

# ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМІ ЙОГО ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ

Марченко А.А., к.т.н., доцент, Наухацька Т.А., магістрант  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

**Вступ.** Система збудження (СЗ) є важливим елементом в процесі регулювання напруги в енергосистемі, яка крім забезпечення споживача заданим рівнем напруги підвищує стійкість роботи енергосистеми в усталених та перехідних режимах.

Порушення нормальної роботи системи збудження може привести до небажаних наслідків, таких як зниження/підвищення напруги на шинах, порушення стійкої роботи синхронного генератора, що працює паралельно з мережею [1].

Регулятори сучасних систем збудження, зазвичай, побудовані на основі класичних принципів теорії автоматичного управління. Але при моделюванні таких систем досить розповсюдженою помилкою є застосування стандартних налаштувань, що рекомендовані в програмному забезпеченні, які не дають врахувати особливості системи і, як наслідок, не відображають достовірних і об'єктивних результатів.

**Мета роботи.** Метою даної статті є дослідження оптимальних параметрів статичної системи збудження в програмному середовищі Matlab/Simulink при моделюванні паралельної роботи з енергосистемою.

**Матеріали та результати досліджень.** Система збудження синхронного генератора – комплекс обладнання, пристроїв, апаратів і збірних одиниць, який призначений для збудження постійним струмом генератора, який автоматично регулюється. В цей комплекс входять: збудник, автоматичний регулятор збудження (АРЗ), блок ручного керування (БРК), пристрій гасіння поля (ПГП), пристрій початкового збудження (ППЗ), засоби захисту, управління, автоматики, вимірювань і сигналізації [2].

Основний елемент СЗ – збудник, який є джерелом постійного струму, що регулюється. Він може бути виконаний у вигляді колекторного генератора постійного струму, генератора змінного струму з вентильними перетворювачами або трансформатора з вентильними перетворювачами.

Автоматичне регулювання збудження (АРЗ) синхронних машин вирішує ряд задач:

1. Підтримання напруги в точці регулювання в заданих межах;
2. Забезпечення раціональних перетоків реактивної потужності;
3. Збереження або підвищення статичної стійкості;
4. Підвищення динамічної стійкості в аварійних режимах енергосистеми.

В більшості систем збудження пристрій гасіння поля виконується на основі автомату гасіння поля (АГП), який розмикає ланцюг обмотки збудження. Однак в системах з живленням тиристорного перетворювача від допоміжного генератора, як правило, АГП застосовується тільки в ланцюзі резервного збудника, а на основному збуднику ПГП – це вузол управління (реле або

електронний блок), який переводить тиристорний перетворювач в режим від'ємної напруги (інверторний режим). До ППП додається вузол захисту ланцюгів збудження від перенапруг.

Пристрій початкового збудження короткочасно подає струм для початку збудження генератора від акумуляторної батареї енергоблоку або від мережі змінного струму через спеціальний випрямляч.

Засоби захисту, керування, автоматики, вимірювання і сигналізації СЗ працюють в складі загального комплексу аналогічних складових СТ, СК або енергоблоку [2].

Моделювання досліджуваної системи збудження було засноване на моделях, згідно IEEE, зокрема на статичній системі збудження типу ST1A, структурна схема якої представлена на рис. 1 [3].

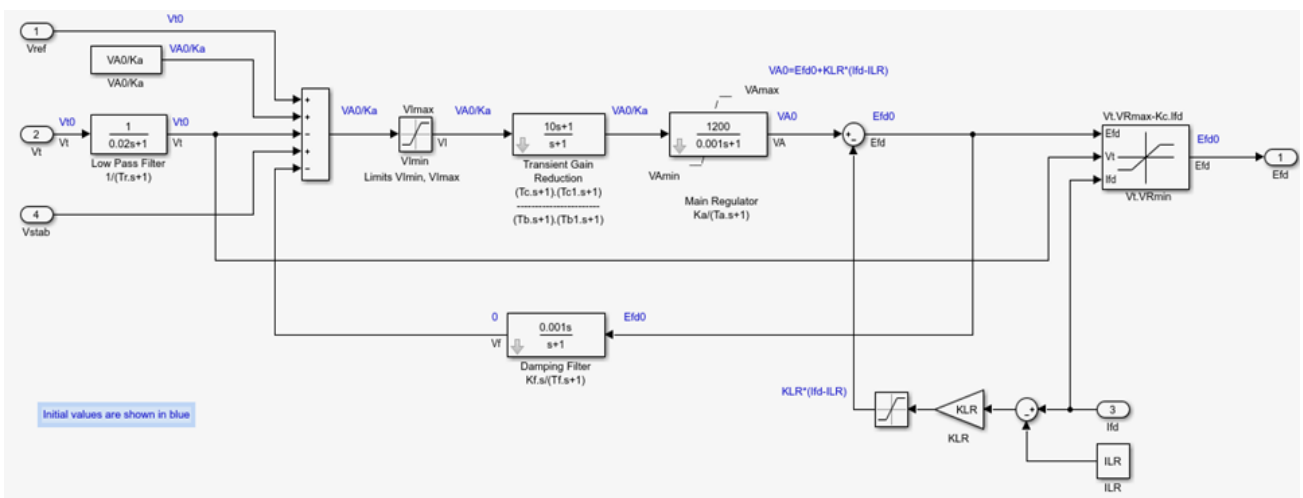


Рисунок 1 – Структурна схема системи збудження ST1A

Передаточні функції системи збудження представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Передаточні функції системи збудження [3, 4, 5]

Складові системи збудження	Передаточна функція
Вхідний низькочастотний фільтр (Low Pass Filter)	$\frac{1}{T_r s + 1}$
Головний регулятор (Main Regulation)	$\frac{K_a}{T_a s + 1}$
Похідний зворотній зв'язок (демпфуючий контур) (Damping filter)	$\frac{K_f}{T_f s + 1}$
Кратність форсування-розфорсування (Transient gain reduction)	$\frac{(T_c s + 1) \cdot (T_{c1} s + 1)}{(T_b s + 1) \cdot (T_{b1} s + 1)}$

В даній системі збудження напругу трансформують до допустимого рівня, а далі за допомогою випрямляча отримують необхідний постійний струм.

Ця модель призначена для представлення систем, в яких живлення системи збудження відбувається через трансформатор з виводів генератора ( $V_t$ ), а регулювання напруги збудження здійснюється керуючим випрямлячем [6, 7]. Максимальна напруга на виході збудника напругу залежить від напруги на виводах генератора.

В програмному середовищі Matlab/Simulink схема системи збудження ST1A представлена стандартними параметрами, що встановлені за замовчуванням. Проблема полягає в тому, що найчастіше параметри реальної системи невідомі і тому моделі, які використовуються в планувальних та експлуатаційних дослідженнях не можуть відобразити справжньої картини [3, 8, 9].

Тому спираючись на попередньо отримані результати оптимальних значень параметрів та динамічних моделей [3], створимо модель для дослідження системи збудження генератора в режимі паралельної роботи з енергосистемою (рис. 2), яка складається з системи збудження 2(1), генератора 2(2), трансформатора 2(3), лінії електропередачі 2(4) і шини нескінченної потужності 2(5) (амплітуда і фаза напруги і частота задані і залишаються незмінними при будь-яких змінах навантаження) [4, 5, 6, 10].

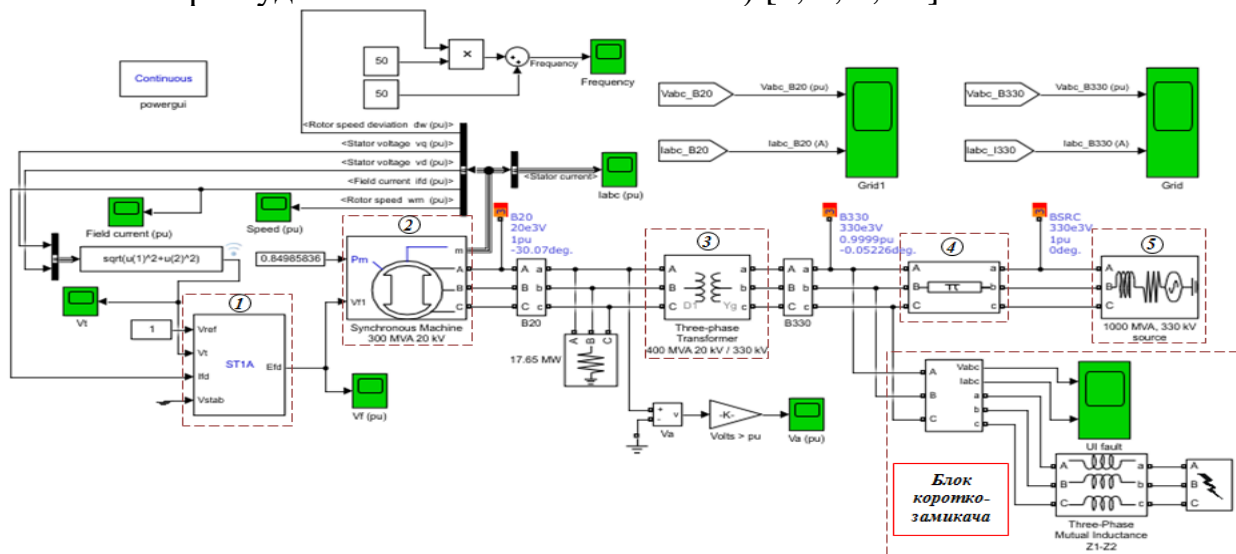


Рисунок 2 – Модель системи в режимі її паралельної роботи з енергосистемою

На першому етапі дослідження необхідно виконати порівняльний аналіз відпрацювання системи при стандартних і оптимальних параметрах системи збудження. Для цього проведемо моделювання коротких замикань на стороні 330 кВ. Аналіз виконаємо на моделі, що наведена на рис. 2 з приєднанням блоку короткозамикача. Короткі замикання моделюються 0,2 секунди (2-2,2 секунди).

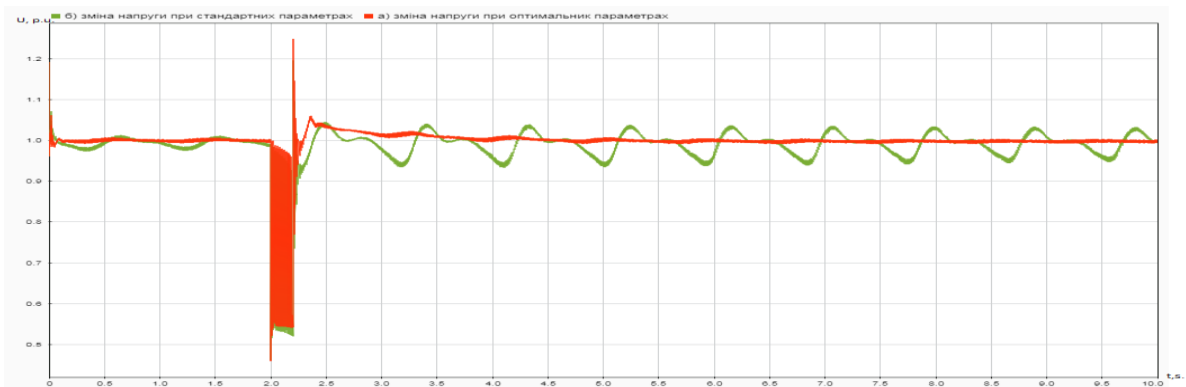


Рисунок 3 – Зміна напруги на терміналі при однофазному КЗ (А на землю) (стандартні (зелена лінія) та оптимальні (червона лінія) параметри системи збудження)

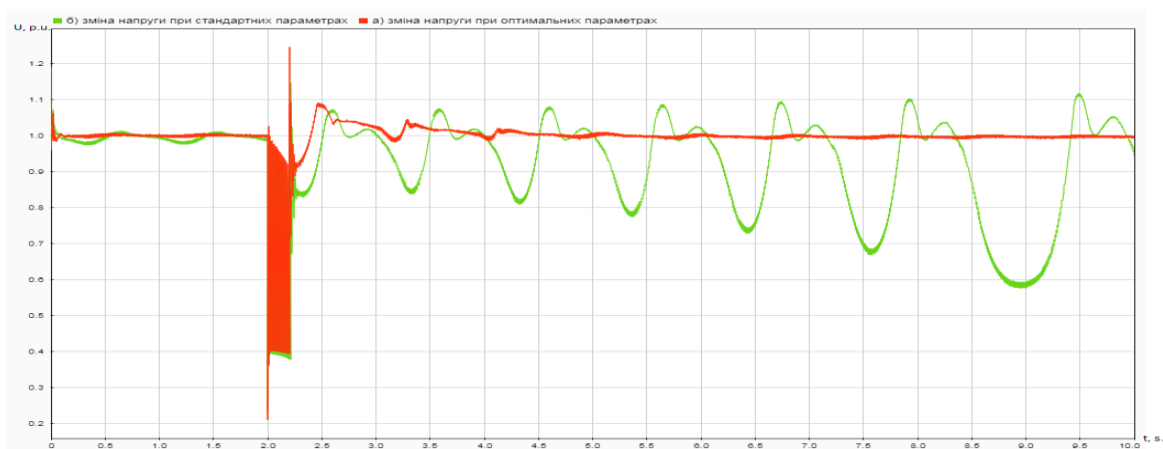


Рисунок 4 – Зміна напруги на терміналі при двофазному КЗ (АВ) (стандартні (зелена лінія) та оптимальні (червона лінія) параметри системи збудження)

Отже, як видно з отриманих залежностей (рис. 3, 4), при оптимальних параметрах системи збудження досліджувана модель реагує на КЗ, але швидко відновлює заданий рівень напруги, що відсутнє при стандартних параметрах.

Наступним етапом проведемо аналіз моделювання різних видів коротких замикань з урахуванням лише оптимальних параметрів системи збудження.

### 1. Однофазне КЗ (А на землю)

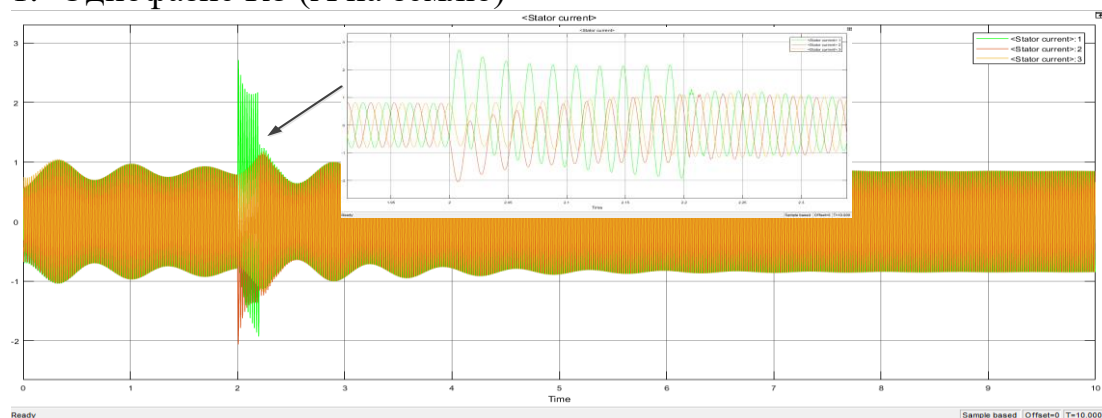


Рисунок 5 – Струм статора  $I_{abc}$  при однофазному КЗ (А на землю)

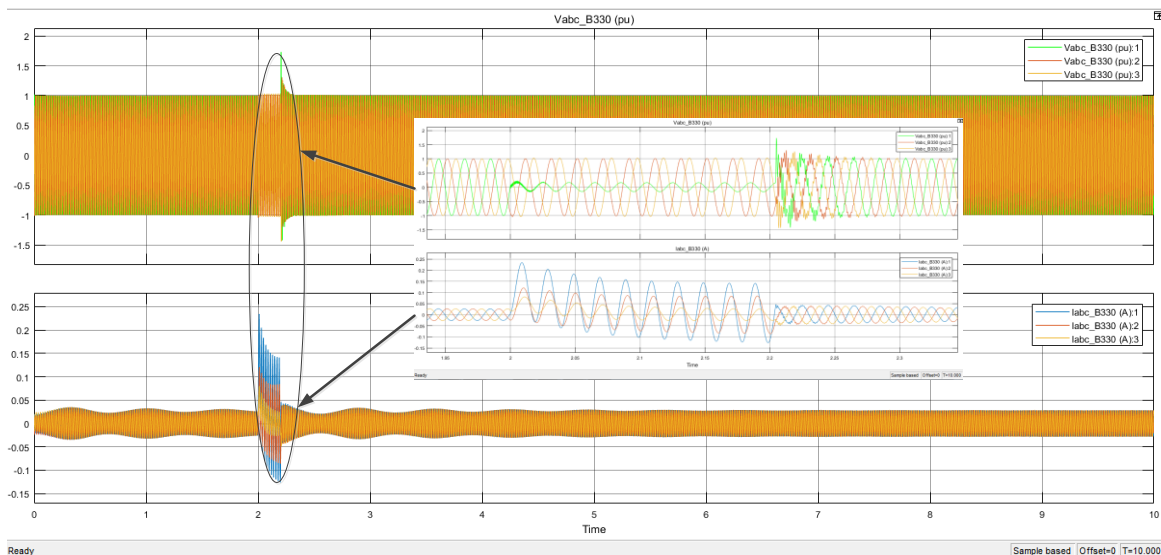


Рисунок 6 – Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ при однофазному КЗ (А на землю)

Аналіз отриманих даних на рис. 5, 6 наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання однофазного КЗ на стороні 330 кВ

Отримана характеристика	Опис результату
Струм статора $I_{abc}$	Збільшення струму до 2,5 в.о. на 2 секунді. Після закінчення перехідного режиму струм швидко відновлюється до допустимих меж.
Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ	Зниження напруги фази А до 0,3 в.о. і одночасний ріст струму фази А, вихід на усталений режим на 2,3 секунді.

## 2. Двофазне КЗ (AB)

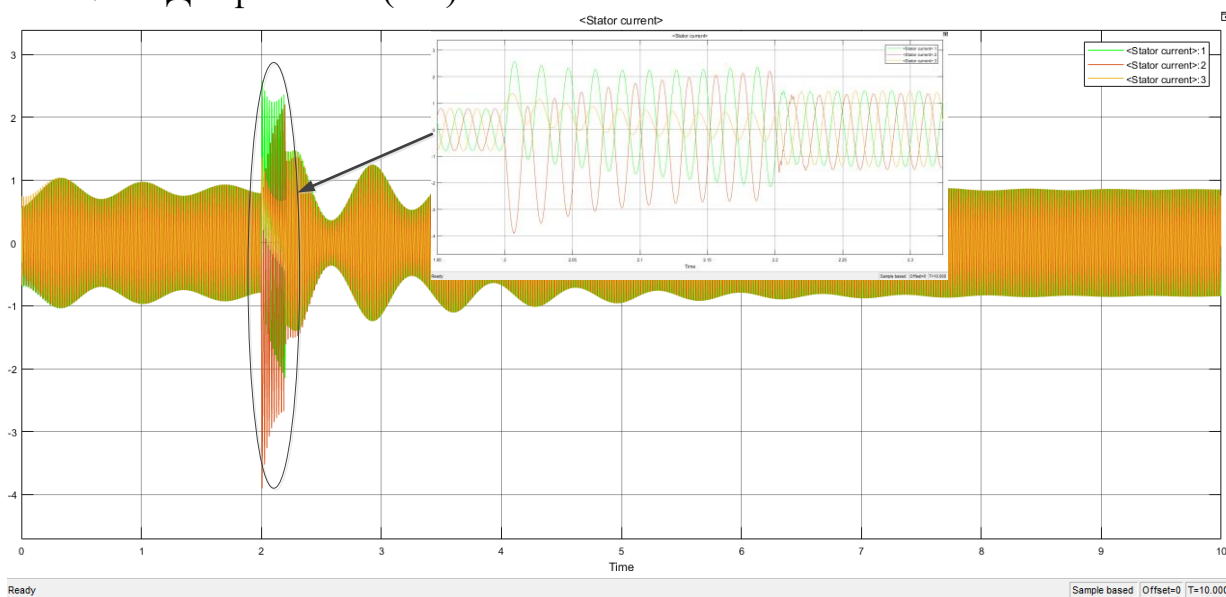


Рисунок 7 – Струм статора  $I_{abc}$  при двофазному КЗ (AB)

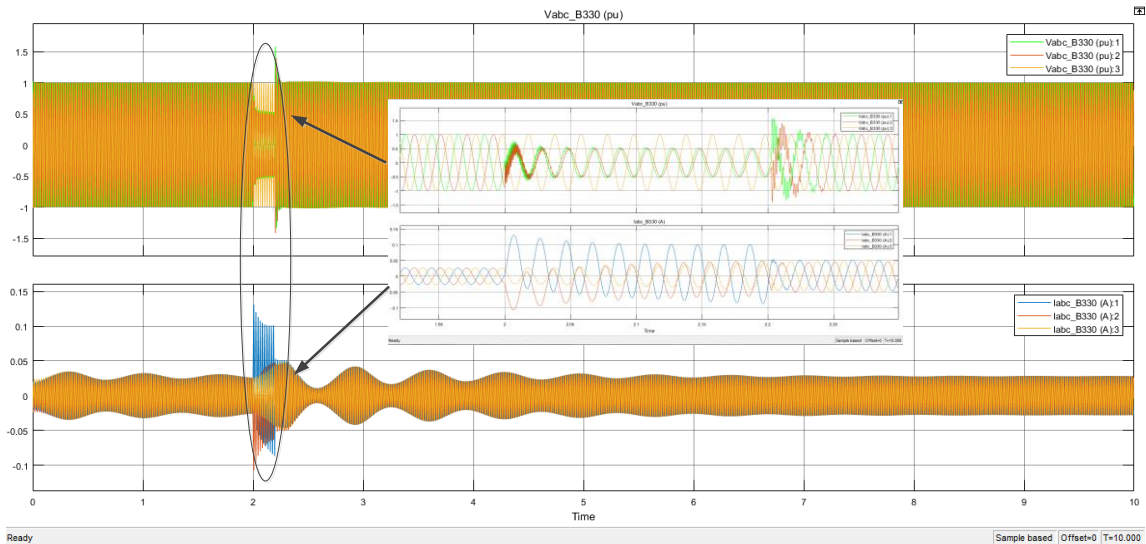


Рисунок 8 – Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ при двофазному КЗ (АВ)

Аналіз отриманих даних на рис. 7, 8 наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати моделювання двофазного КЗ (АВ) на стороні 330 кВ

Отримана характеристика	Опис результату
Струм статора $I_{abc}$	Збільшення струму фаз А і В до 2,5 в.о. на 2 секунді внаслідок перехідного процесу. Після закінчення перехідного процесу струм швидко відновлює своє значення до допустимих меж.
Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ	Зниження напруги фаз А і В до 0,5 в.о. і одночасний пропорційний ріст струму фаз А і В, вихід на усталений режим на 2,3 секунді.

### 3. Трифазне КЗ (АВС)

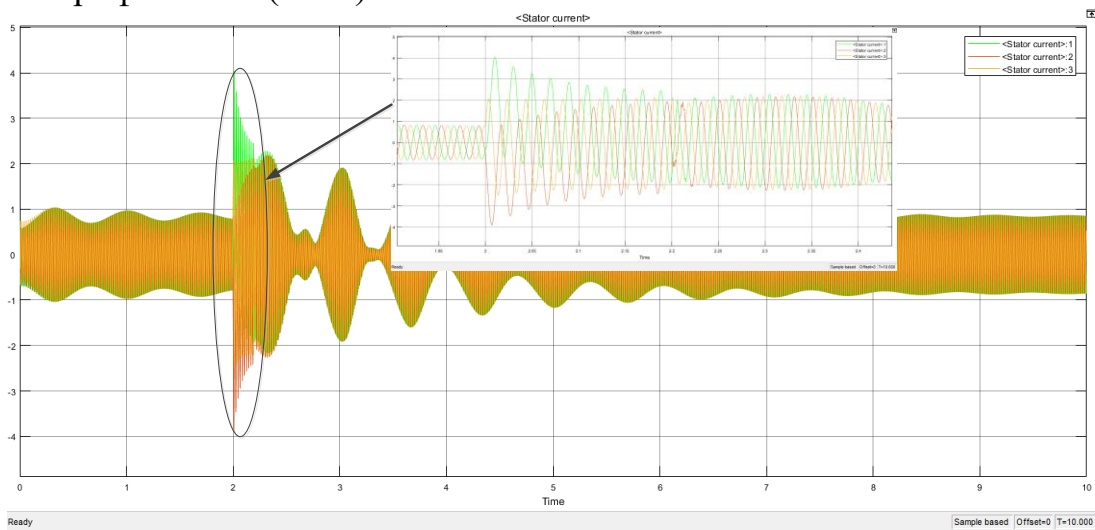


Рисунок 9 – Струм статора  $I_{abc}$  при трифазному КЗ (АВС)



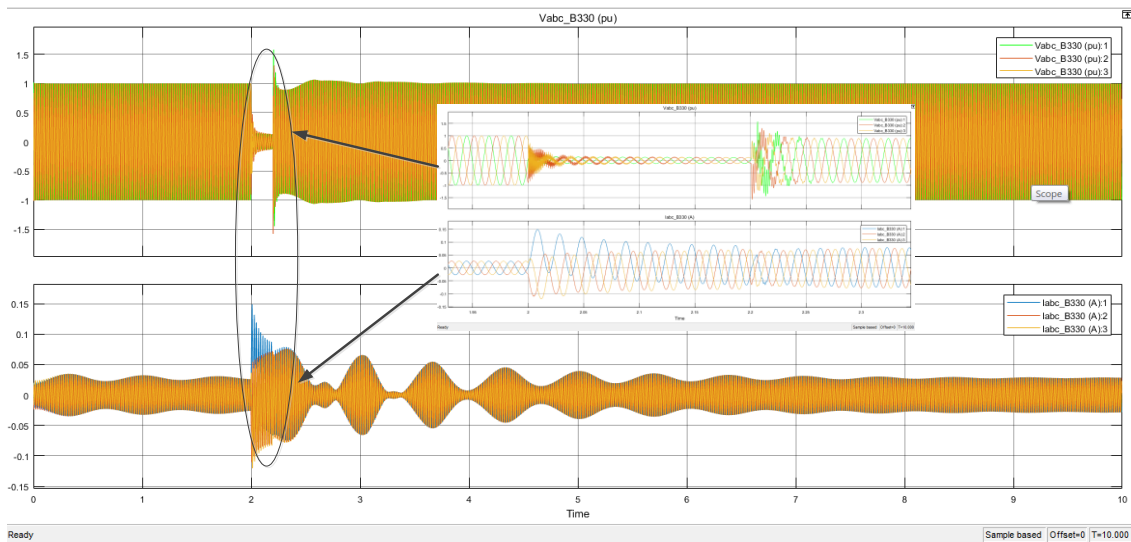


Рисунок 10 – Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ при трифазному КЗ (АВС)

Аналіз отриманих даних на рис. 9, 10 наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання трифазного КЗ (АВС) на стороні 330 кВ

Отримана характеристика	Опис результату
Струм статора $I_{abc}$	Збільшення струму фаз А,В,С до 4 в.о. на 2 секунді, але за рахунок оптимальних параметрів спостерігається швидке реагування системи.
Вимірювальні значення напруги і струму на стороні 330 кВ	Зниження напруги фаз А,В,С до 0,2 в.о. і одночасний пропорційний ріст струму фаз А,В,С.

Суміщені графіки напруги і струму одно-, дво-, і трифазного КЗ наведено на рис. 11-12, а аналіз отриманих результатів наведений в табл. 5.

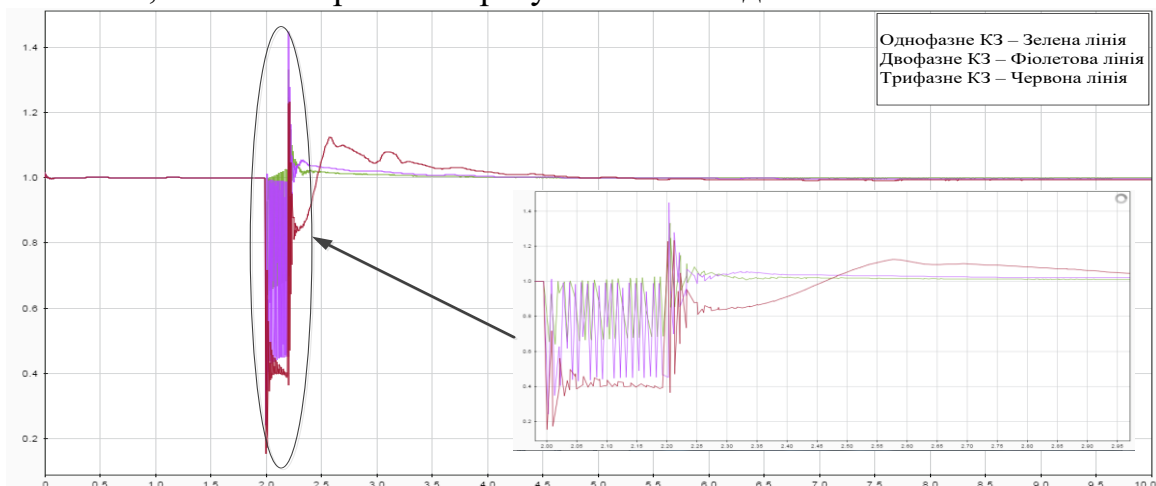


Рисунок 11 – Суміщений графік результуючої напруги

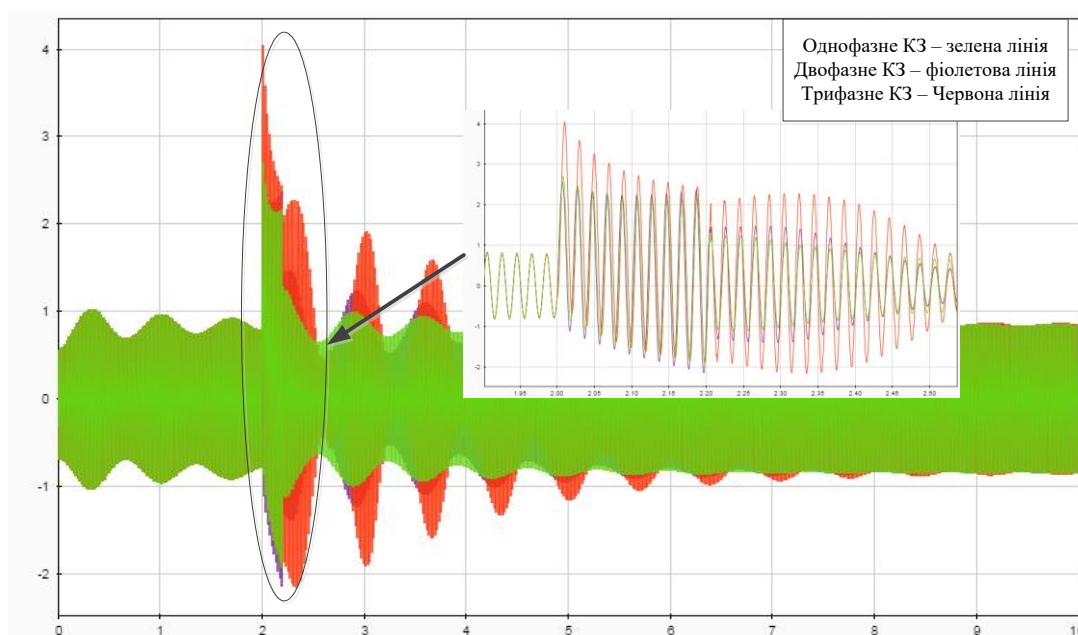


Рисунок 12 – Суміщений графік результуючого струму

Таблиця 5 – Порівняльна характеристика одно-, дво-, трифазного КЗ

Вид короткого замикання	Характеристика результуючої напруги	Характеристика результуючого струму
Однофазне КЗ	Різкий спад напруги до 0,66 в.о., вихід в допустимі межі на 2,5с.	Збільшення струму до 2,2 в.о.
Двофазне КЗ	Різкий спад напруги до 0,43 в.о., вихід на усталений режим на 2,9 секунді.	Збільшення струму до 2,3 в.о.
Трифазне КЗ	Різкий спад напруги до 0,1 в.о., вихід на усталений режим на 5 секунді.	Збільшення струму до 4 в.о.

Отже, як видно з суміщених графіків результуючих напруги і струму, для системи найтяжчим режимом є трифазне коротке замикання, що характеризується різким зниженням напруги і збільшенням струму на початку моделювання КЗ (2 секунда), але за рахунок оптимального налаштування параметрів системи збудження система швидко реагує на пошкодження та виходить за короткий час на усталений режим з допустимими межами.

Проаналізуємо вплив навантаження на характеристики напруги і струму на стороні 330 кВ (рис. 13).



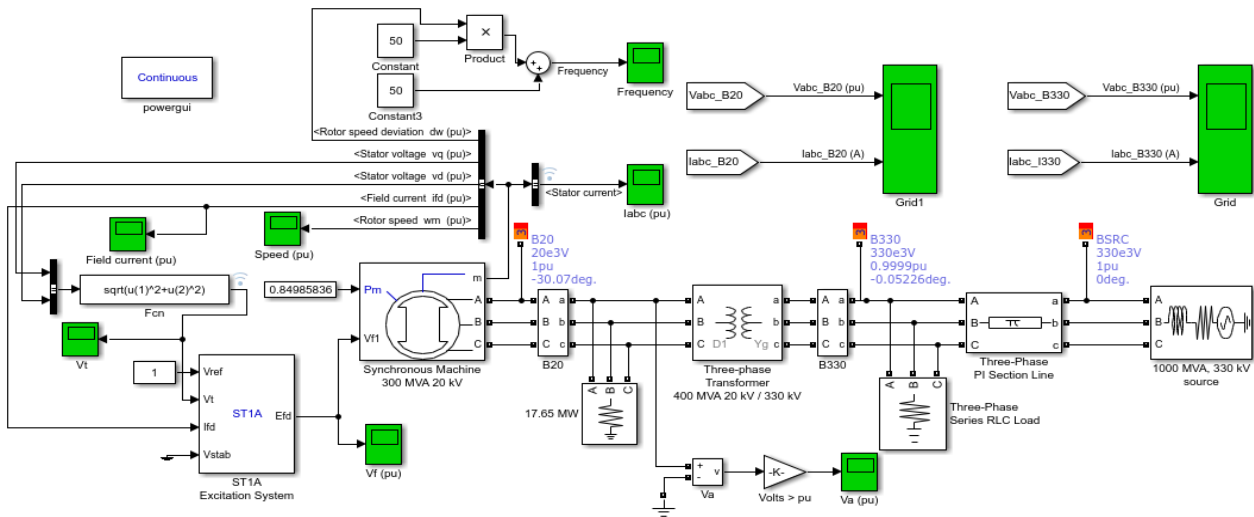


Рисунок 13 – Модель для дослідів зі зміною навантаження на стороні 330 кВ

Зміна активного навантаження на 25% (75МВт), 50% (150МВт), 75% (225МВт) представлена на суміщених графіках напруги та струму (рис. 14-15).

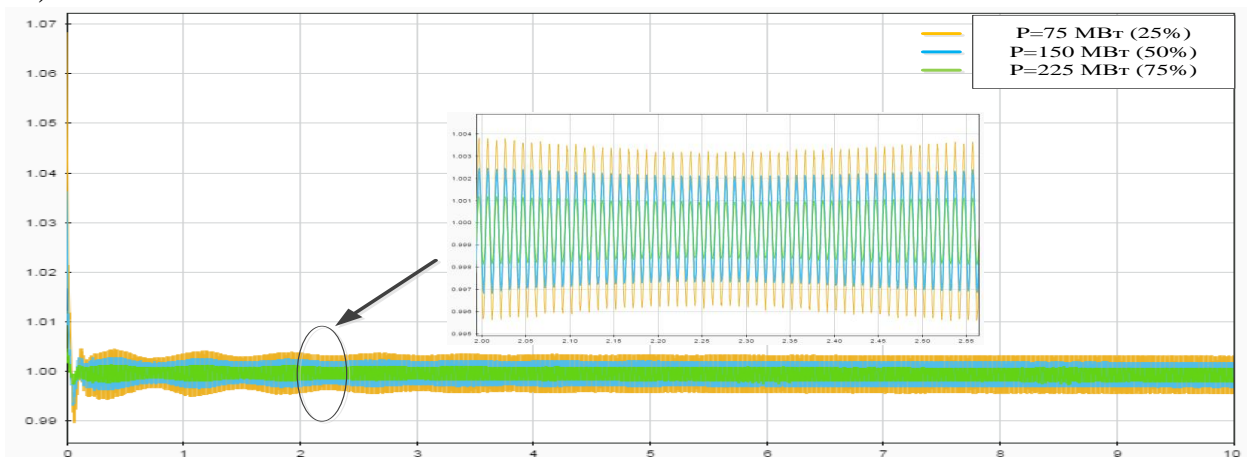


Рисунок 14 – Суміщений графік напруги для навантаження 25%, 50%, 75%

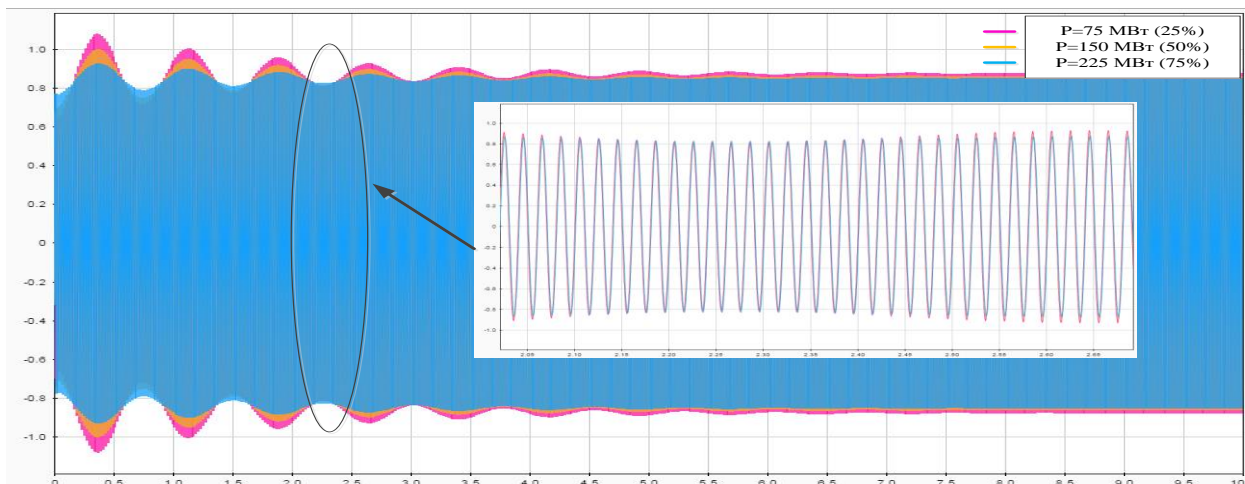


Рисунок 15 – Суміщений графік струму для навантаження 25%, 50%, 75%

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що зі збільшенням навантаження спостерігається зниження струму та напруги.

**Висновки.** На основі створення окремих елементів в програмному середовищі Matlab/Simulink побудовано модель системи управління збудженням генератора, що працює паралельно з енергосистемою.

Дослідження показали, що вибір оптимальних параметрів системи збудження генератора та застосування їх в моделі, яка працює в режимі паралельної роботи з енергосистемою підтверджує необхідність налаштування системи збудження, оскільки значно підвищується ефективність регулювання напруги.

Результати досліджень можуть бути використані при розробці та налаштуванні систем регулювання напруги.

#### Перелік посилань

1. Тарасевич М. Д. Анализ и разработка методики исследования поврежденной тиристорной системы возбуждения синхронного генератора : дис. ... маг: 13.04.02 / Спб. ин-т. энергетики и транспортных систем. – Спб., 2017. – 77с.

2. Системы возбуждения мощных синхронных генераторов и компенсаторов. Учебно-методическое пособие. – М. : ВИПКэнерго, 1990. – 67с.

3. Марченко А.А., Наухацька Т.А. Моделювання системи збудження генератора та визначення її оптимальних параметрів. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики» [Електронний ресурс] – 2018. – С.39-46. – Режим доступу <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/164103/163091>

4. Черных И.В. моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных – М.:ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288с.

5. Simscape Power Systems Simscape Blocks [Electronic Resource]. – Mode of access : URL : <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/simscapeblocklist.html>. – Title from the screen.

6. Теория автоматического управления в среде MATLAB: учеб. пособие / В. И. Будин, Ф. В. Дремов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 127 с.: ил. 36, табл. 7. Библиогр.: 9 назв.

7. Функциональное описание UNITROL 6800 / Static excitation systems,. – Switzerland : ABB Ltd, 2009. – 115с.

8. A. Burmistrov, E. Popov, A. Urganov, A. Gerasimov e A. Esipovich, “Estimation of efficiency of modern excitation controllers of synchronous machines in the conditions of physical model of a complex system and suggestion of estimation technique and criteria as an addition to the IEC standard,” em 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 2012.

9. “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 21 April 2006.

10. J. Lai, “Parameter Estimation of Excitation Systems,” Master’s thesis, Raleigh, North Carolina, 2007.