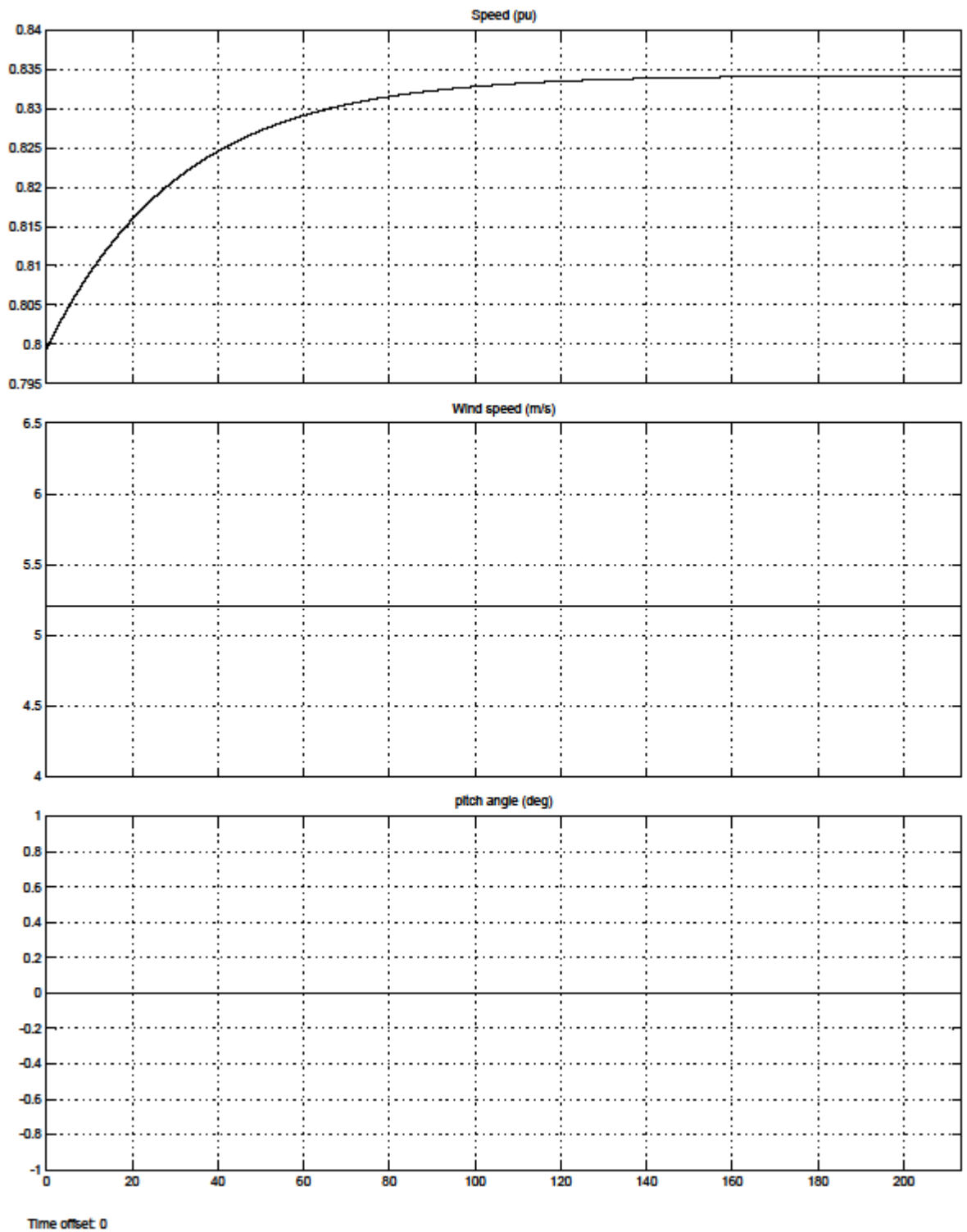


46 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=382,03e^{-17,60}\text{ A}$ ;  $I_{35\text{ kV (1)}}=1110,80e^{-17,90}\text{ A}$ ;  $I_{35\text{ kV (2)}}=164,05e^{52,33}\text{ A}$ ;  $I_{0,575\text{ kV}}=9942,40e^{55,59}\text{ A}$ ;





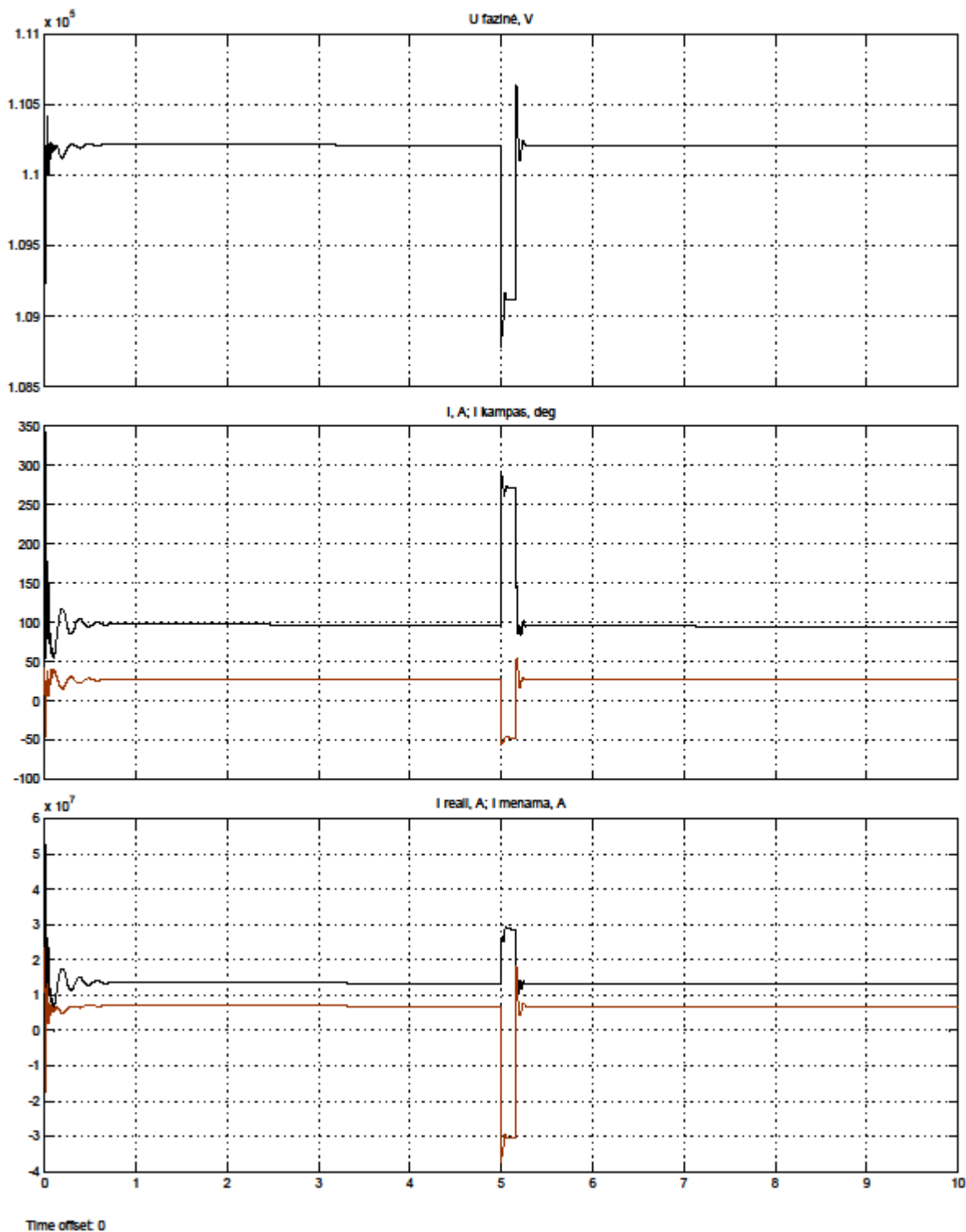
47 pav.  $P_{110\text{ kV}}=56195439,22\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=-17825512,52\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=49827703,77\text{ VA}$ ;  
 $Q_{35\text{ kV (1)}}=-16094192,08\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=3659251,70\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=4738937,13\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=3426321,16\text{ VA}$ ;  
 $Q_{0,575\text{ kV}}=5002837,67\text{ VA}$ ;



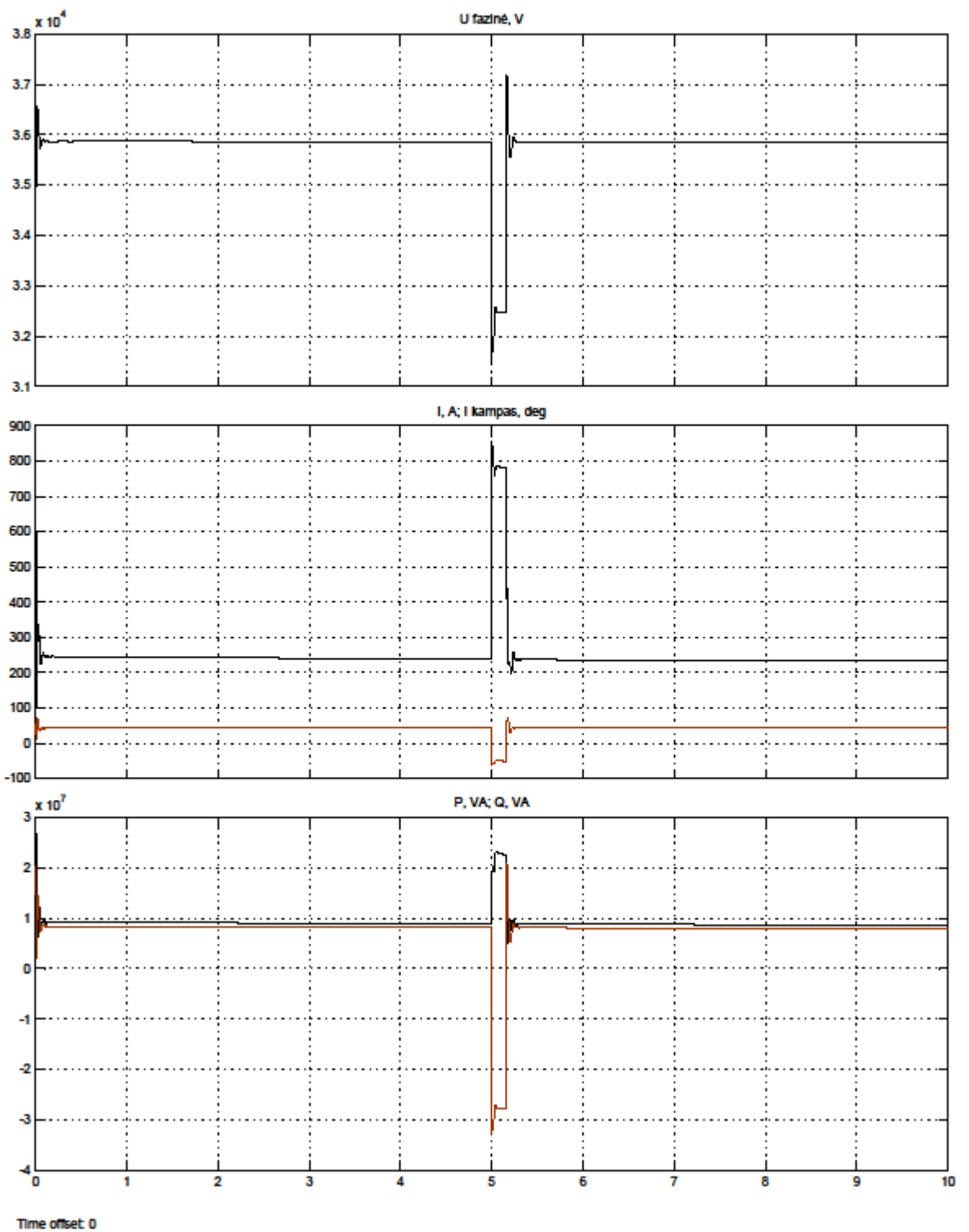
48 pav. VE. Greitis=0.834;  $v_{\text{vėjo}}=5.21$  m/s;  $\delta_{\text{menčių}}=0^0$

7 PRIEDAS. Fazēs trikdis. Jūrinē vējo elektrīnē.

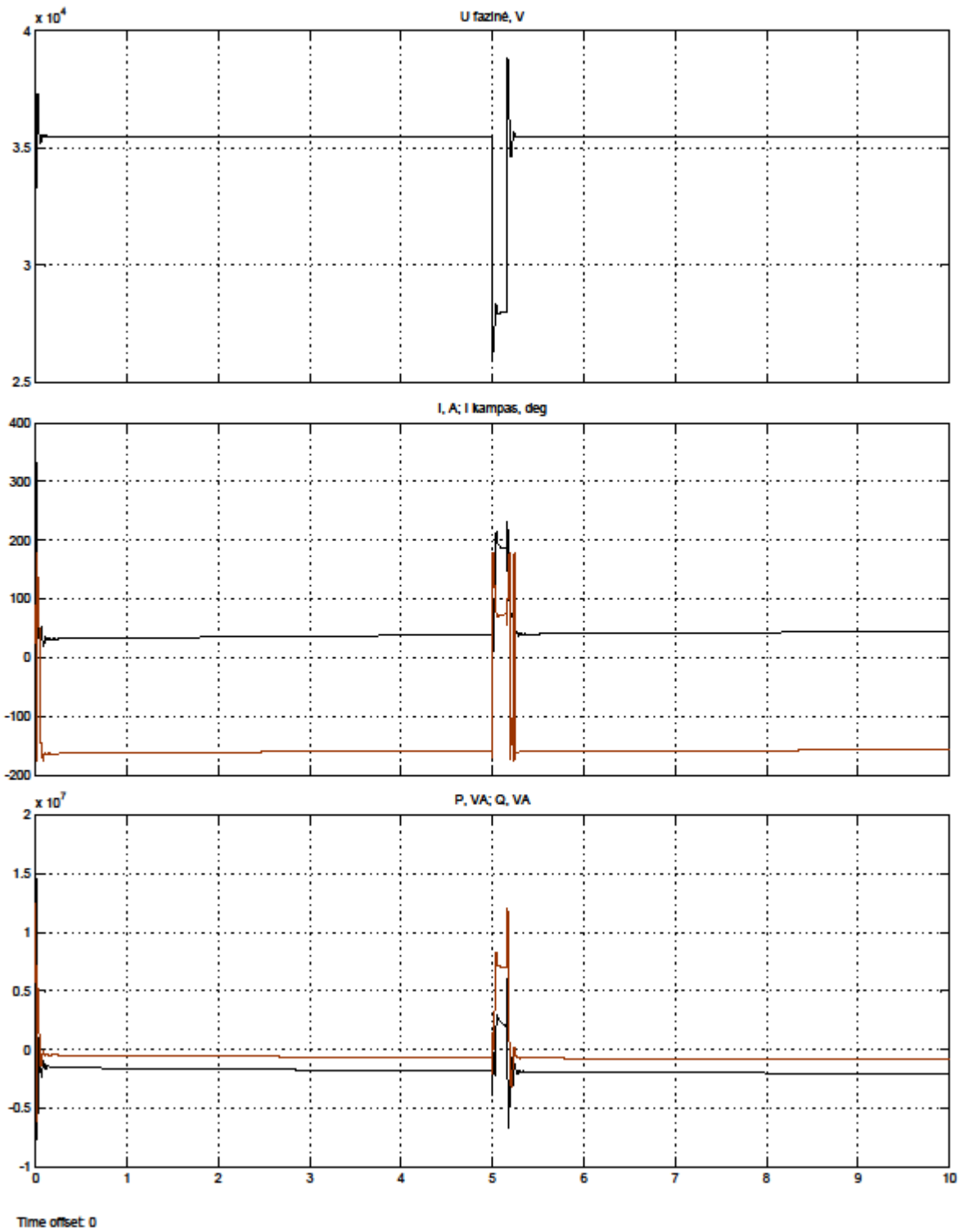
$t_{\text{matavimū}}=10 \text{ s}$



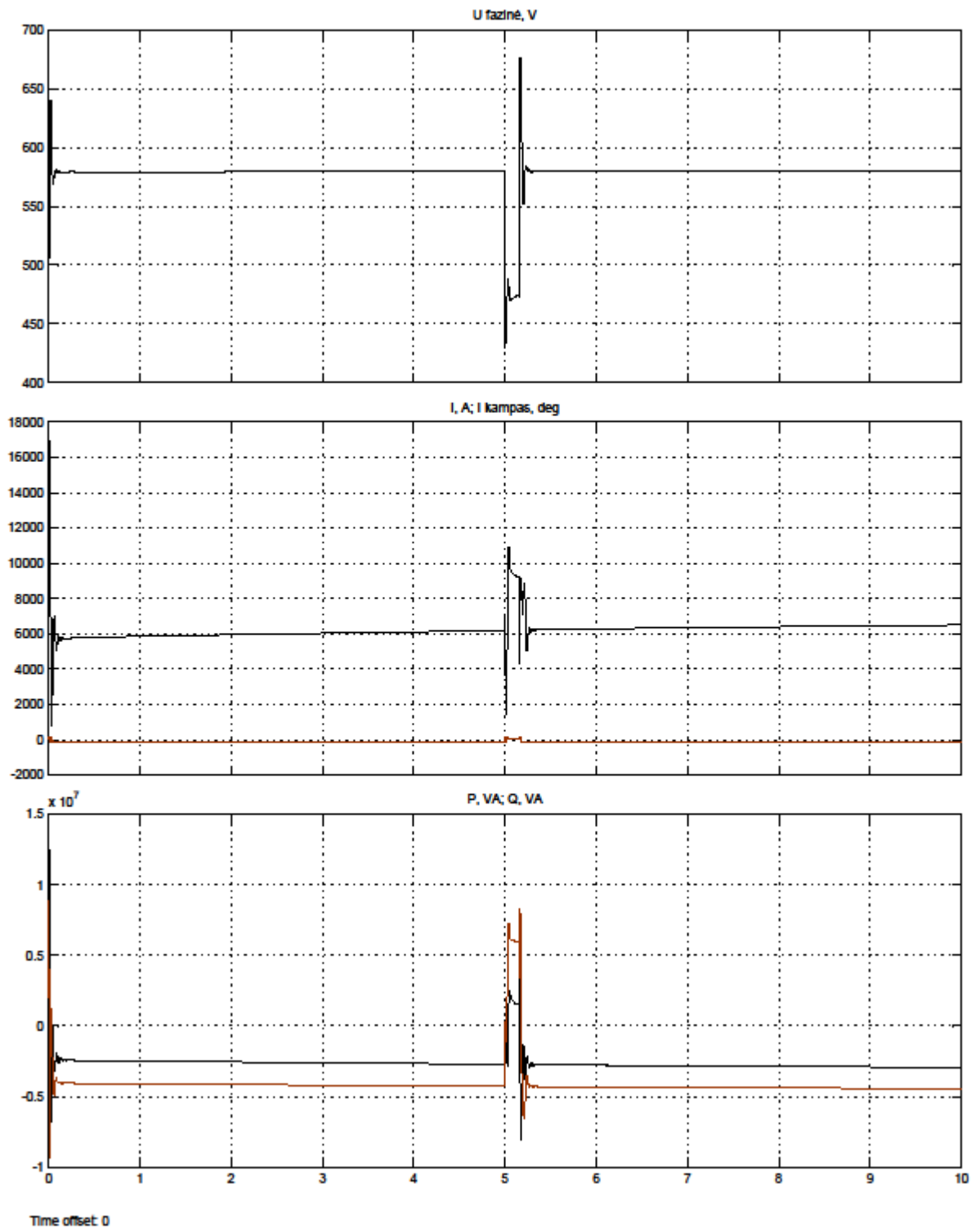
49 pav. 110 kV šynos.  $U=110207,84\text{V}$ ;  $I=94,37e^{27,27} \text{ A}$ ;  $P=13074223,39 \text{ VA}$ ;  
 $Q=6739399,56 \text{ VA}$ .



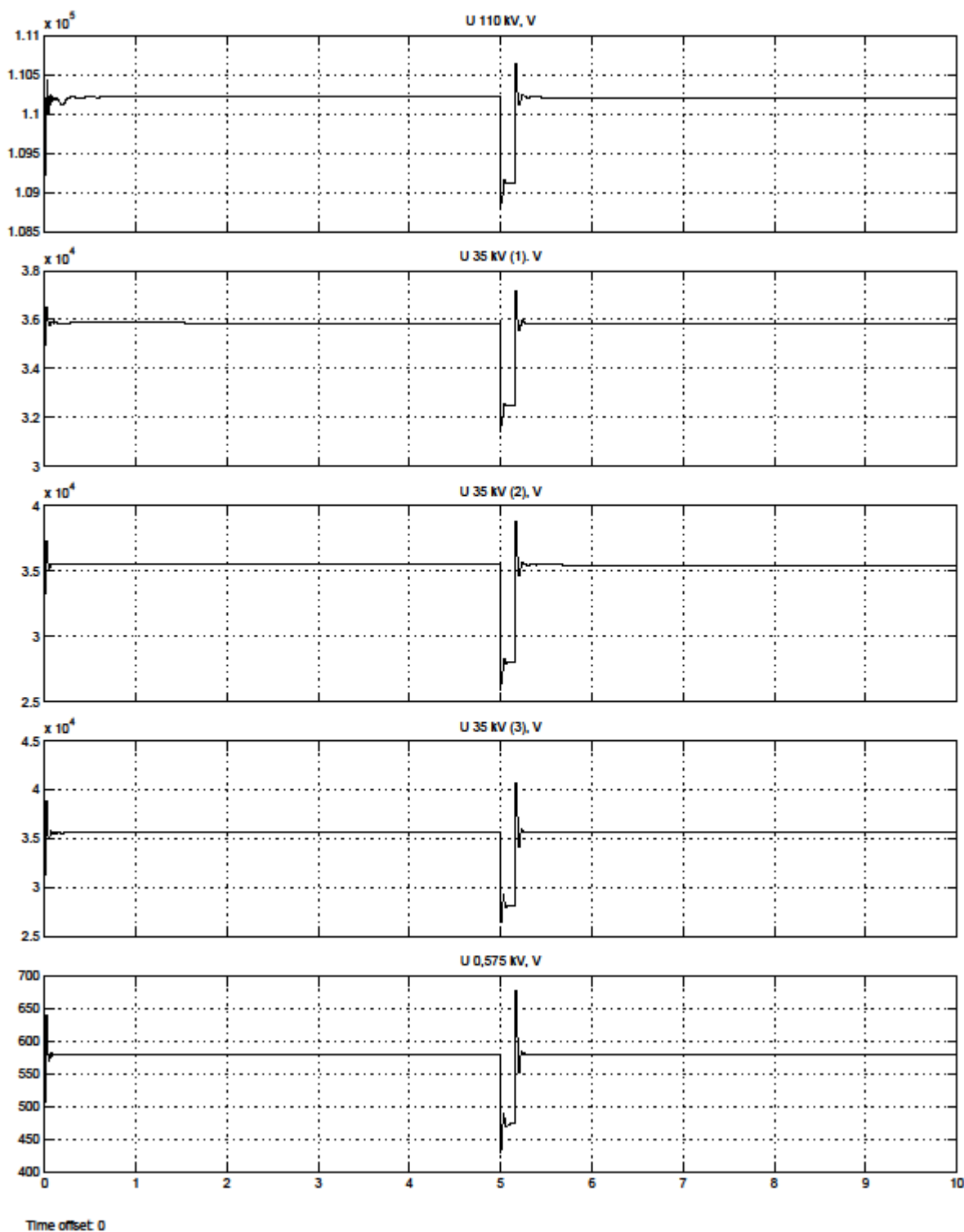
50 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=35835,06$  V;  $I=232,31e^{42,82}$  A;  $P=8635465,07$  VA;  
 $Q=8002499,02$  VA.



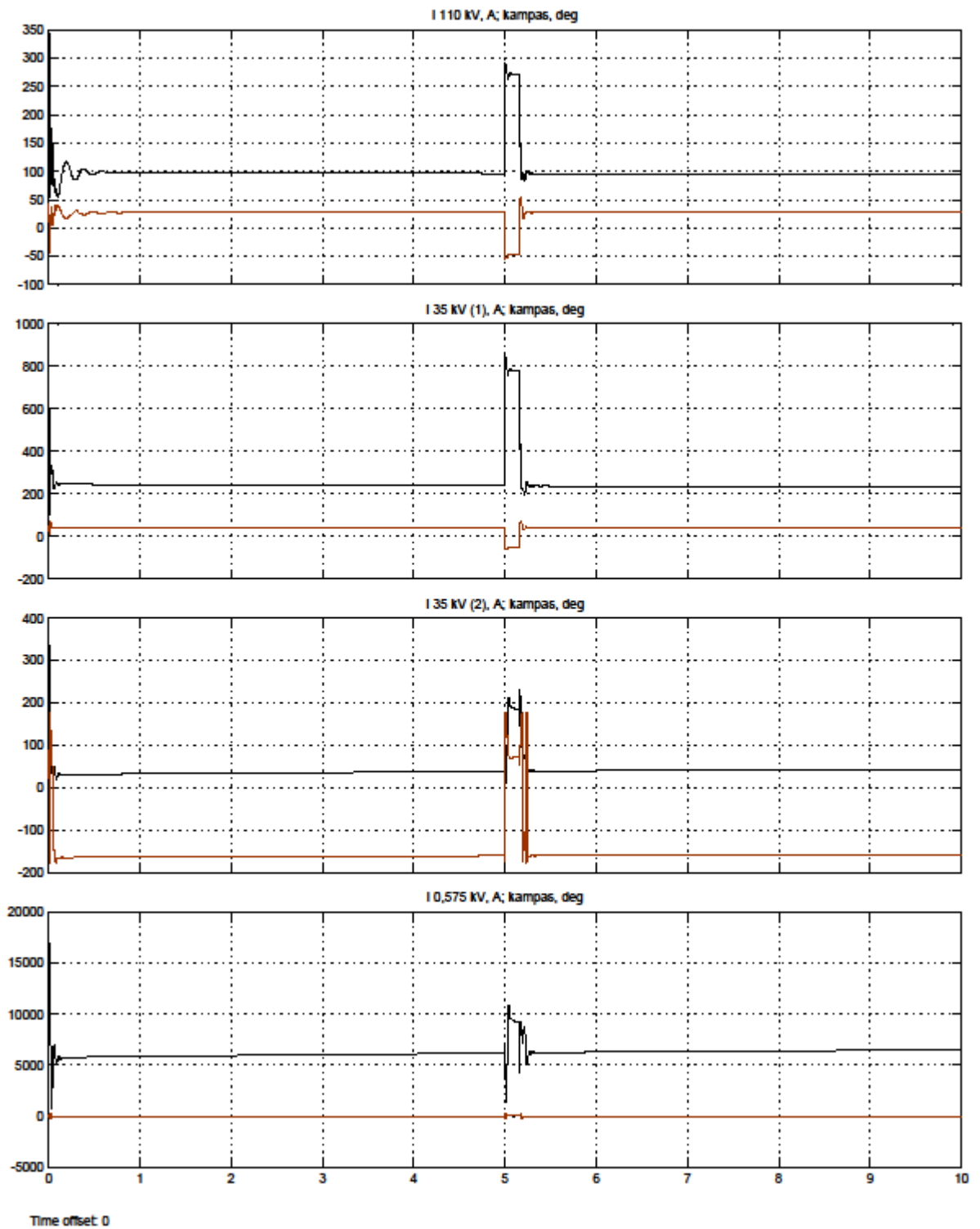
51 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=35458,84$  V;  $I=44,53e^{-157,72}$  A;  $P=-2066161,10$  VA;  $Q=-846403,60$  VA.



52 pav. 575 V šynos.  $U=579,54$  V;  $I=6500,10e^{-123,46}$  A;  $P=-2937555,74$  VA;  $Q=-4444335,58$  VA.

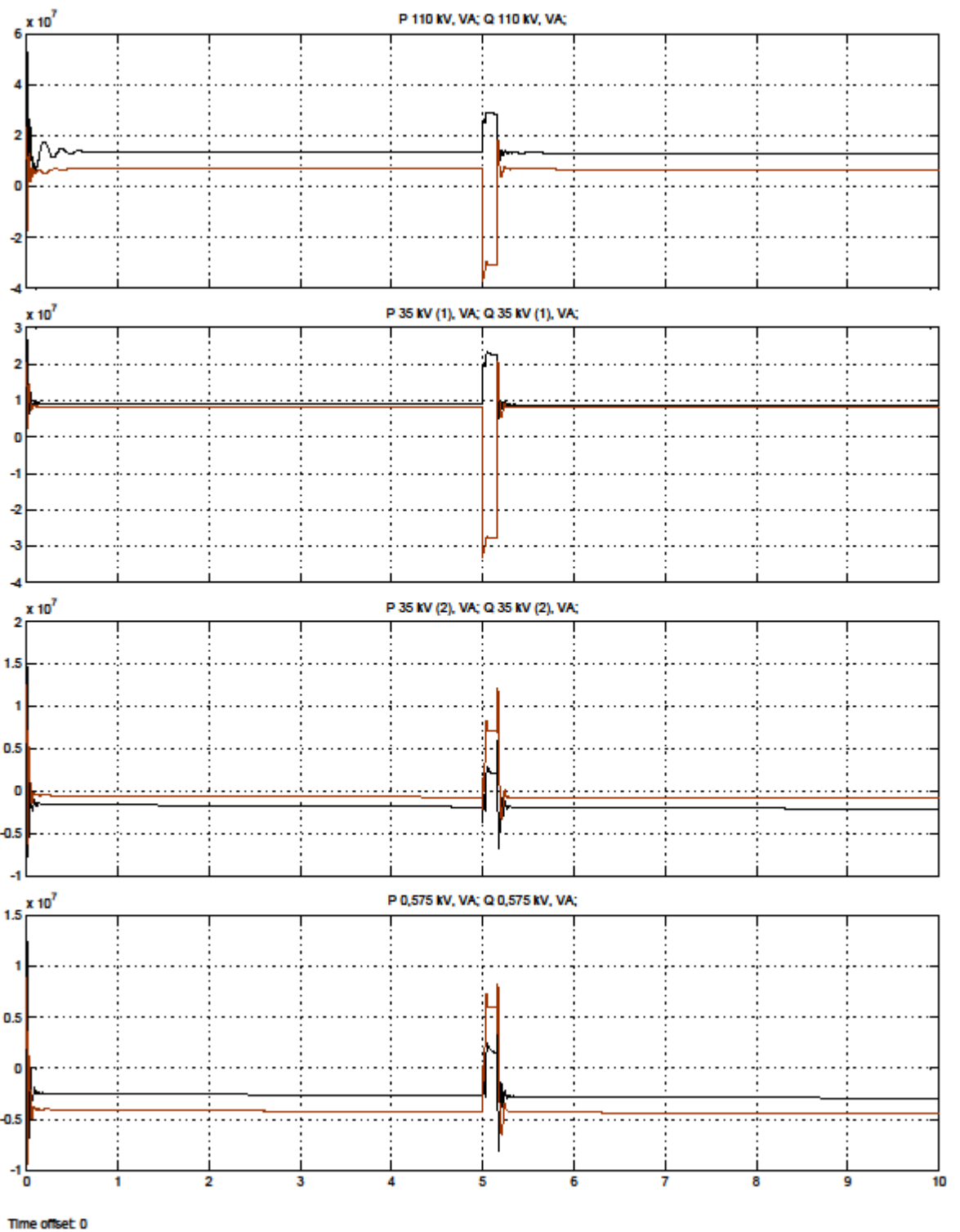


53 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=110207,84\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=35835,06\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=35458,84\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=35654,12\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=579,54\text{ V}$ .

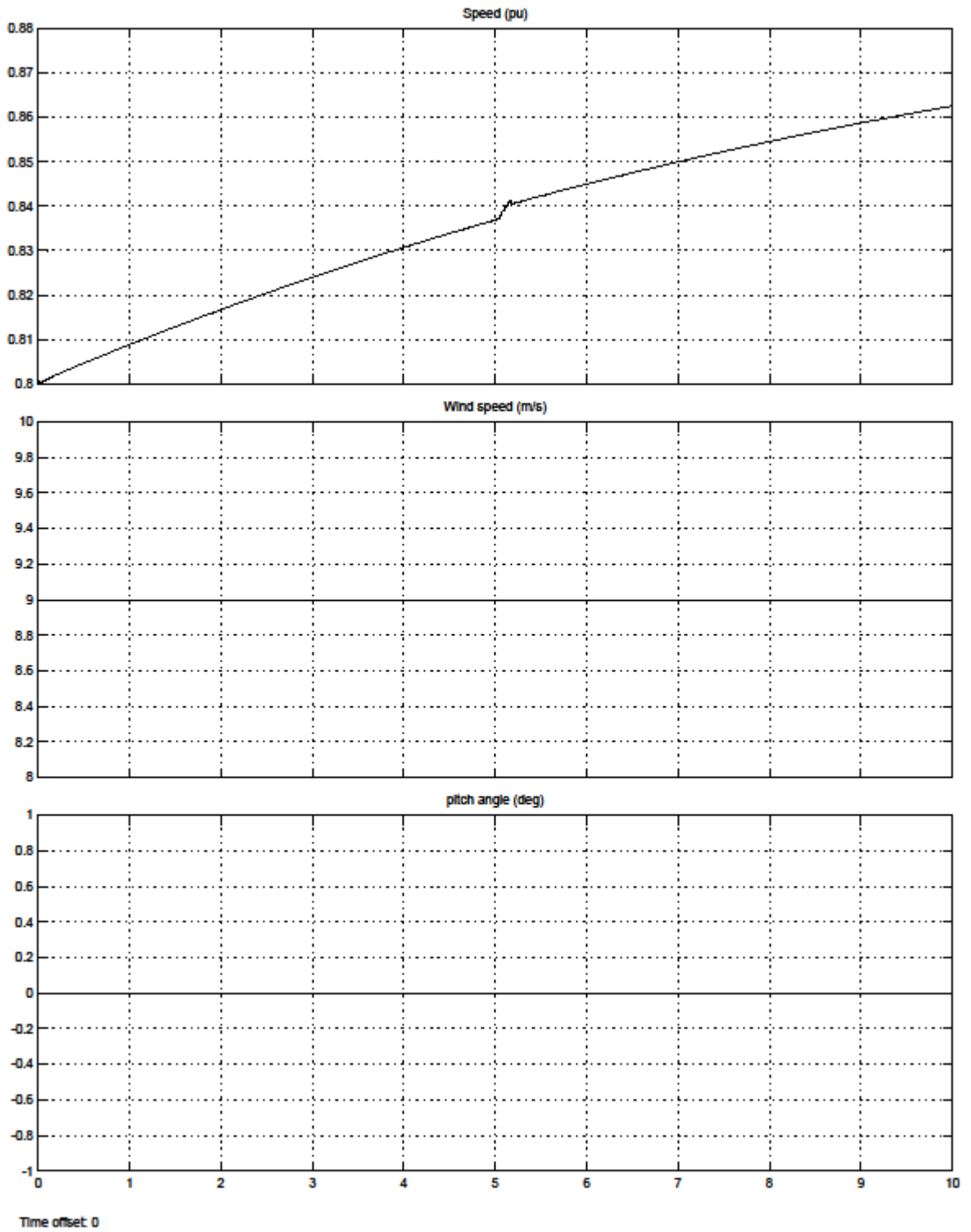


54 pav. I ir kampak.  $I_{110 \text{ kV}}=94,37e^{27} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (1)}}=232,31e^{42,82} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (2)}}=44,53e^{-157,72} \text{ A}$ ;  
 $I_{0,575 \text{ kV}}=6500,10e^{-123,46} \text{ A}$ ;



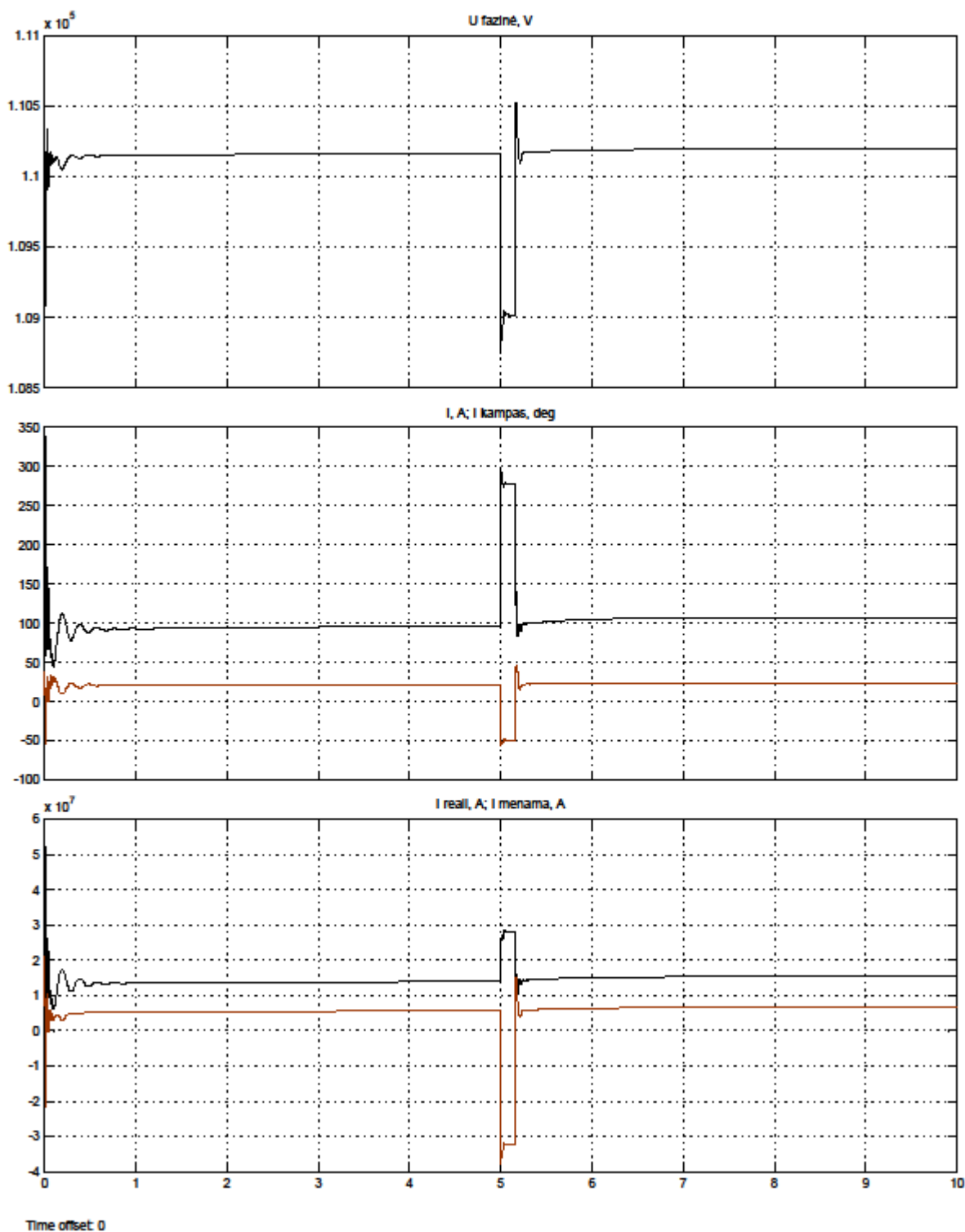


55 pav.  $P_{110\text{ kV}}=13074223,39\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=6739399,56\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (1)}}=8635465,07\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (1)}}=8002499,02\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV (2)}}=-2066161,10\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV (2)}}=-846403,60\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=-2937555,74\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=-4444335,58\text{ VA}$ ;

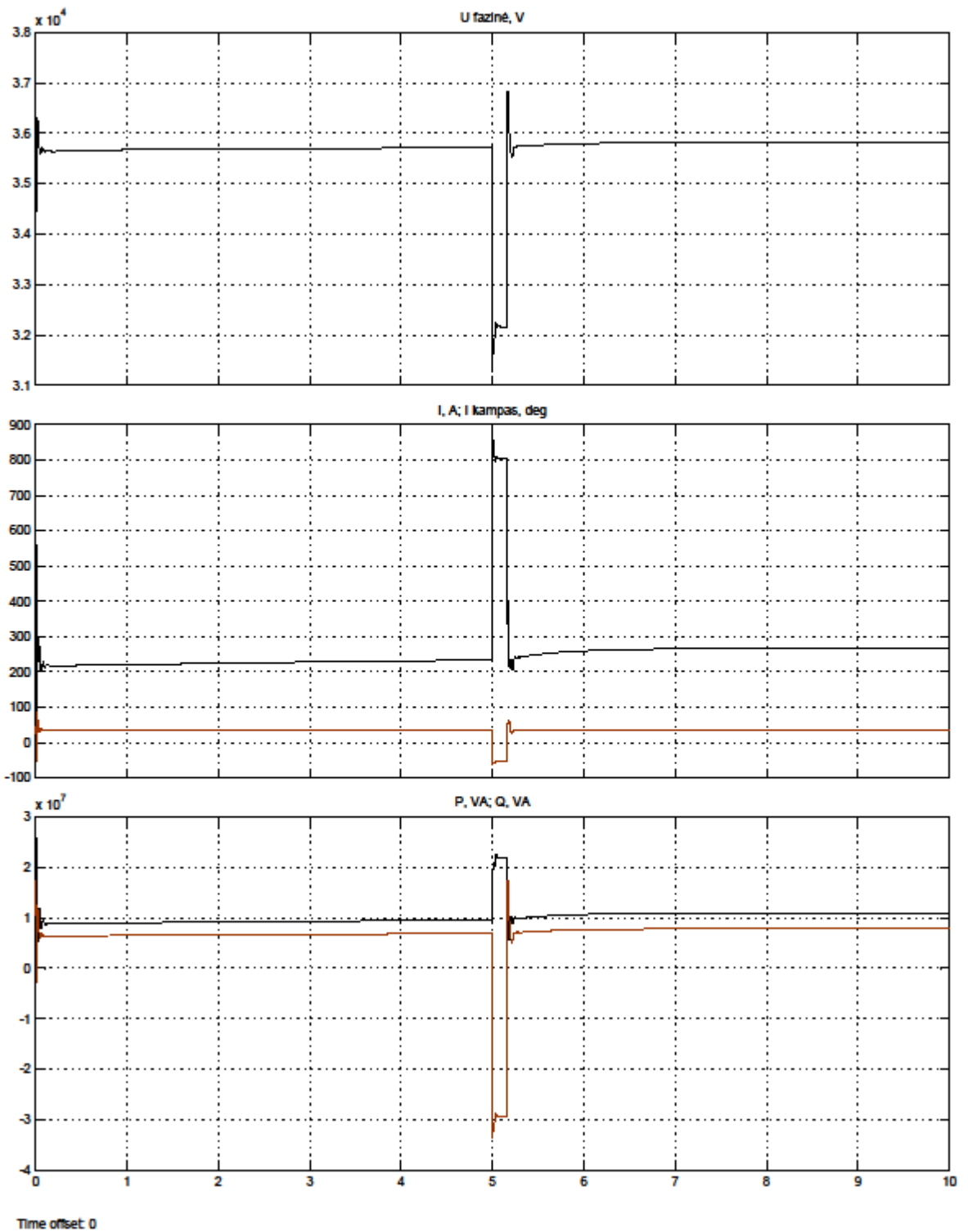


56 pav. VE. Greitis=0.86;  $v_{v\acute{e}jo}=9$  m/s;  $\delta_{men\check{c}iu}=0^0$

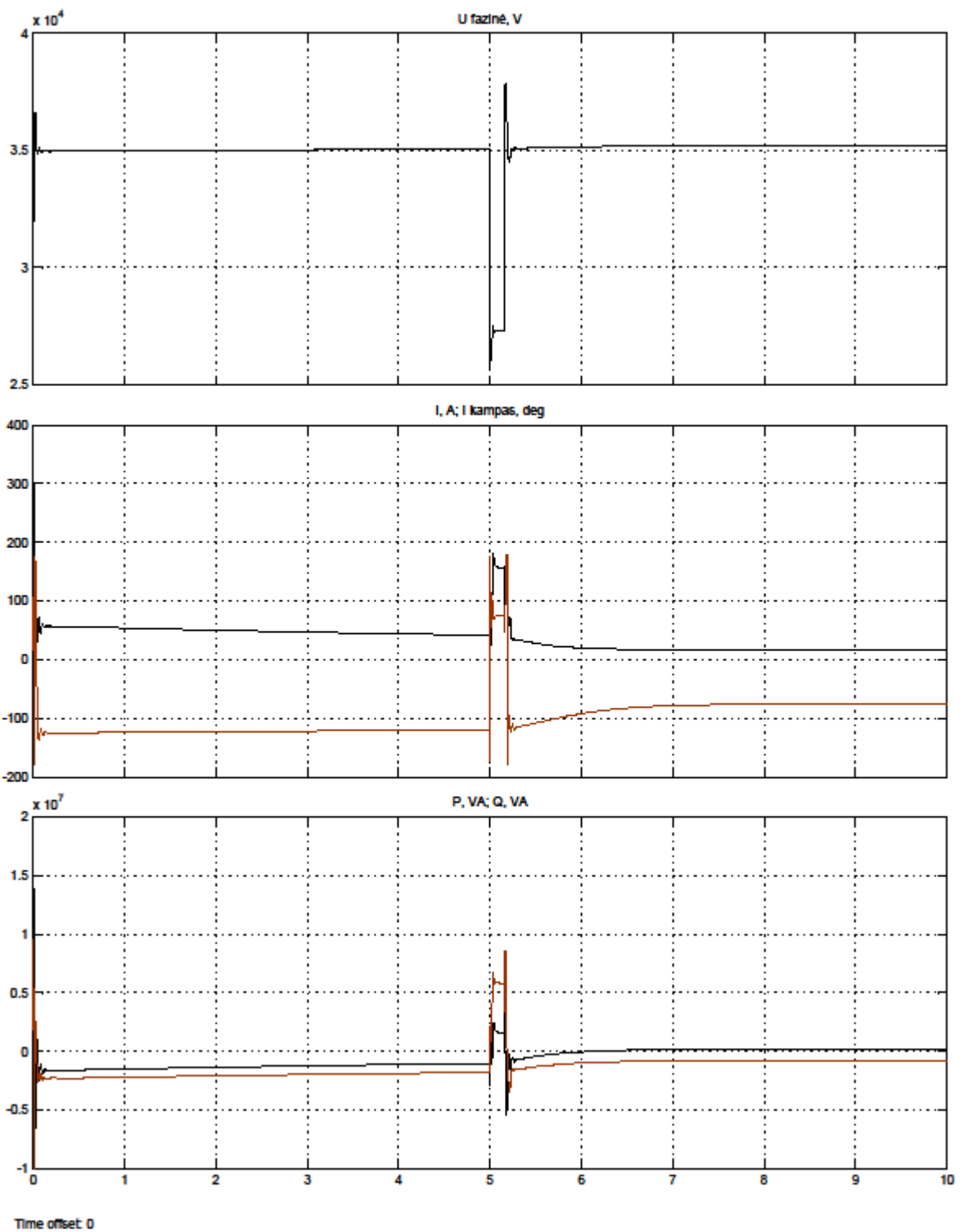
$t_{\text{matavimų}}=10 \text{ s}$



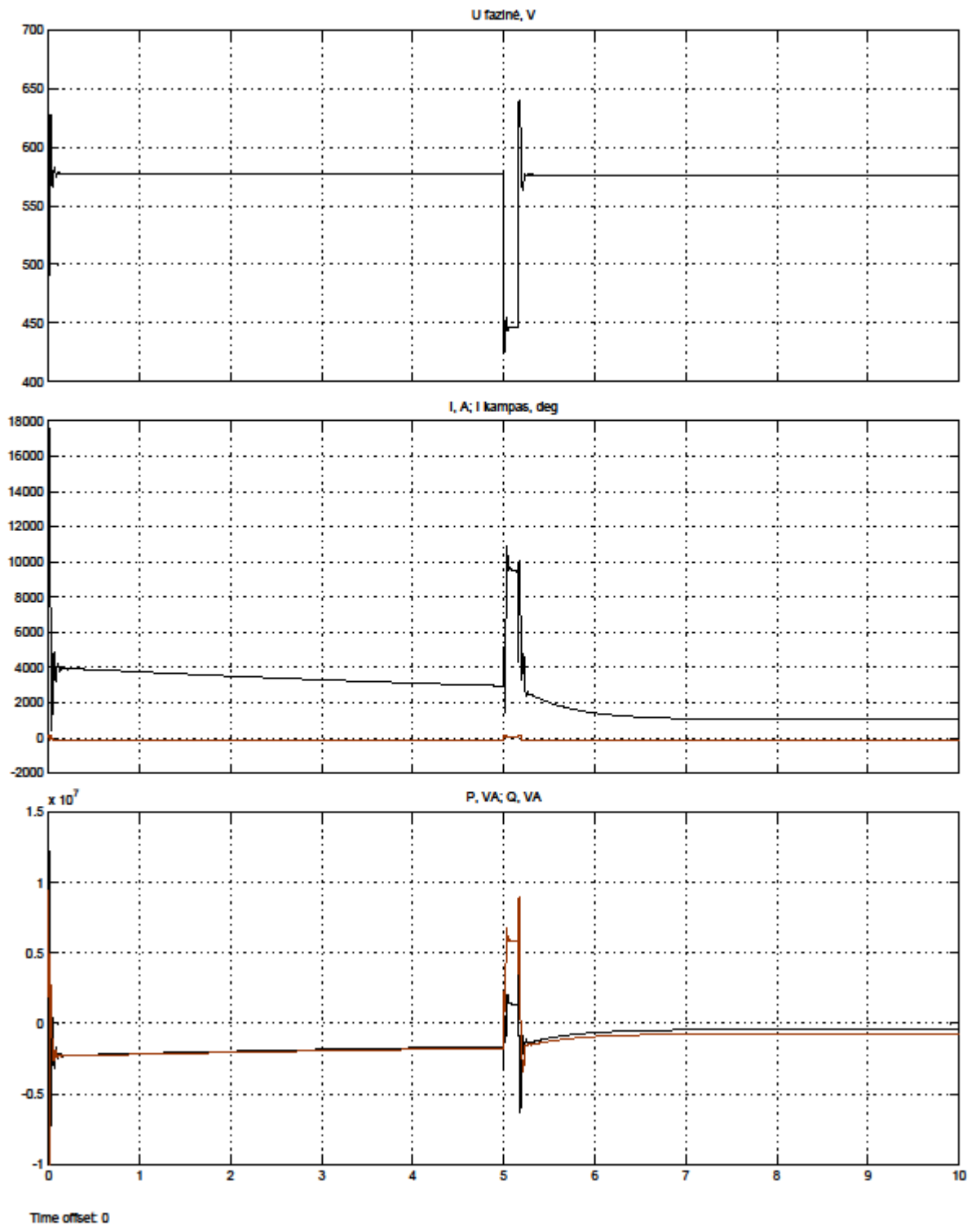
57 pav. 110 kV šynos.  $U=110193,22\text{V}$ ;  $I=107e^{23,2} \text{ A}$ ;  $P=15321244,31 \text{ VA}$ ;  $Q=6567702,73 \text{ VA}$ .



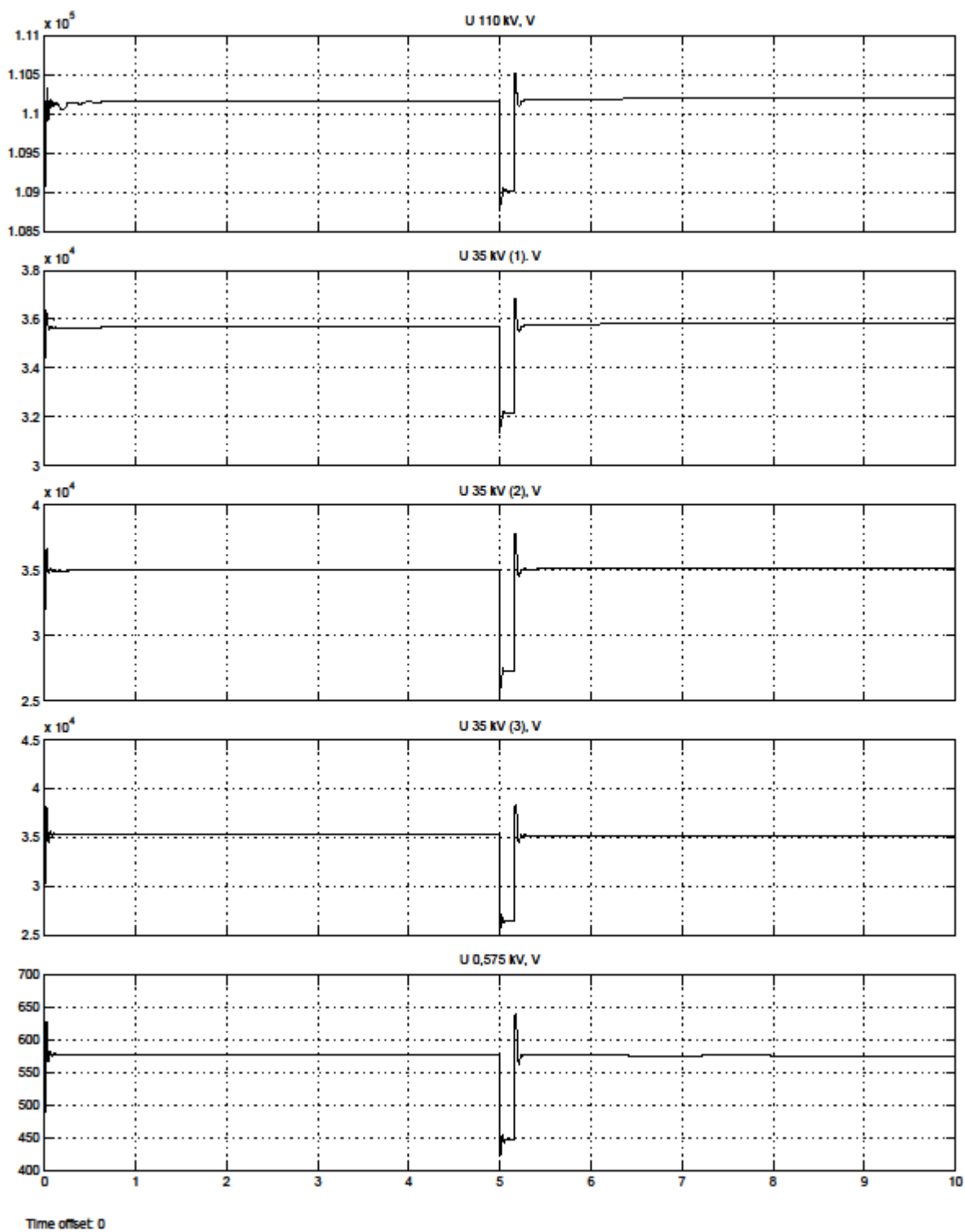
58 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=35814,64$  V;  $I=265,64e^{35,58}$  A;  $P=10942442,36$  VA;  
 $Q=7828561,45$  VA.



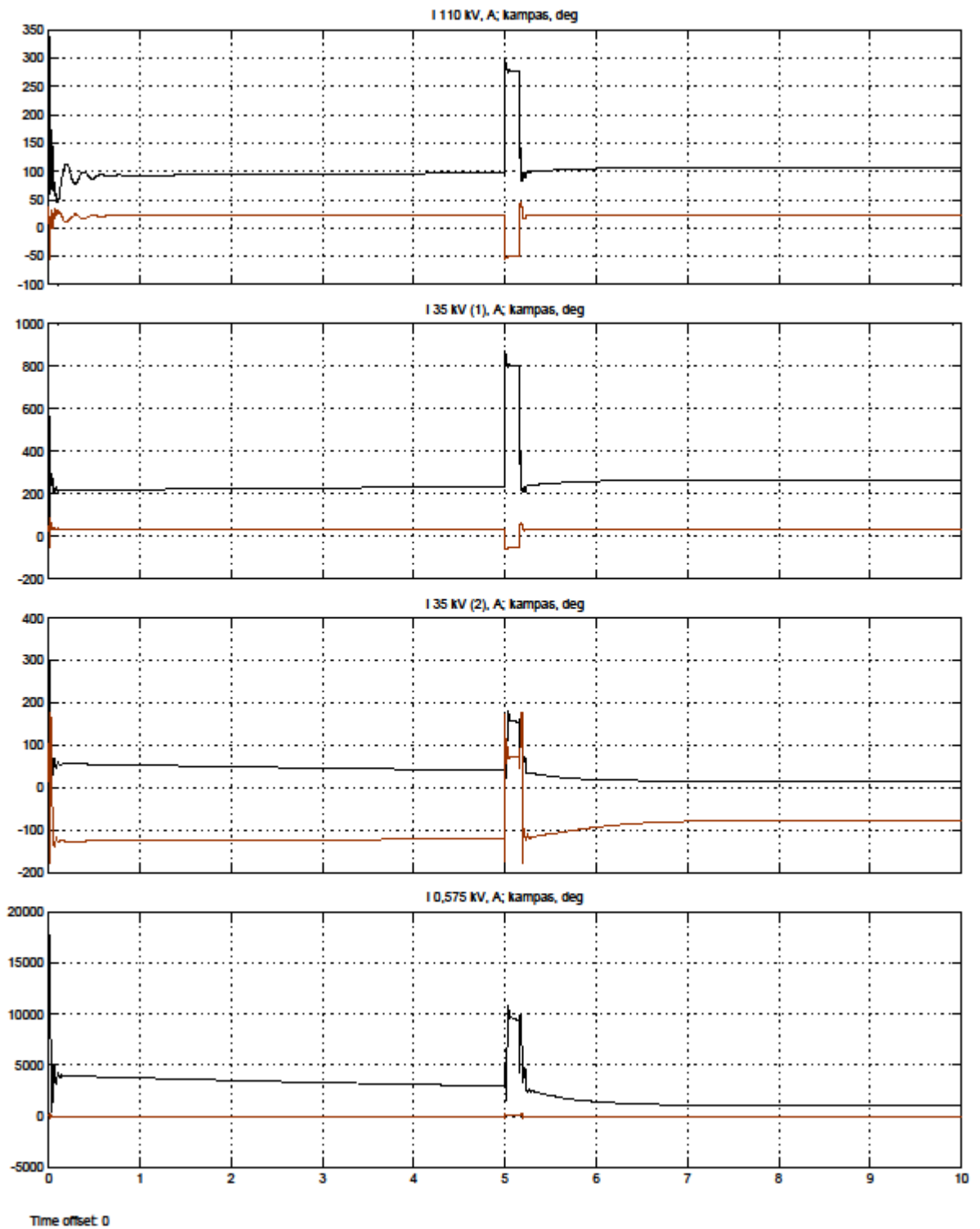
59 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=35182,30$  V;  $I=16,22e^{-75,95}$  A;  $P=195965,51$  VA;  $Q=-782784,17$  VA.



60 pav. 575 V šynos.  $U=575,77$  V;  $I=1047,12e^{-119,86}$  A;  $P=-424462,90$  VA;  $Q=-739465,52$  VA.

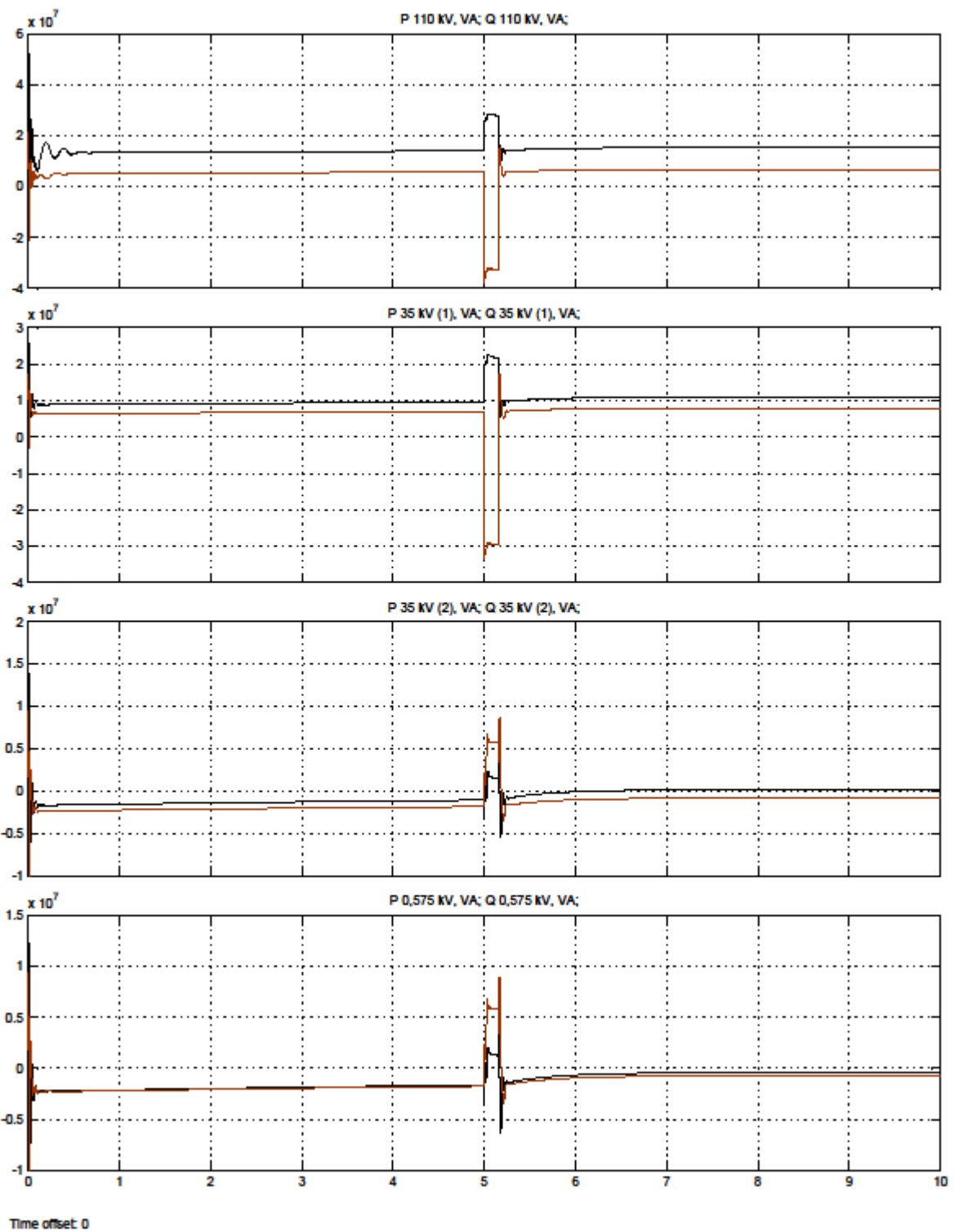


61 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=110193,22\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=35814,64\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=35182,30\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=35113,08\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=575,77\text{ V}$ .

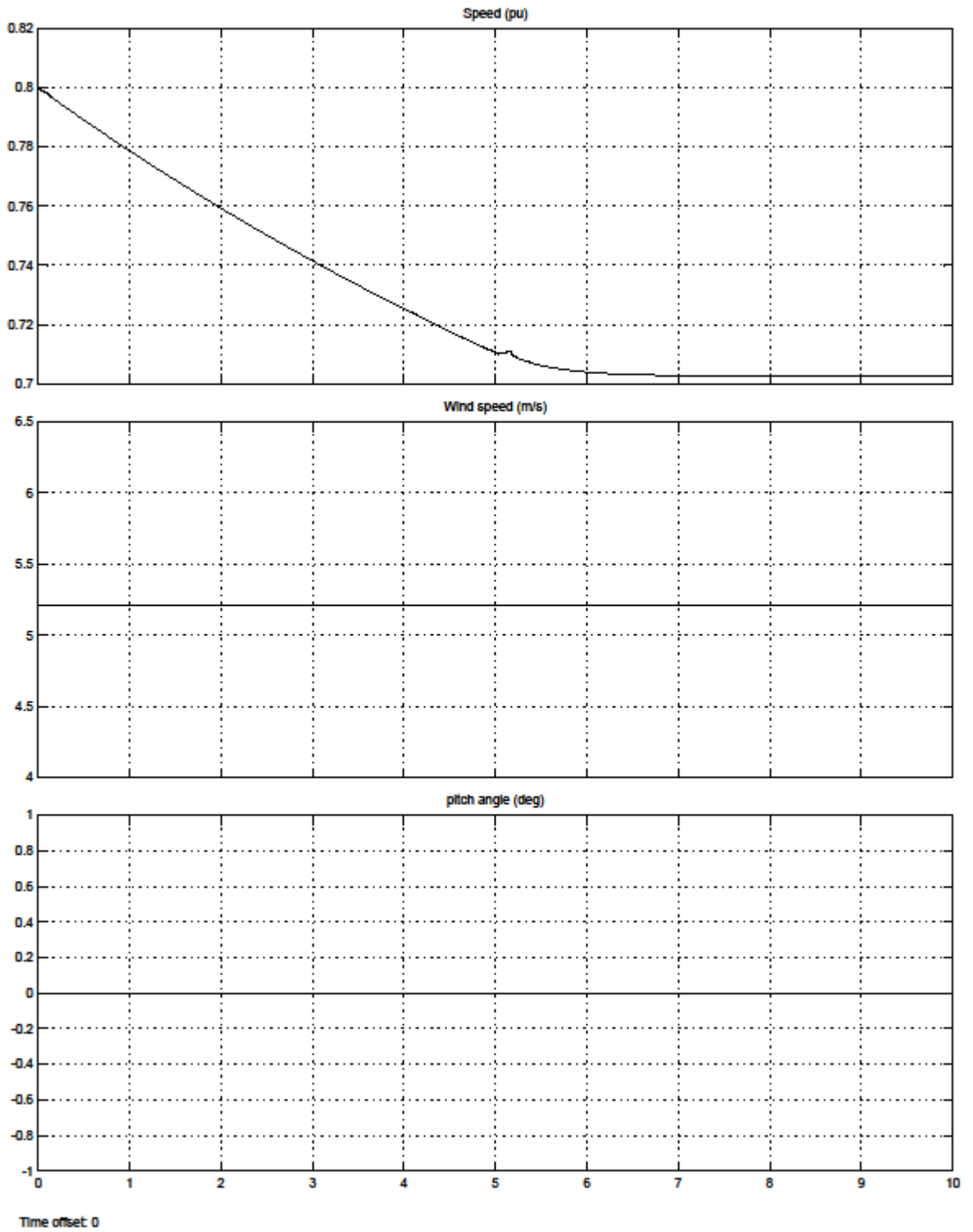


62 pav. I ir kampai.  $I_{110 \text{ kV}}=106,97e^{23,20} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (1)}}=265,64e^{35,58} \text{ A}$ ;  $I_{35 \text{ kV (2)}}=16,22e^{-75,95} \text{ A}$ ;  
 $I_{0,575 \text{ kV}}=1047,12e^{-119,86} \text{ A}$ ;





63 pav.  $P_{110\text{ kV}}=15321244,31\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=6567702,73\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(1)}=10942442,36\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(1)}=7828561,45\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(2)}=195965,51\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(2)}=-782784,17\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=-424462,90\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=-739465,52\text{ VA}$ ;

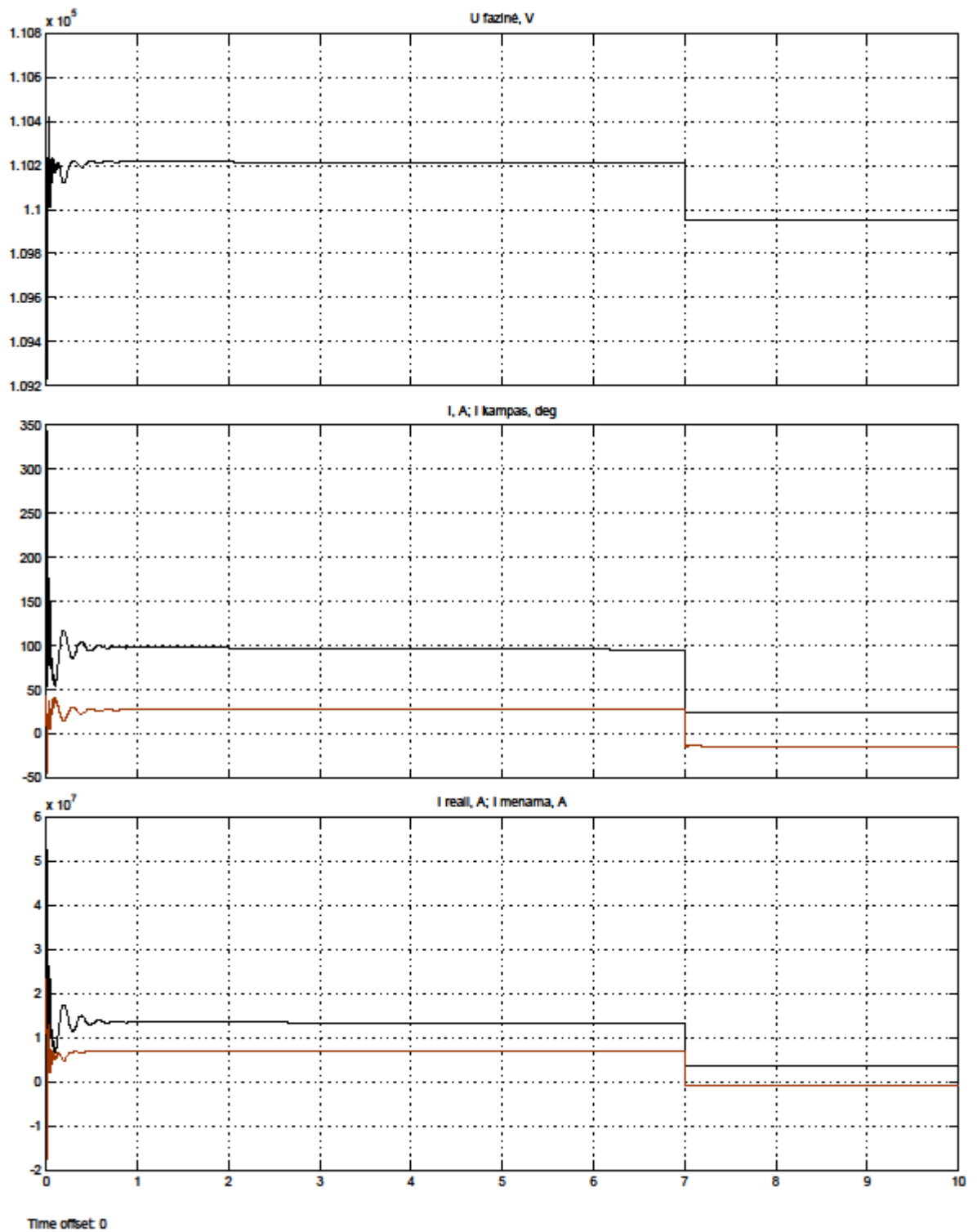


64 pav. VE. Greitis=0.7;  $v_{\text{vėjo}}=5.21$  m/s;  $\delta_{\text{menčių}}=0^0$

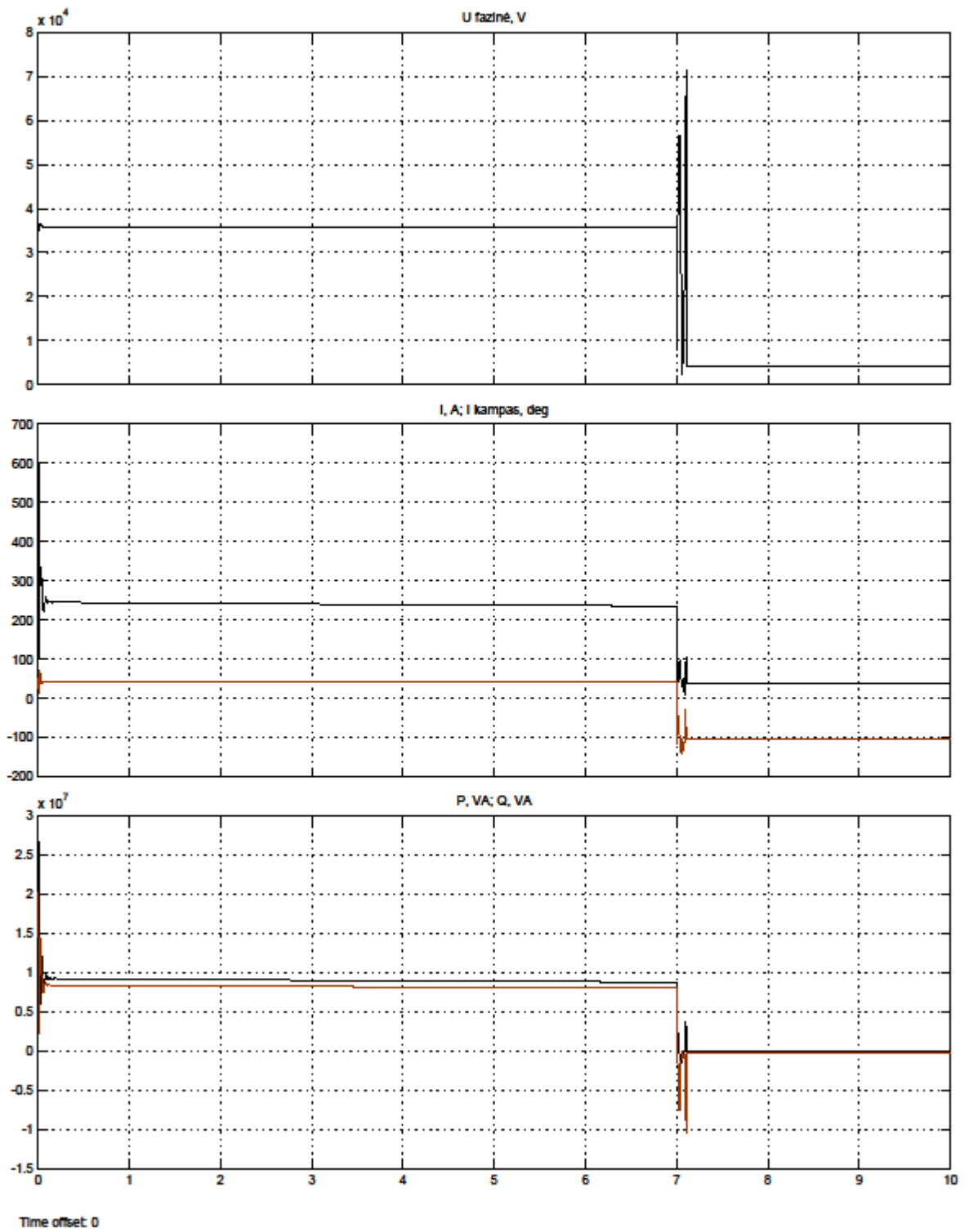
9 PRIEDAS.VE atsijungia nuo tinklo. Sausumos vėjo elektrinė.

$t_{atsijungimo}=7$  s

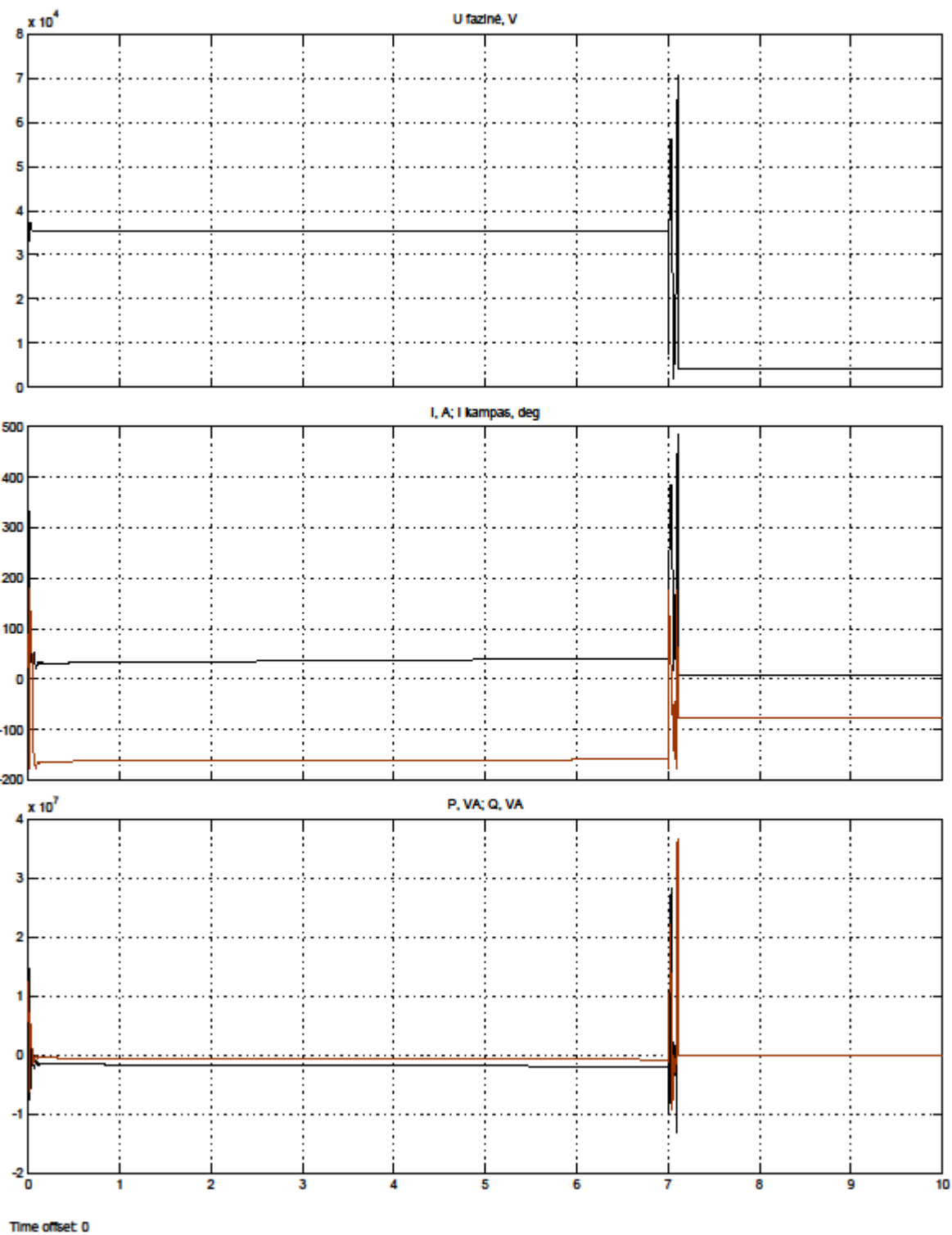
$t_{matavimų}=10$  s



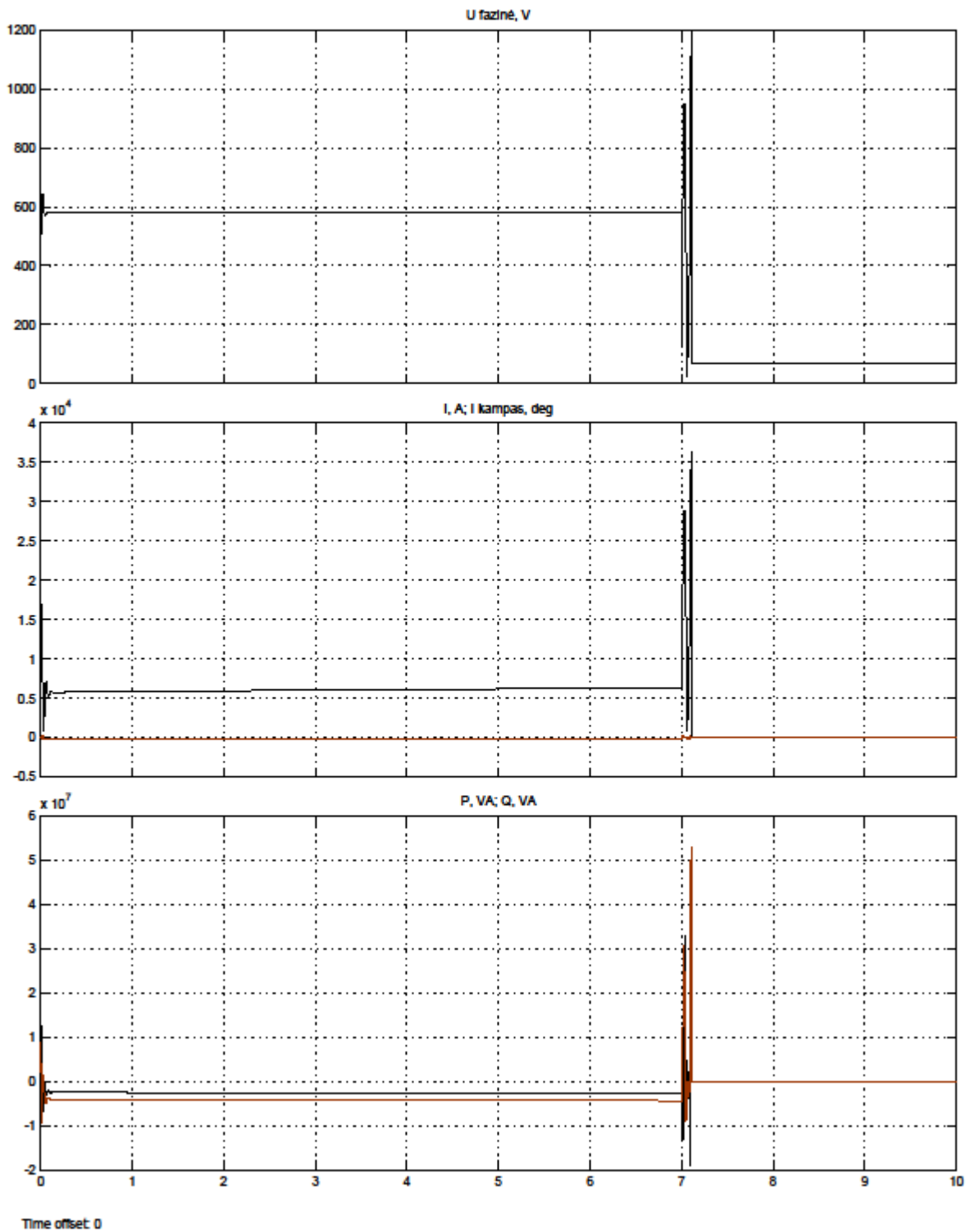
65 pav. 110 kV šynos.  $U=109951,50$  V;  $I=24,43e^{-13,79}$  A;  $P=3689488,13$  VA;  $Q=-905401,32$  VA.



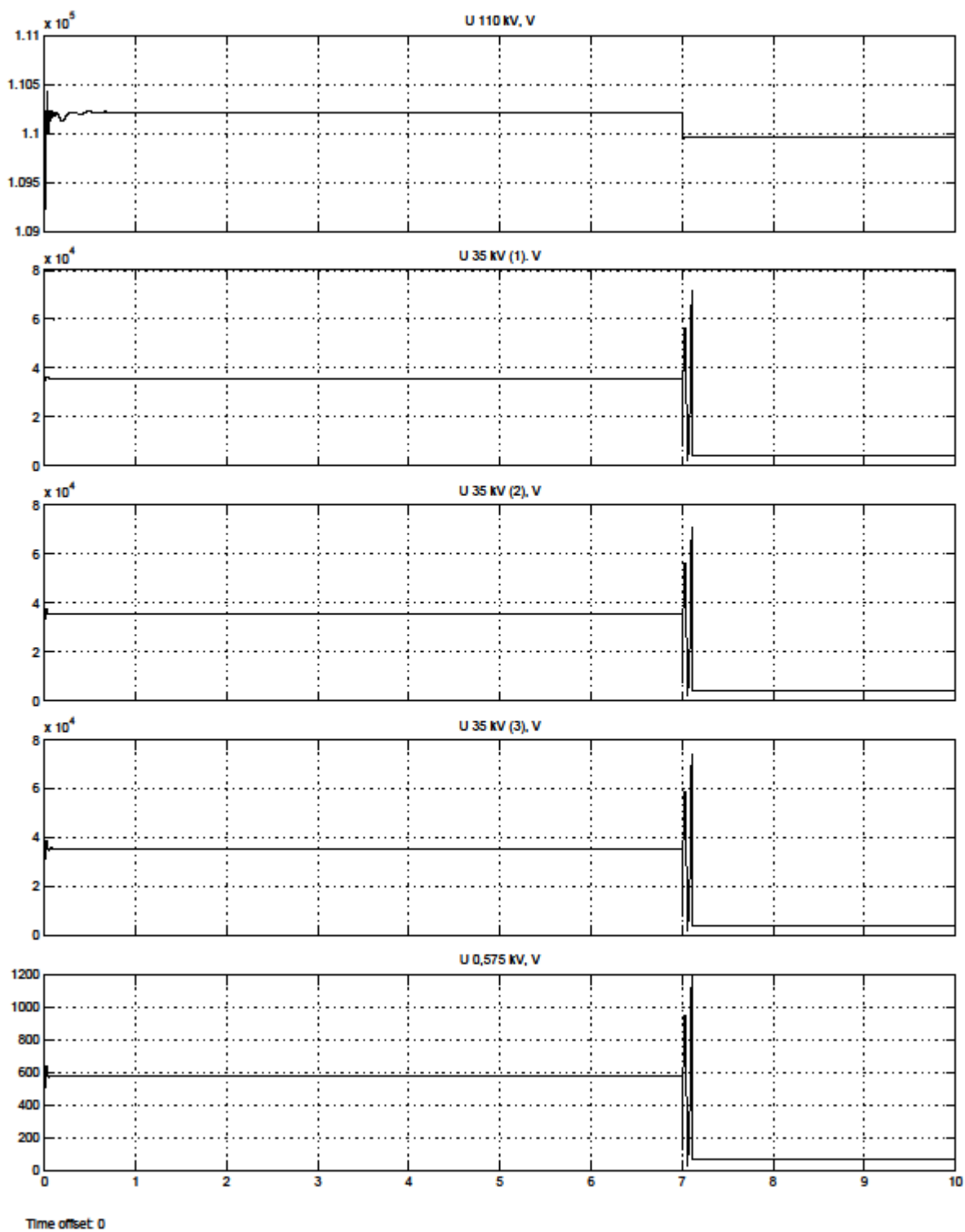
66 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=4092,96$  V;  $I=38,67e^{-102,91}$  A;  $P=-50012,18$  VA;  $Q=-218195,37$  VA.



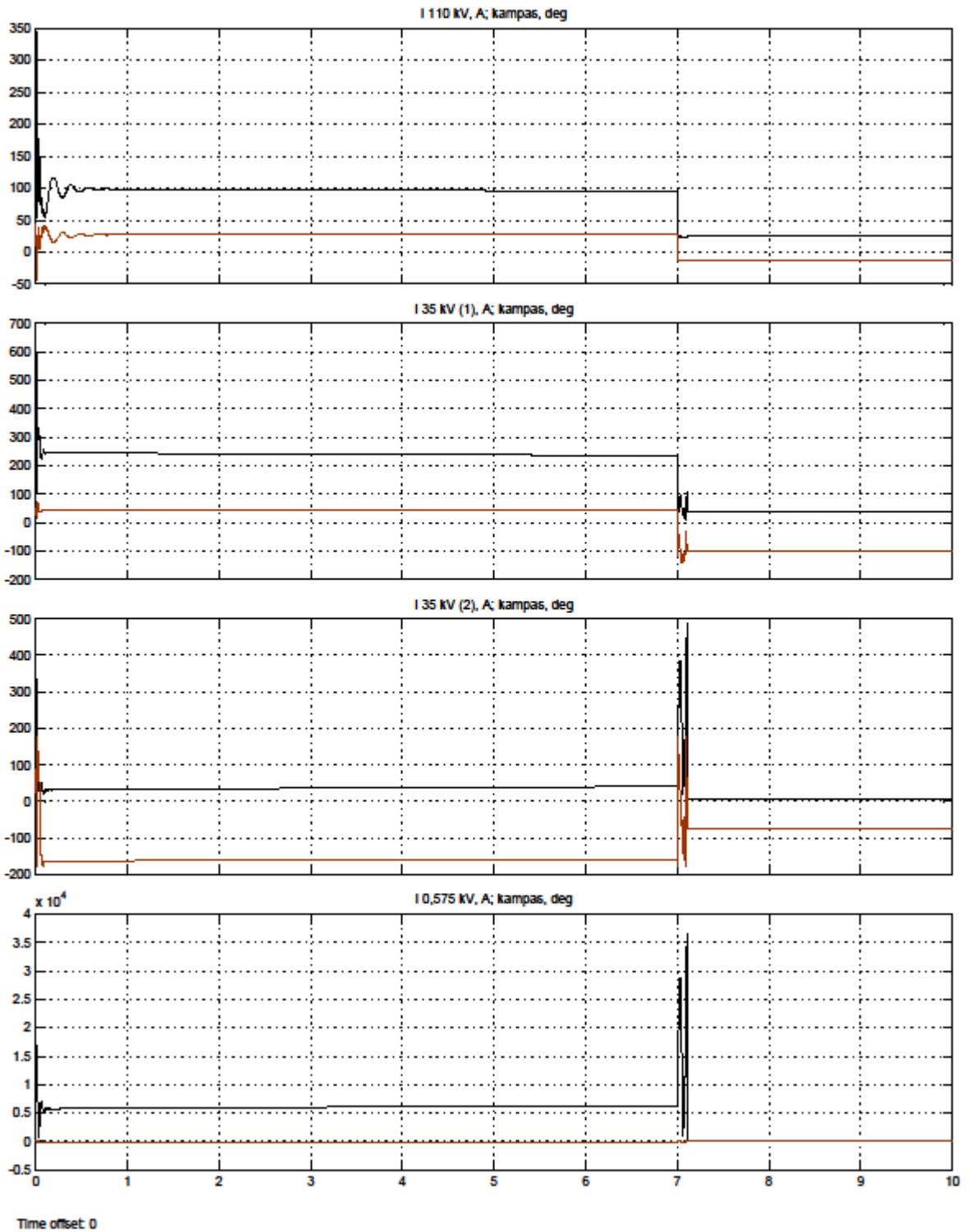
67 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=4096,91$  V;  $I=8,53e^{-75,11}$  A;  $P=12709,60$  VA;  $Q=-47783,48$  VA.



68 pav. 575 V šynos.  $U=67,39$  V;  $I=0e^0$  A;  $P=0$  VA;  $Q=0$  VA.

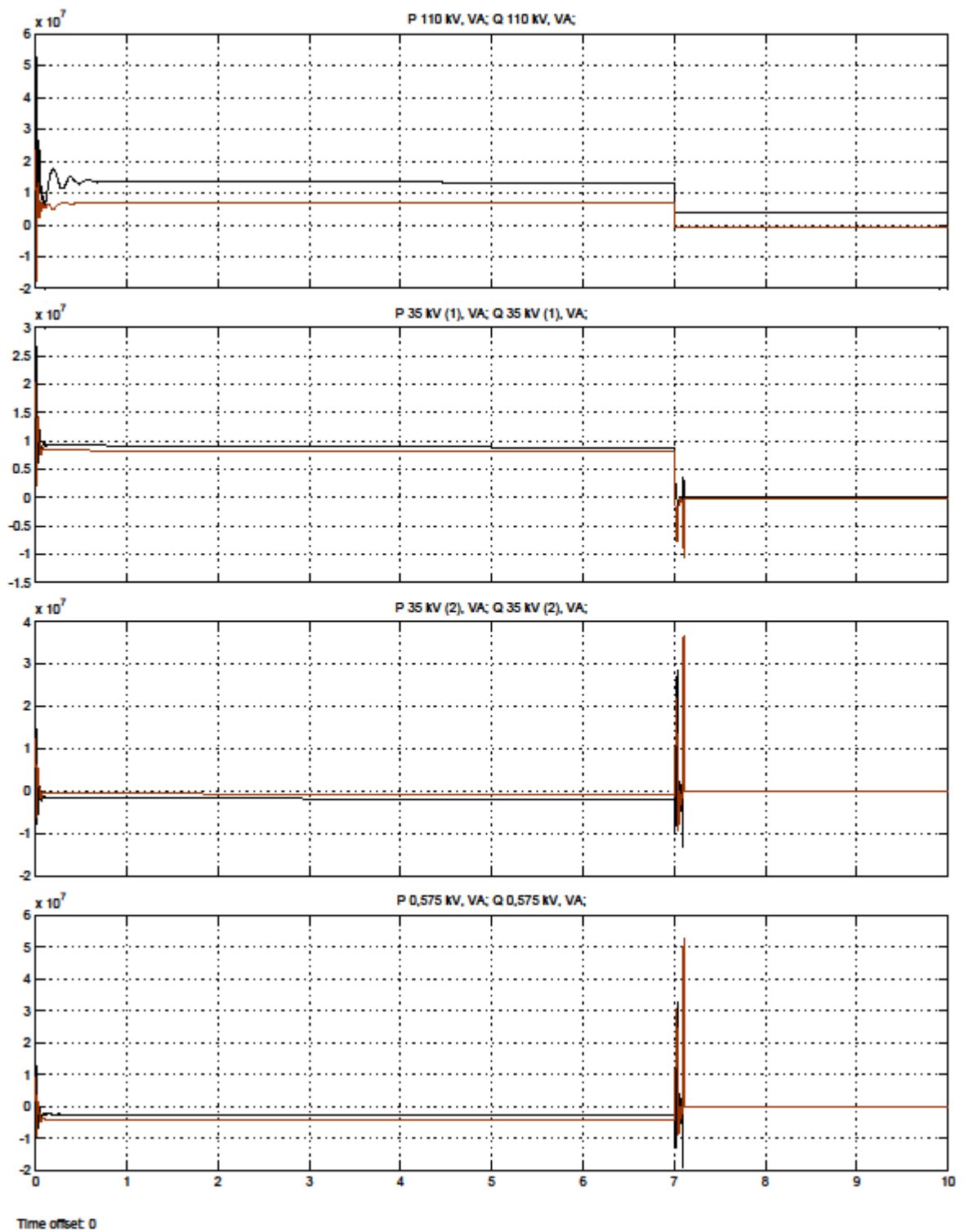


69 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=109951,50\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=4092,96\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=4096,91\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=4102,04\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=67,39\text{ V}$ .

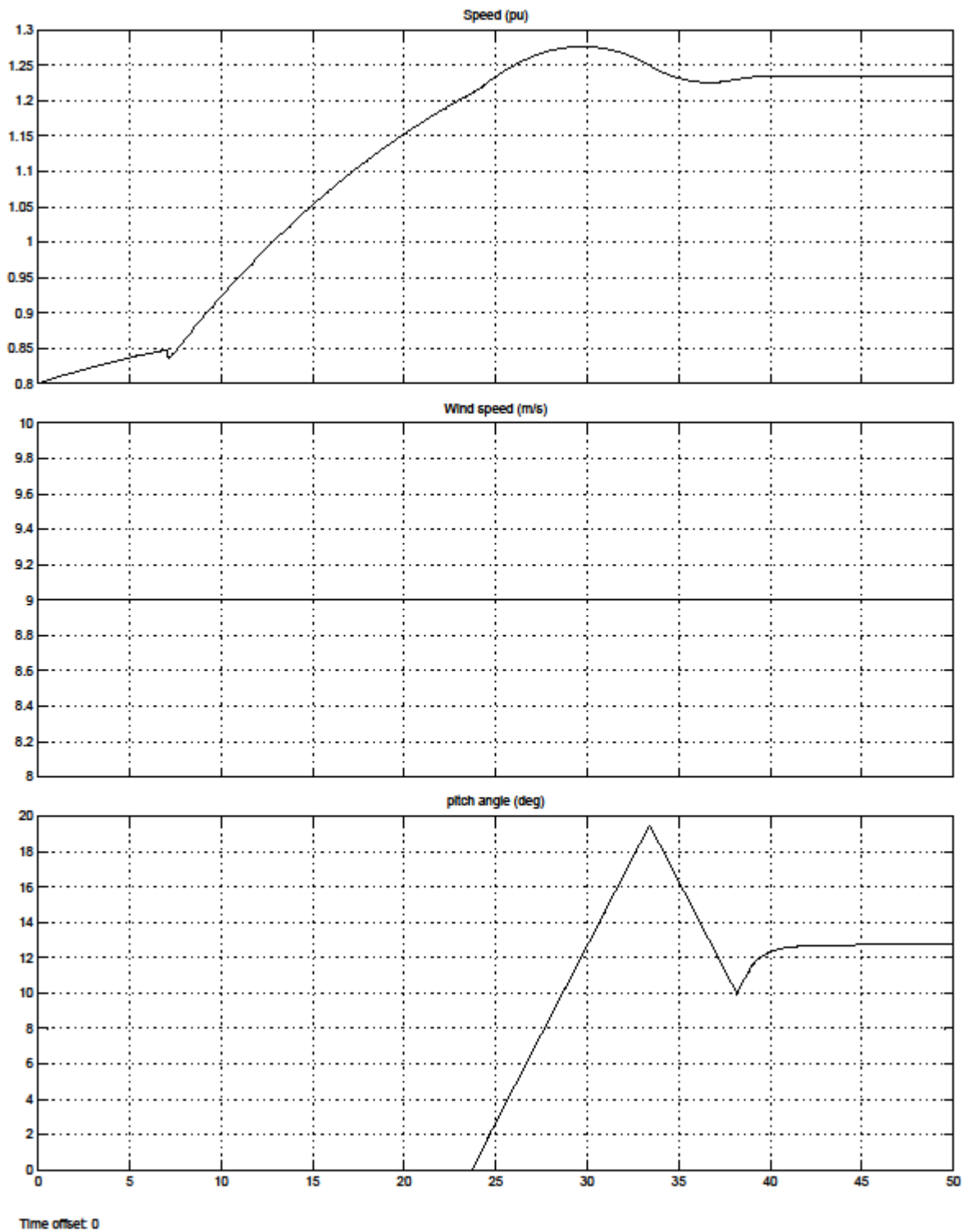


70 pav. I ir kamps.  $I_{110\text{ kV}}=24,43e^{-13,79}$  A;  $I_{35\text{ kV (1)}}=38,67e^{-102,91}$  A;  $I_{35\text{ kV (2)}}=8,53e^{-75,11}$  A;  
 $I_{0,575\text{ kV}}=0e^0$  A;





71 pav.  $P_{110\text{ kV}}=3689488,13\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=-905401,32\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(1)}=-50012,18\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(1)}=-218195,37\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(2)}=12709,60\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(2)}=-47783,48\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=0\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=0\text{ VA}$ ;

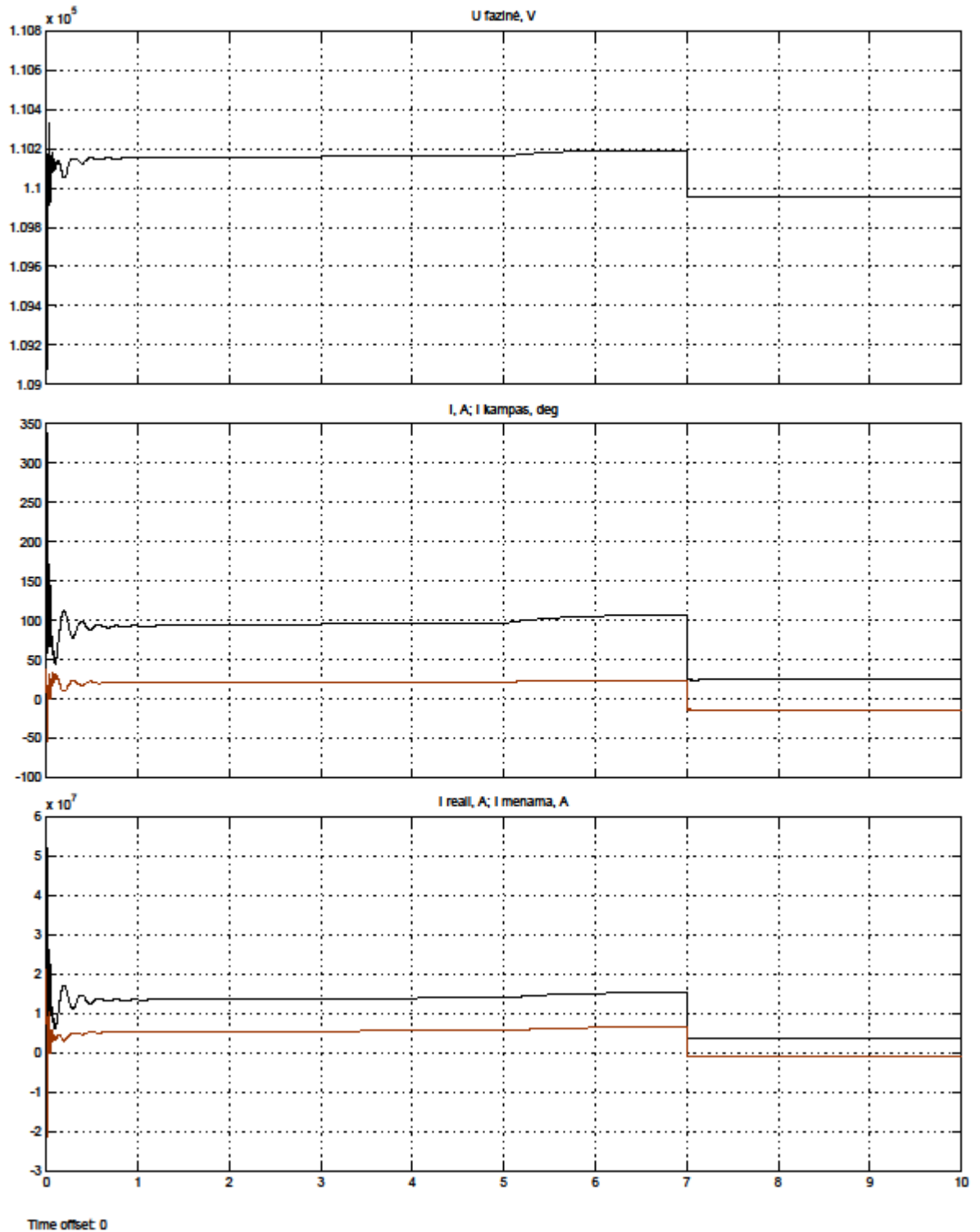


72 pav. VE. generatoriaus greitis (50 s)=1,24;  $V_{vėjo}$  (50 s)=9 m/s;  $\delta_{menčių}$  (50 s)=12,73<sup>0</sup>

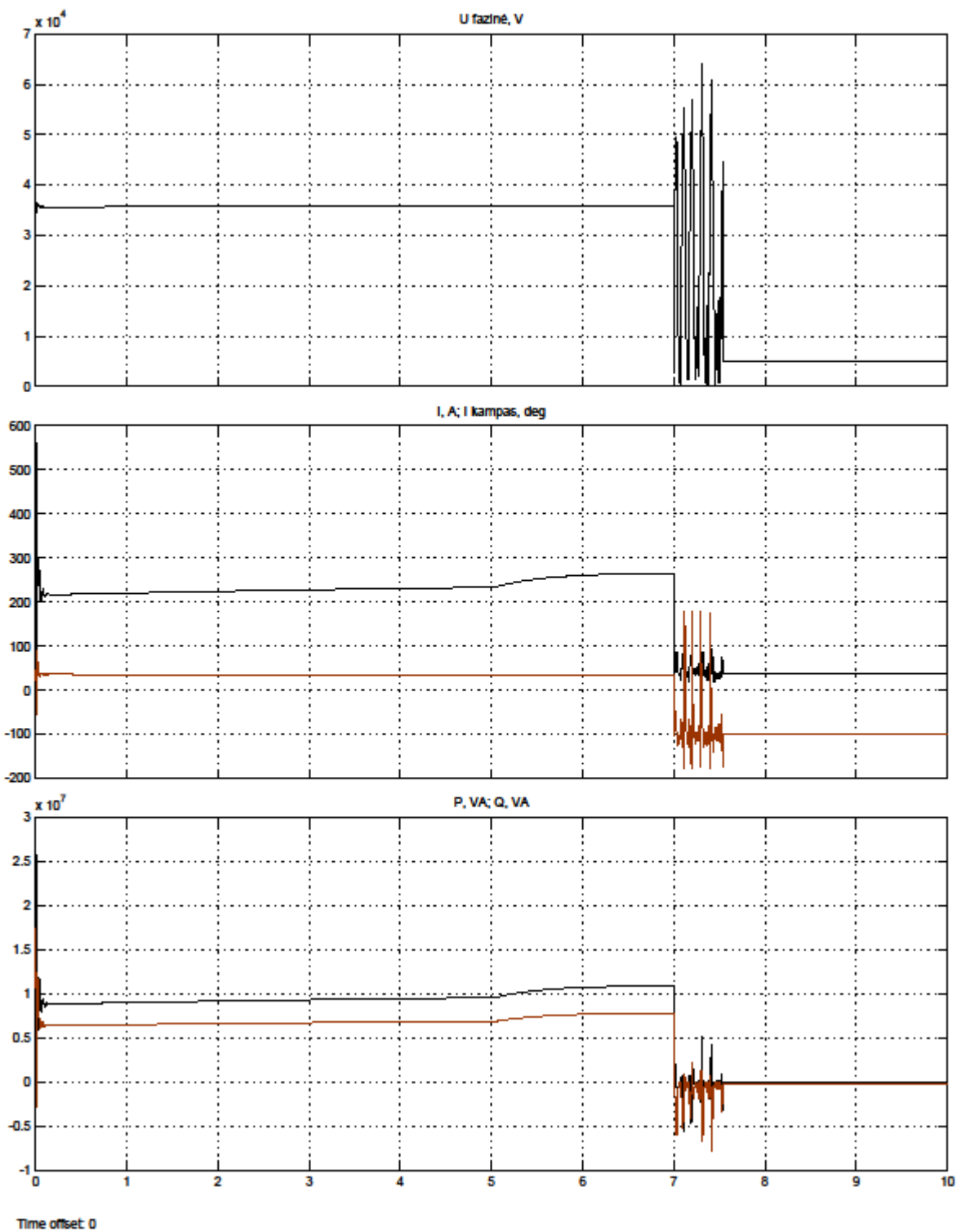
10 PRIEDAS. VE atsijungia nuo tinklo. Sausumos vėjo elektrinė.

$t_{\text{atsijungimo}}=7 \text{ s}$

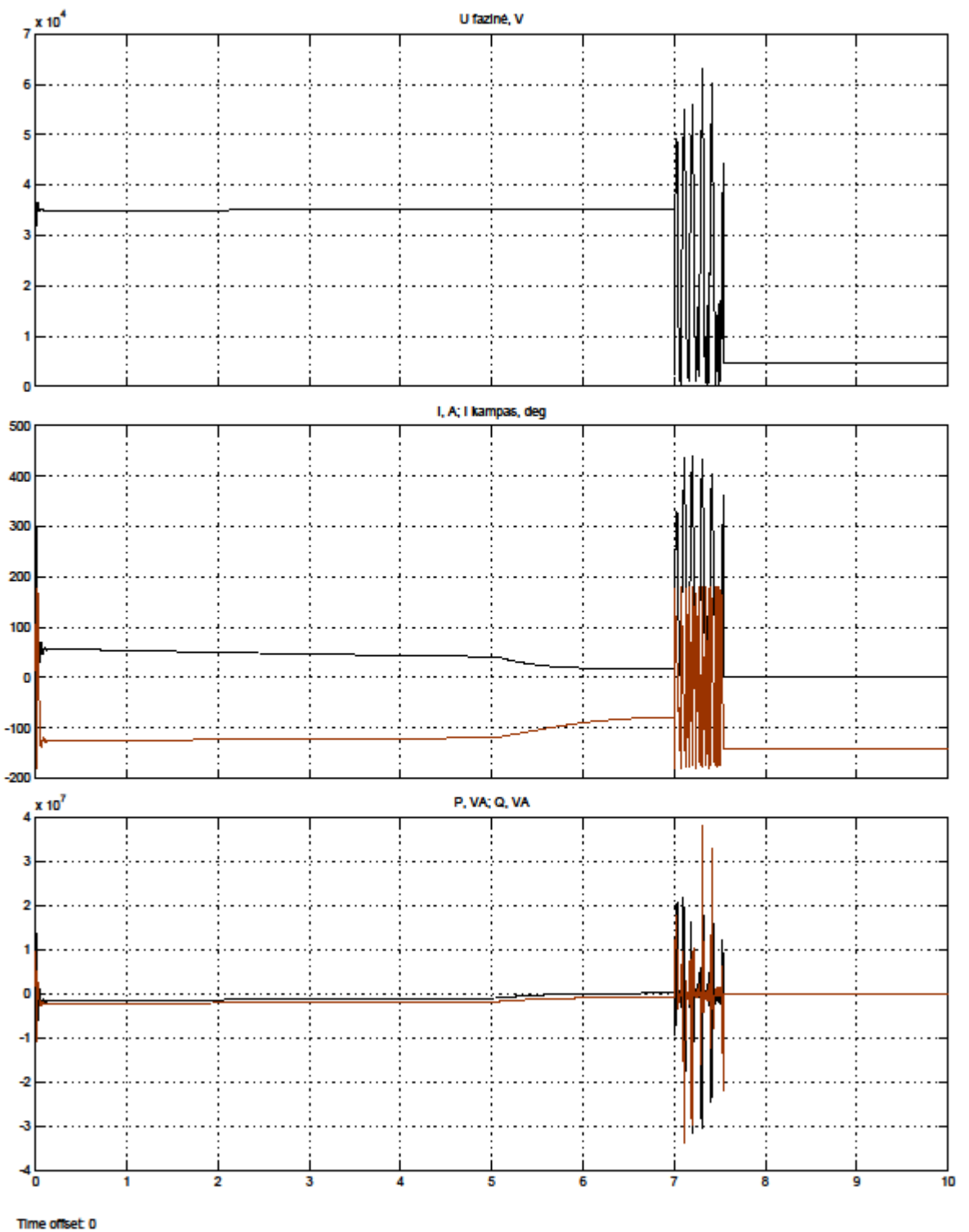
$t_{\text{matavimų}}=10 \text{ s}$



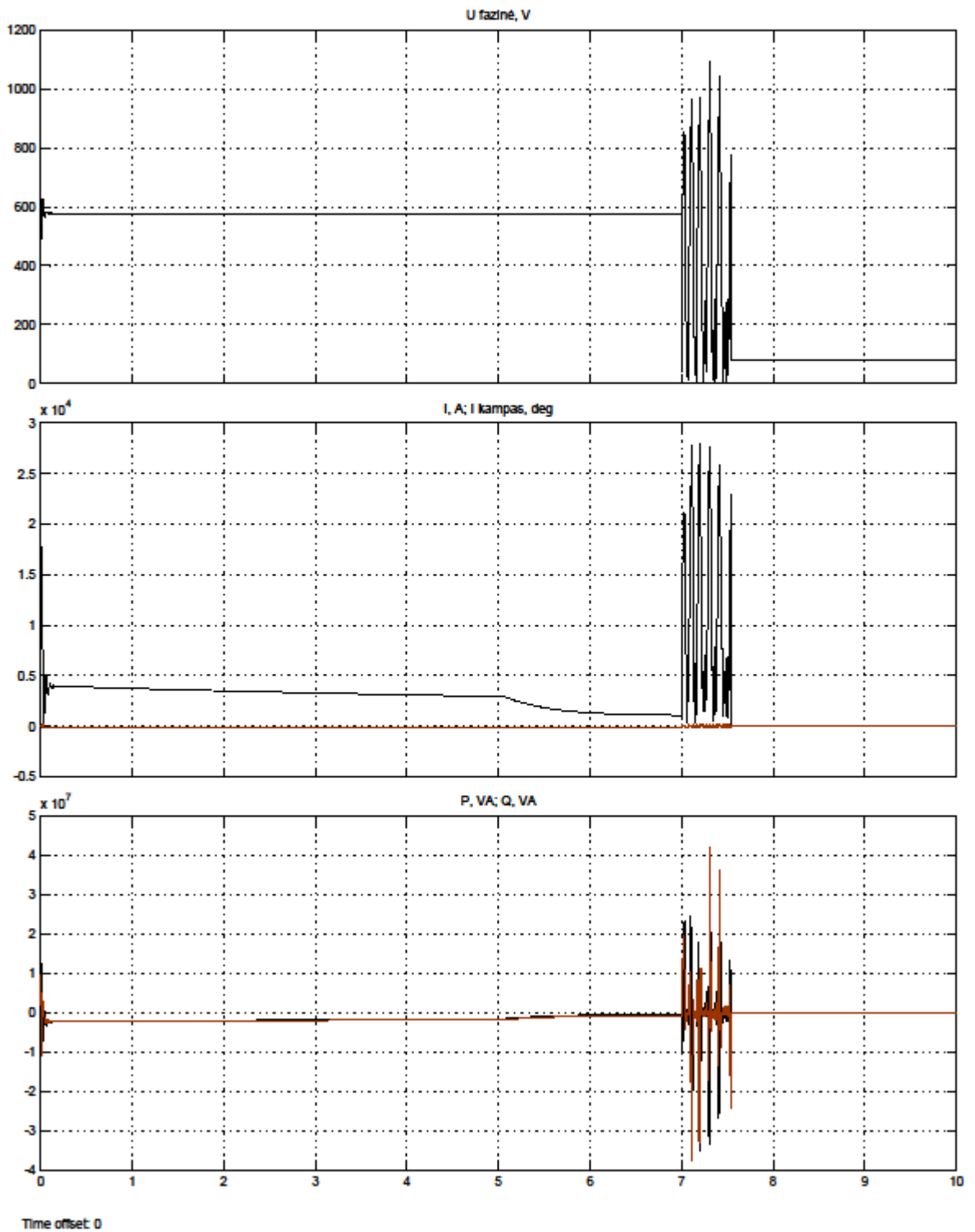
73 pav. 110 kV šynos.  $U=109951,51\text{V}$ ;  $I=24,43e^{-13,79} \text{ A}$ ;  $P=3689496,43 \text{ VA}$ ;  $Q=-905357,48 \text{ VA}$ .



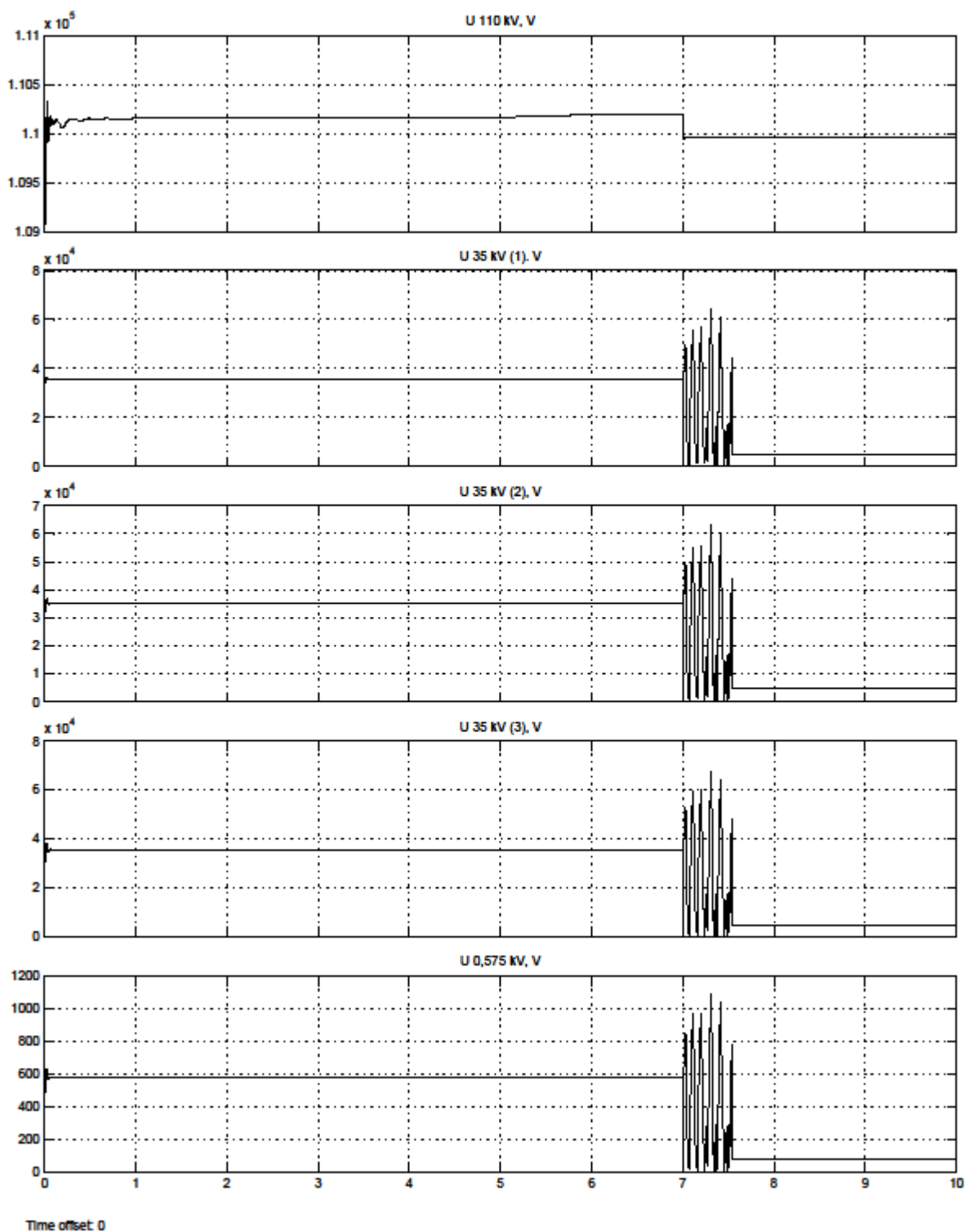
74 pav. 35 kV 1 šynos.  $U=4883,82$  V;  $I=38,38e^{-101,19}$  A;  $P=-51451,94$  VA;  $Q=-260065,30$  VA.



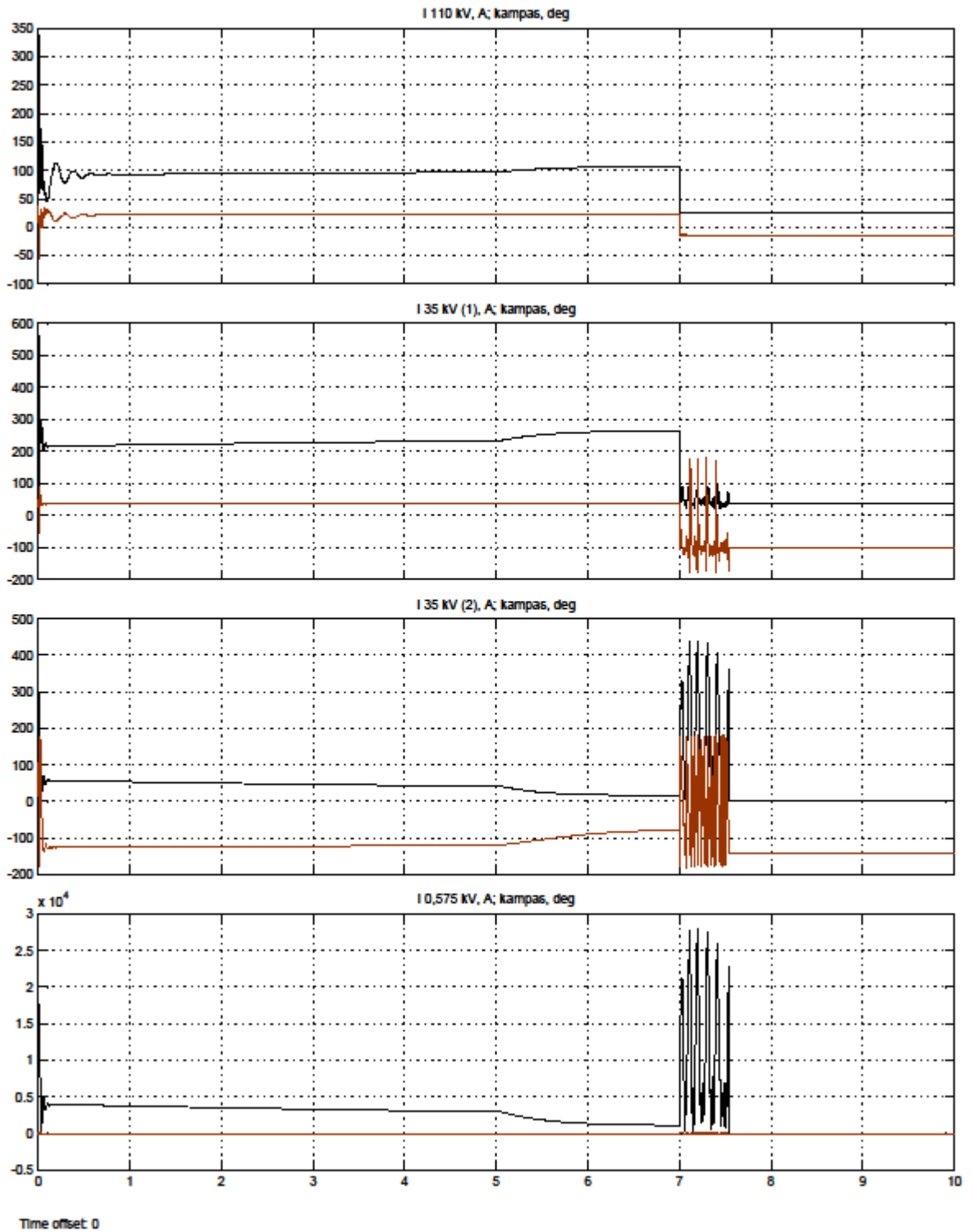
75 pav. 35 kV 2 šynos.  $U=4808,61$  V;  $I=1,71e^{-142,34}$  A;  $P=-9210,68$  VA;  $Q=-7109,07$  VA.



76 pav. 575 V šynos.  $U=78,64$  V;  $I=0$  A;  $P=0$  VA;  $Q=0$  VA.

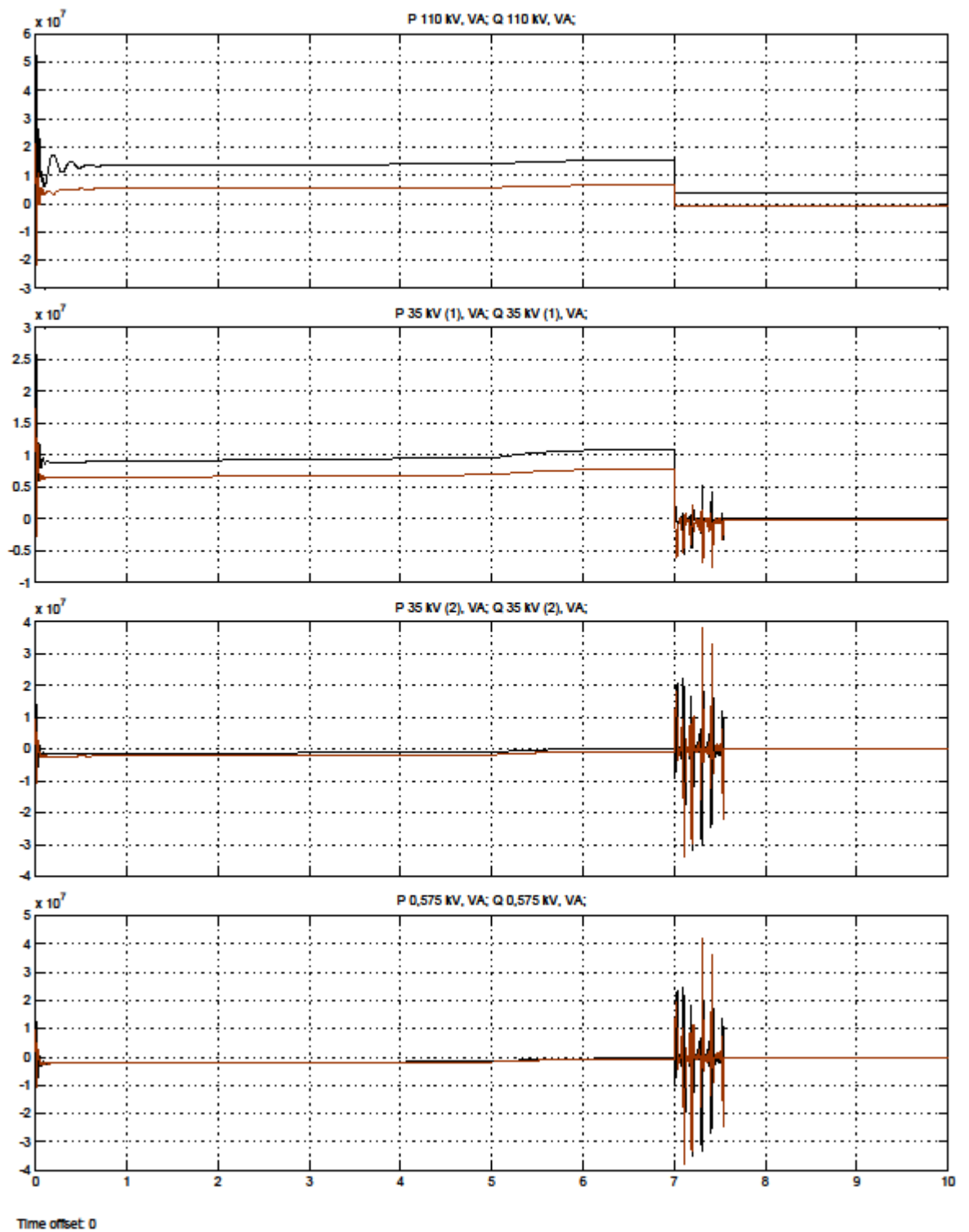


77 pav. Itamos.  $U_{110\text{ kV}}=109951,51\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }1}=4883,82\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }2}=4808,61\text{ V}$ ;  $U_{35\text{ kV }3}=4787,08\text{ V}$ ;  $U_{575\text{ V}}=78,64\text{ V}$ .

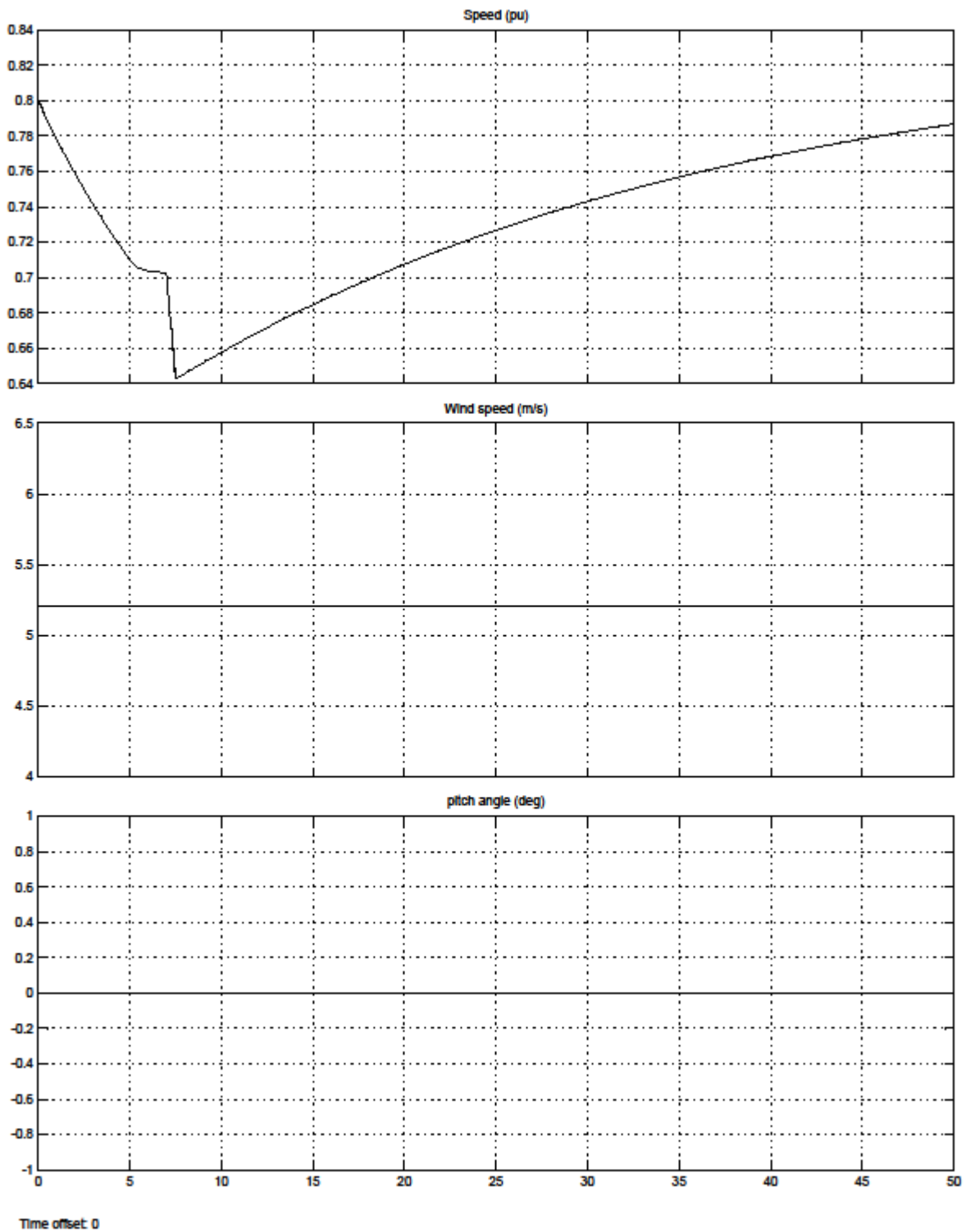


78 pav. I ir kampai.  $I_{110\text{ kV}}=24,43e^{-13,79}$  A;  $I_{35\text{ kV (1)}}=38,38e^{-101,19}$  A;  $I_{35\text{ kV (2)}}=1,71e^{-142,34}$  A;  
 $I_{0,575\text{ kV}}=0$  A;





79 pav.  $P_{110\text{ kV}}=3689496,43\text{ VA}$ ;  $Q_{110\text{ kV}}=-905357,48\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(1)}=-51451,94\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(1)}=-260065,30\text{ VA}$ ;  $P_{35\text{ kV}(2)}=-9210,68\text{ VA}$ ;  $Q_{35\text{ kV}(2)}=-7109,07\text{ VA}$ ;  $P_{0,575\text{ kV}}=0\text{ VA}$ ;  $Q_{0,575\text{ kV}}=0\text{ VA}$ ;



80 pav. VE. Generatoriaus greitis (50 s)=0.79;  $v_{vėjo}$  (50 s)=5.21 m/s;  $\delta_{menčių}$  (50 s)=0°