

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАУКОВІ ПРАЦІ
ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**СЕРІЯ:
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
І
ЕНЕРГЕТИКА**

Всеукраїнський науковий збірник,
заснований у червні 2003 року
Виходить 2 рази на рік

№1(19) – 2(20)'2018

Покровськ – 2018

Друкується за рішенням Вченої ради державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (протокол №8 від 05.12.2018).

У збірнику публікуються наукові статті співробітників кафедр Донецького національного технічного університету та інших університетів України та світу. В цих статтях наведено результати наукових досліджень і розробок з питань електроенергетики, електротехніки, електромеханіки та теплоенергетики.

Збірник розрахований на наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, а також аспірантів і студентів, які навчаються за спеціальностями: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» й «Теплоенергетика».

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – В. Ф. Сивокобиленко, доктор технічних наук, професор;
Заступники головного редактора – Є. О. Башков, доктор технічних наук, професор;
Відповідальний секретар – О. Ю. Колларов, кандидат технічних наук, доцент;

А. А. Зорі, доктор технічних наук, професор, м. Покровськ, Україна;
А. К. Семенченко, доктор технічних наук, професор, м. Покровськ, Україна;
В. А. Святний, доктор технічних наук, професор, м. Покровськ, Україна;
С. В. Подкопаєв, доктор технічних наук, професор, м. Покровськ, Україна;
А. М. Ганжа, доктор технічних наук, професор, м. Харків, Україна;
А. В. Бойко, доктор технічних наук, професор, м. Харків, Україна;
Ю. М. Веприк, доктор технічних наук, професор, м. Харків, Україна;
П. П. Говоров, доктор технічних наук, професор, м. Харків, Україна;
М. В. Гребченко, доктор технічних наук, професор, м. Київ, Україна;
І. В. Жежеленко, доктор технічних наук, професор, м. Маріуполь, Україна;
П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор, м. Вінниця, Україна;
Ю. Л. Саєнко, доктор технічних наук, професор, м. Маріуполь, Україна;
О. І. Толочко, доктор технічних наук, професор, м. Київ, Україна;
О. П. Чорний, доктор технічних наук, професор, м. Кременчук, Україна;
О. О. Шавьолкін, доктор технічних наук, професор, м. Київ, Україна;
П. Енафф, доктор технічних наук, м. Сержі-Понтуаз, Франція;
О. С. Яндульський, доктор технічних наук, професор, м. Київ, Україна.

Збірник зареєстрований в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ 7373 від 03.06.2003.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України від 13.03.2017 № 374).

ЗМІСТ

Пугачёва Т.Н., Кошельник А.В., Круглякова О.В. ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РОТОРОВ ДЛИТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ	5
Шейна Г.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЇЇ УПРАВЛІННЯ.....	12
Колларов О.Ю., Скрипник С.О. АНАЛІЗ ПОВІТРЯНИХ ВІТРОВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	17
Остренко Д.О., Колларов О.Ю. РОЗРОБКА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МРРТ КОНТРОЛЕРА.....	23
Гармаш Є.В., Колларов О.Ю. АНАЛІЗ РОБОТИ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ПРИ НОМІНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРАХ.....	28
Скрипник С.О., Шейна Г.О. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕХОДУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ НА НАПРУГУ 20 КВ.....	32
Штепа О.А., Любименко О.М. ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ВІТРАТ ЕНЕРГОНОСІВ.....	36
Жук Б.О., Кирик В.В. АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ ВИМИКАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ.....	40
Сивокобиленко В.Ф., Нікіфоров А.П. РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 1. СИНТЕЗ	47
Сивокобиленко В.Ф., Нікіфоров А.П. РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 2. МОДЕЛЮВАННЯ.....	57
Остренко Д.О., Колларов О.Ю. ВИБІР ТА РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ЗАДЛЯ ПОШУКУ ЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОКОЛЕСА.....	63
Сивокобиленко В.Ф., Лисенко В.А. ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	68
Нємцев Е. М. МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATHCAD	75

CONTENTS

Pugachova T. N., Koshelnik A.V, Kruglyakova O.V. Influence on the durability of work of high-temperature rotors of long-term static strength and low cycle fatigue	5
Sheina G. Research of an electrical network elements models for automation of its management.....	12
Kollarov O., Skrypnyk S. Analysis of air wind turbines for electric power generation.....	17
Ostrenko D., Kollarov O. Development of a neural network with the characteristics of MPPT controller	23
Harmash E., Kollarov O. Analysis of the operation of the steam turbine at rated parameters.	28
Sheina A., Skrypnyk S. Analysis of the possibility of switching the Ukrainian electricity network to a voltage of 20 Kv	32
Shtepa A.A., Lyubimenko E.N. The substantiation of the energy monitoring automated system structure	36
Zhuk B., Kyryk V. Analysis of emergency disconnections of main power lines.	40
Syvokobylenko V.F., Nikiforov A.P. Development of generalized equivalent scheme of the morphological level of recognition of transient processes in the distribution smart-grid. Part 1.....	47
Syvokobylenko V.F., Nikiforov A.P. Development of generalized equivalent scheme of the morphological level of recognition of transient processes in the distribution smart-grid. Part 2.....	57
Ostrenko D., Kollarov O. Selection and development of neural network architecture for finding the maximum mechanical power of the propeller.	63
Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Use of the Fourie transform algorithm for improving phase to the earth fault protection in distribution electric networks.	68
Niemtsev E. Model of asynchronous motors with a short-cooled rotor in Mathcad software.....	75

УДК 621.165:539.4

Т.Н. ПУГАЧЁВА (канд. техн. наук, доц.), **А.В. КОШЕЛЬНИК** (канд. техн. наук, доц.),
О.В. КРУГЛЯКОВА (канд. техн. наук, доц.)

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
tatpch@ukr.net

ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РОТОРОВ ДЛИТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Рассмотрены вопросы влияния на работоспособность и ресурс ротора паровой турбины длительной статической прочности и малоциклового усталости. Рассмотрены вопросы, связанные с определением остаточного ресурса службы высокотемпературных роторов турбоагрегата. Проанализированные факторы, определяющие длительность надежной эксплуатации турбоустановки: исчерпание длительной пластичности из-за ползучести материала; накопление повреждений в критических зонах роторов из-за малоциклового усталости. Рассмотрены зоны ротора среднего давления с наиболее высокой вероятностью появления трещин.

Ключевые слова: *высокотемпературный ротор, ресурс, длительная прочность, малоцикловая усталость, ползучесть, упруго-пластическая деформация, пластические свойства, термонапряженное состояние, термокомпенсационные канавки.*

Постановка проблемы. В 70-е годы прошлого столетия в энергомашиностроении сделаны крупные шаги в области повышения надежности и экономичности турбоустановок. В последние 10 лет на базе широкого использования программных продуктов решались сложные задачи газодинамики пространственного потока в проточной части и уточнения механизма разрушения, в том числе с учетом ползучести металла. Динамика роста мощностей отдельных турбоагрегатов может быть проиллюстрирована тем, что каждые 10 лет происходило удвоение единичной мощности агрегатов. Для тепловых электростанций единичные мощности серийных агрегатов выросли от 100 до 500 МВт, мелкосерийных – до 800 МВт и отдельных турбин – до 1200 МВт. Такой рост мощностей турбин (при соответствующем переходе к сверхкритическим параметрам пара) привел к повышению удельных нагрузок на элементы турбоагрегатов, что обусловило необходимость решения научных и прикладных задач по обеспечению безопасности работы турбин на фоне возросшей общей напряженности деталей и узлов.

К настоящему времени значительная часть тепломеханического оборудования на тепловых электростанциях Украины выработала нормативный и продленный ресурсы. Энергоустановки, введенные в эксплуатацию 30 – 40 лет назад морально и физически устарели, возросла поврежденность элементов в зоне высоких температур, что требует дополнительных затрат на ремонты и снижает технико-экономические показатели турбоустановок. Вместе с тем значительная часть узлов и деталей, работающих в зоне умеренных температур, остаются пригодными для дальнейшей эксплуатации. Это обстоятельство делает целесообразным решение задачи по уточнению реальных сроков эксплуатации турбоагрегатов, определяемых, главным образом, длительной прочностью и малоциклового усталостью материала деталей.

Анализ предыдущих исследований. Вопросы исследования длительной прочности роторов рассмотрены в ряде работ [1-6].

В [7] на примере высокотемпературных роторов паровых турбин мощностью 200, 300 и 800 МВт представлены результаты расчета напряженного состояния в опасных зонах – с концентрацией напряжений. Определение ресурса основано на расчетной оценке исчерпания длительной прочности без учета циклических температурных деформаций.

В ряде работ [8-12], посвященных рассмотрению результатов исследования элементов конструкций роторов, характеризующихся наличием концентраторов напряжений, отмечается, что исчерпание длительной пластичности в этих элементах идет ускоренными темпами, и структурные изменения в металле здесь происходят быстрее. В результате, несмотря на некоторое снижение максимальных напряжений (из-за их перераспределения в результате ползучести), зоны со значительной концентрацией напряжений требуют специального анализа с точки зрения ресурса эксплуатации.

Формулировка цели статьи. Анализ основных факторов, влияющих на долговечность высокотемпературных роторов.

Изложение основного материала исследования. Энергоустановки, введенные в эксплуатацию 30 – 40 лет назад морально и физически устарели, возросла поврежденность элементов в зоне высоких температур, что требует дополнительных затрат на ремонты и снижает технико-экономические показатели турбоустановок.

Вместе с тем значительная часть узлов и деталей, работающих в зоне умеренных температур, остаются

пригодными для дальнейшей эксплуатации. Это обстоятельство делает целесообразным решение задачи по уточнению реальных ресурсов эксплуатации турбоагрегатов, определяемых, главным образом, длительной прочностью и малоцикловой усталостью материала деталей.

Основными факторами, определяющими истощение ресурса, являются высокотемпературная ползучесть металла и малоцикловая усталость, связанная с циклическими нагрузками в пуско-остановочных режимах. Оба эти процесса разделяются на инкубационную стадию (зарождение трещины) и стадию развития трещины. В ряде случаев преимущественно рабочие лопатки и некоторые другие детали проточной части получают эрозийное и коррозионное повреждение, степень опасности которого может быть оценена только на основе экспериментальных данных (или опыта эксплуатации) о потенциальной опасности развития трещин при таких повреждениях.

При проектировании расчетный ресурс устанавливается с учетом его истощения за счет ползучести материала в условиях длительного статического нагружения и малоцикловой (термической) усталости. В процессе работы, при необходимости, оценивается ограниченный период допустимой эксплуатации на стадии развития трещины.

Повреждение роторов паровых турбин может быть обусловлено разными причинами: наличие в металле металлургических дефектов, нарушение технологии изготовления ротора, отклонение от действующих стандартов и ошибки при проектировании, нарушение пуско-остановочных режимов и эксплуатационных инструкций, низкое качество ремонта.

Наиболее высока вероятность появления трещин в зонах концентрации напряжений. Такими зонами в роторах турбин являются ободы дисков с пазами для хвостовиков лопаток, осевой канал и термокомпенсационные канавки в зоне уплотнений, а также радиусные переходы от диска к бочке ротора. Напряженное состояние ободов дисков с Т-образными пазами зависит, в основном, от величины центробежных сил рабочих лопаток и геометрии самого паза (величины радиусов закруглений в угловых переходах).

Расчеты напряженно-деформированного состояния выполняются методом конечных элементов при упругом деформировании материала и с учетом ползучести с использованием теории старения и изохронных кривых ползучести. Максимальные значения интенсивности напряжений достигаются в верхней галтели паза. В процессе ползучести напряжения быстро релаксируют и после примерно 40 тысяч часов становятся постоянными. Деформация ползучести, наоборот, вначале быстро нарастает и примерно через 40 тысяч часов накапливается с постоянной скоростью. Основная часть диска работает при относительно невысоких напряжениях, составляющих 50–60 МПа. Зона действия напряжений, больших 100 МПа, ограничена глубиной около 10 мм от внутренней поверхности расточки ротора. Термонапряженное состояние на поверхности осевого канала изменяется в широких пределах в зависимости от особенностей переходных режимов, но напряжения здесь всегда остаются ниже предела текучести.

Для термокомпенсационных канавок термические напряжения являются определяющими, с точки зрения вероятности появления трещин, но эта зона не лимитирует ресурс турбин, работающих в базовом режиме.

Полный ресурс ротора складывается из времени до зарождения трещины и времени ее распространения до критического размера. Моменту зарождения трещины соответствует достижение расчетной повреждаемости, равной единице. В зоне обода диска и осевого канала определяющими являются напряжения от центробежных сил, изменяющиеся во времени вследствие ползучести. Циклические действующие напряжения для той и другой зоны ниже предела текучести и повреждаемость здесь невелика.

За момент разрушения принимается время, когда коэффициент интенсивности или раскрытие трещины достигает критических значений. Рост трещины является следствием действия как стационарных, так и циклических напряжений. Для ободов и осевого канала циклические напряжения ниже предела текучести, их влиянием можно пренебречь только на стадии до зарождения трещин, а в стадии роста они оказывают существенное влияние.

В качестве основной независимой переменной, используемой в критерии прочности при малоцикловом нагружении выбирается величина амплитуды полных упруго-пластических деформаций ($\varepsilon_d = \Delta\varepsilon_i/2$), а в критерии прочности при статическом нагружении – интенсивность напряжений (σ_i).

За минимальное значение интенсивности деформации в цикле ($\varepsilon_i^{\min}$) принимается ее упруго-пластическое значение при пуске (ε_i^p), а за максимальное ($\varepsilon_i^{\max}$) – величина интенсивности деформации на стационарном режиме (ε_i^{cm}).

Следовательно, амплитуда интенсивности деформаций

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_i^{\max} - \varepsilon_i^{\min}}{2} = \frac{\varepsilon_i^{cm} - \varepsilon_i^p}{2}.$$

Таким образом, каждый цикл состоит из прямого нагружения – пуска и обратного нагружения – разгрузки с выходом на стационарный режим; значение ε_i^p получается из рассмотрения прямого нагружения, ε_i^{cm} и σ_i^{cm} – обратного.

Если при прямом нагружении уравнение кривой деформирования

$$\bar{\sigma}_i = f(\bar{\varepsilon}_i),$$

то при обратном нагружении в соответствии с принципом Мазинга диаграмма строится по уравнению

$$\bar{\sigma}_i = 2 \cdot f(\bar{\varepsilon}_i/2),$$

из точки, характеризующей пуск и начало разгрузки.

При прямом нагружении, т.е. при пуске, значения $\bar{\sigma}_i^p$, $\bar{\varepsilon}_i^p$ определяются по формуле

$$\bar{\sigma}_i^p \cdot \bar{\varepsilon}_i^p = \bar{\sigma}_i^e \cdot \bar{\varepsilon}_i^e,$$

где $\bar{\sigma}_i^e = \frac{\sigma_i^e}{\sigma_{0,2}^t}$, $\bar{\varepsilon}_i^e = \frac{2 \cdot (1 + \nu) \cdot \sigma_i^e}{3 \cdot E_t \cdot \varepsilon_{0,2}^t}$ - относительные интенсивности упругих напряжений и деформаций при пуске.

При обратном нагружении, т.е. на стационарном режиме, если имеет место упруго-пластическое деформирование, значение $\bar{\sigma}_i^{cm}$ и $\bar{\varepsilon}_i^{cm}$ могут быть определены из уравнения

$$(\bar{\sigma}_i^{cm} - \bar{\sigma}_i^p) \cdot (\bar{\varepsilon}_i^{cm} - \bar{\varepsilon}_i^p) = (\bar{\sigma}_i^e - \bar{\sigma}_i^{ecm}) \cdot (\bar{\varepsilon}_i^e - \bar{\varepsilon}_i^{ecm})$$

где $\bar{\sigma}_i^{ecc} = \frac{\sigma_i^{ecc}}{\sigma_{0,2}^t}$, $\bar{\varepsilon}_i^e - \bar{\varepsilon}_i^{ecm} = \frac{(\bar{\sigma}_i^e - \bar{\sigma}_i^{ecm}) \cdot 2 \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot E_t \cdot \varepsilon_{0,2}^t}$ - относительные интенсивности упругих

напряжений и деформаций на стационарном режиме.

Оценка малоциклового усталости проводится в критических зонах узлов, подверженных воздействию термических напряжений из-за теплосмен при переменных режимах. Количество циклов лимитируется в зависимости от их категории (характера распределения температур, скорости прогрева, качества материала). При превышении ресурса эксплуатации вдвое и более, против расчетного, количество циклов теплосмен должно также возрастать, как минимум, вдвое. В действительности турбоагрегаты, которые проектировались для несения базовой нагрузки, широко используются для работы в переменной части графика нагрузки, что еще более увеличивает количество циклов. Таким образом, появление трещин от малоциклового усталости при достижении наработки турбоагрегатами $2 \cdot 10^5$ часов и, в отдельных случаях меньше, вполне закономерно.

Главной особенностью вопроса об остаточном ресурсе высокотемпературных роторов является накопление в металле из-за ползучести необратимой остаточной деформации со снижением его пластических свойств.

В зависимости от условий эксплуатации основными факторами, лимитирующими безаварийную работу конструкции при длительном нагружении, могут быть предельные деформации или разрушающие напряжения. Так ползучесть некоторых деталей турбины, например дисков и рабочих лопаток, может привести к исчерпанию конструктивных зазоров и выходу турбины из строя. В данном случае потеря несущей способности связана не только с нарушением сопряженности деталей, но и с уровнем напряжений, приводящих к ускоренной ползучести и исчерпанию длительной прочности материала. В качестве критериев предельного состояния для конструкции должны устанавливаться величины деформации ползучести и длительной прочности. Величина ползучести зависит от действующего напряжения, является одной из основных расчетных характеристик и определяется с помощью кривых ползучести или изохронных кривых.

Имеется достаточно много путей для описания эмпирических кривых ползучести в математической форме. Большая часть таких описаний исходит из разделения явления ползучести на две составляющие: одна уменьшается со временем (разупрочнение), а другая идет непрерывно с постоянной скоростью и представляет собой явление, которое иногда называют квазивязким течением.

Выражение деформации при ползучести, в этом случае, представляется в виде арифметической суммы некоторого числа отдельных составляющих не связанных прямо между собой:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4, \quad (1)$$

где ε_1 – мгновенное растяжение;

ε_2 – некоторая функция времени t , например $\propto t^n$, где $n < 1$;

ε_3 – линейная функция времени;

ε_4 – некоторая функция, например $\propto t^m$ ($m > 1$), описывающая третью стадию ползучести.

Большинство уравнений, предложенных различными авторами, представляет собой попытку выразить зависимость деформации от времени при постоянных температуре и напряжениях. Ясно, что любые предложенные зависимости могут быть корректными только для условий и материалов корреспондирующим проведенным испытаниям, поскольку совокупное значение параметров, определяющее деформацию ползучести ε , может быть установлено только опытным путем.

Входящие в уравнение (1) зависимости описывают связь между деформацией и временем и справедливы в определенном температурном интервале.

В [2] отмечается, что при разработке методов расчета на ползучесть необходимо учитывать большой разброс экспериментальных данных по характеристикам ползучести. Так, что даже различие значений деформации в 20% между кривыми ползучести при одинаковых напряжениях для образцов одной партии считают приемлемым. Поэтому практически необоснованным можно считать стремление к точному аналитическому описанию кривых ползучести на всех участках кривой деформирования: аппроксимирующие зависимости должны выбираться для использования в расчетах из условия достаточной прочности на интересующих стадиях деформирования. Семейство кривых ползучести можно описать, исходя из предположения об их подобии. В этом случае деформация ползучести при постоянной температуре может быть представлена в следующем виде

$$\varepsilon = f(\sigma) \cdot \varphi(t). \quad (2)$$

Гипотеза подобия, как правило, подтверждается в узком диапазоне напряжений на первой стадии ползучести. Подобие кривых ползучести на первом и втором участках наблюдается редко, а для полных кривых ползучести, включая третий участок, условие подобия при записи уравнения ползучести в виде (2) вообще не выполняется.

Подобие процессов на различных стадиях направленного пластического деформирования может быть описано, если зависимость между деформацией ползучести, напряжением и временем представлена в виде изохронных кривых, построенных в координатах «напряжение - деформация». Для их построения используются точки, полученные из традиционных кривых ползучести, построенных в координатах «деформация - время». Точки, полученные в пересечении кривых ползучести для разных значений напряжений с линиями, перпендикулярными оси «время», определяют пары значений σ и ε для различных значений t . Совокупность таких точек определяют кривую «напряжение - деформация» (для каждого момента времени t_i), которая является изохронной кривой ползучести.

В современных анализах поведения конструкций, работающих при высоких температурах и напряжениях, используются, в зависимости от особенностей условий работы, ресурса эксплуатации и служебных целей, механические теории ползучести, к которым относятся: теория установившейся ползучести, теория старения, течения, упрочнения и наследственная теория ползучести.

Основная особенность теории старения заключается в том, что напряжения, деформация и время для семейства кривых ползучести при постоянной температуре связаны конечной зависимостью вида

$$\varepsilon = f(\sigma, t).$$

В любой момент нагружения деформация определяется напряжениями и временем. Эта основная предпосылка теории старения подтверждается экспериментально при постоянных условиях нагружения. Достоинством теории старения является простота – при ее использовании нет необходимости обеспечивать аналитическую аппроксимацию функции $f(\sigma, t)$, можно при расчетах непосредственно применять кривые ползучести в координатах «деформация – время» или изохронные кривые ползучести, сам метод построения которых предполагает следование материала теории старения.

Если конструкция работает в условиях повышенных температур, то время становится одним из факторов, обуславливающих образование предельных состояний. Это является следствием постепенного изменения механических свойств материала и перераспределения деформаций и напряжений в детали в результате ползучести. В деталях, находящихся под длительным статическим нагружением, предельное состояние определяется той стадией пребывания под нагрузкой, когда в результате перераспределения и накопления деформаций в зоне наибольшей напряженности возникают трещины длительного статического разрушения. Расчет соответствующих усилий и времен основывают на решении задач ползучести, позволяющих определить накопление деформаций в зонах их концентрации и использовать критерии длительного статического разрушения, т.е. образования трещины замедленного хрупкого разрушения.

Исходя из условий работы высокотемпературных деталей и узлов, первое место в сумме факторов, определяющих длительность надежной эксплуатации, отводится ползучести и длительной прочности. Известную роль здесь играет то обстоятельство, что на многоцикловую и малоцикловую усталость можно повлиять конструктивными и режимными мерами, а ползучесть при регламентированных давлении и температуре и воздействии силовых факторов приводит к накоплению необратимой деформации в течение всего рабочего времени турбин.

Обычно при проектировании принимают величину деформации ползучести в интервале от 0,3% до 1%. Эта величина определяет напряжение, обуславливающее принятую деформацию за назначенный срок службы. Чем меньше назначена деформация, тем ниже соответствующее ей напряжение, называемое пределом ползучести. Вместе с тем предел длительной прочности при назначенном сроке службы и величине деформации 1% превышает предел ползучести, как правило, в 1,6 раза. Таким образом, чем ниже назначена суммарная деформация за срок службы, тем больше запас напряжений по отношению к длительной прочности. При принятой максимально допустимой деформации ползучести не более 1%, обеспечивается нормативный запас по отношению к длительной прочности.

Длительная прочность и ползучесть определяются испытаниями образцов. К началу строительства турбин на сверхкритические параметры данные по длительным характеристикам имелись на базе испытаний $4 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^4$ часов, поэтому, при определении расчетного срока службы пользовались экстраполяцией, основываясь на относительно малой временной базе. Естественная осторожность привела к некоторому занижению экстраполированных значений пределов длительной прочности и образованию дополнительного запаса. Образовавшийся дополнительный (скрытый) запас по пределу длительной прочности, который не следует рассматривать как сознательно заложенный в конструкцию, обусловил замедление процесса охрупчивания металла и, таким образом, снижение опасности более раннего появления критических трещин – основных факторов разрушения детали из-за истощения ресурса.

Выводы. Ползучесть металла и малоцикловая усталость являются основными факторами, определяющими длительность работы высокотемпературных роторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борздыка А.М. Методы горячих механических испытаний металлов / А.М. Борздыка. – М.: Металлургиздат, 1962. – 488 с.
2. Прочность паровых турбин: [моногр.] / Л. А. Шубенко-Шубин и др. ; под ред. Л.А. Шубенко-Шубина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
3. Розенблюм В.И. К расчету ползучести цельнокованных роторов / В.И. Розенблюм // Энергомашиностроение. – 1964. – № 8. – С. 15-18.
4. Розенблюм В.И. Время до разрушения вращающегося диска в условиях ползучести / В.И. Розенблюм // Прикладная математика и механика. – 1957. – Т. 21, вып. 3.
5. Жирицкий Г.С. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин / Г.С. Жирицкий, В.А. Струнkin. – М.: Машиностроение, 1968. – 520 с.
6. Прочность элементов паровых турбин. / под ред. Л.А. Шубенко-Шубина. –М.; К.: ГНТИ машиностроит. лит-ры, 1962. – 568 с.
7. Костюк А.Г. Прочность цельнокованных роторов турбин мощностью 200, 300 и 800 МВт производства ЛМЗ при длительном статическом нагружении / А.Г. Костюк, А.Д. Трухний // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 45-52.
8. Костюк А.Г. Длительная прочность роторов паровых турбин в зоне концентрации напряжений / А.Г. Костюк // Теплоэнергетика. – 2006. – № 10. – С. 9-15.
9. Мустафин И.Г. Оценка длительной прочности элементов роторов паровых турбин / И.Г. Мустафин // Теплоэнергетика. – 1998. – № 3. – С. 56-60.
10. Костюк А.Г. О прочности цельнокованных роторов при нестационарных тепловых режимах / А.Г. Костюк, А.Д. Трухний, В.Н. Мичулин // Теплоэнергетика. – 1974. – № 8. – С. 73-76.
11. Мустафин И.Г. О концентрации напряжений и деформаций в пластической области и при ползучести / И.Г. Мустафин // Машиноведение. – 1975. – №5. – С. 15-20.
12. Мустафин И.Г. Критерий длительного разрушения роторных элементов и деталей с концентраторами напряжений/ И.Г. Мустафин // Труды ЦКТИ. – 1987. – Вып. 237. – С. 42-51.

REFERENCES

1. Borzdyika A.M., (1962), *Metody goryachih mekhanicheskikh ispytaniy metallov*, Metallurgizdat.
2. L. A. Shubenko-Shubin i dr., (1973), *Prochnost parovyih turbin: [monogr.]*, Mashinostroyeniye, Moscow.
3. Rozenblyum V.I., (1964), "K raschetu polzuchesti tselnokovanyih rotorov", *Energomashinostroyeniye*, no. 8, pp. 15-18.
4. Rozenblyum V.I., (1957), "Vremya do razrusheniya vraschayuschegosya diska v usloviyah polzuchesti", *Prikladnaya matematika i mehanika*, T. 21, vyip. 3.
5. Zhiritskiy G.S., (1968), *Konstruktsiya i raschet na prochnost detaley parovyih i gazovyih turbin*, Mashinostroyeniye, Moscow.
6. L.A. Shubenko-Shubina, (1962), *Prochnost elementov parovyih turbin. ,GN TI mashinostroyit. lit-ryi*, Moscow.
7. Kostyuk A.G. A.D. Truhniy, (2004), *Prochnost tselnokovanyih rotorov turbin moschnostyu 200, 300 i 800 MVt proizvodstva LMZ pri dlitelnom staticheskom nagruzhenii*, *Teploenergetika*, no. 10, pp. 45-52.
8. Kostyuk A.G., (2006), *Dlitelnaya prochnost rotorov parovyih turbin v zone kontsentratsii napryazheniy*, *Teploenergetika*, no. 10, pp.. 9-15.
9. Mustafin I.G., (1998), *Otsenka dlitelnoy prochnosti elementov rotorov parovyih turbin*, *Teploenergetika*, no. 3, pp.. 56-60.
10. Kostyuk A.G., Truhniy A.D., Michulin V.N., (1974) *O prochnosti tselnokovanyih rotorov pri nestatsionarnyih teplovyih rezhimakh*, *Teploenergetika*, no. 8, pp.. 73-76.
11. Mustafin I.G., (1975), *O kontsentratsii napryazheniy i deformatsiy v plasticheskoy oblasti i pri polzuchesti*, *Mashinovedeniye*, no. 5, pp. 15-20.

12. Mustafin I.G., (1987), Kriteriy dlitel'nogo razrusheniya rotornykh elementov i detaley s kontsentratorami napryazheniy, *Trudy TsKTI*, no. 237, pp. 42-51.

Поступила в редколлегию 02.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

T. N. PUGACHOVA, A.V. KOSHEL'NYK, O.V. KRUGLYAKOVA
National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

Influence on the durability of work of high-temperature rotors of long-term static strength and low cycle fatigue. A significant part of heat and mechanical equipment at Ukrainian thermal power plants has reached the end of normative and extended operating life. The power plants were commissioned 30-40 years ago and now appear to be obsolete morally and physically. The damage of the elements has increased in the zone of high temperatures and this reduces the technical and economic indicators of turbo-installations and requires additional costs for its repairing. Meanwhile a significant part of the nodes and parts that operate in the zone of moderate temperature remains suitable for further operation. It is necessary to identify the effect of long-term durability and low cycle fatigue on the operation of steam turbine rotors.

Design operating life is established taking into account the creep of the material under prolonged static loading and low cycle (thermal) fatigue. The limited period of permissible operation at the stage of fracture development is evaluated during operation, if necessary.

The probability of cracks in the stress concentration zones is the highest. Such zones in the turbine rotors appear to be the rims of the discs with slots for shank blades, axial channel and thermal grooves in the seals area, radius transitions from the disk to the rotor body.

The thermal stresses for thermal grooves are critical in terms of the probability of cracking, but this zone does not limit the service life of turbines that operate in the base mode.

The assessment of low cycle fatigue is carried out in critical zones of the nodes, which are exposed to thermal stresses due to thermal cycling under variable-load operation. It is typical that fractures due to low cycle fatigue appear after the turbine units achieve a working time of $2 \cdot 10^5$ hours and even less, in some cases.

Accumulated irreversible residual deformation in metal due to the creep and thus a metal plastic property decrease is the main feature of the problem of high-temperature rotors operating life.

The main factors that limit the failure-free operation of the structure during long-term loading are limiting deformations or destructive stresses depending on the operating conditions. The design creep deformation usually lays within 0,3-1 %. The lower service life total deformation assigned, the bigger is the stress margin with respect to long-term strength. Normative reserve with respect to long-term strength is ensured if the accepted maximum permissible deformation of creep is no more than 1%.

Metal creep and low cyclic fatigue are the main factors that determine the operation time of high-temperature rotors.

Keywords: *high-temperature rotor, resource, long-term strength, low-cycle fatigue, creep, elastic-plastic deformation, plastic properties, thermo-stressed state, thermal compensation grooves.*

Т.М. ПУГАЧОВА, О.В. КОШЕЛЬНИК, О.В. КРУГЛЯКОВА
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Вплив на довговічність роботи високотемпературних роторів тривалої статичної міцності і малоциклової втоми. До теперішнього часу значна частина тепломеханічного обладнання на теплових електростанціях України виробила нормативний і продовжений ресурси. Енергоустановки, введені в експлуатацію 30 - 40 років тому морально і фізично застаріли, зросла пошкодженість елементів в зоні високих температур, що вимагає додаткових витрат на ремонти і знижує техніко-економічні показники турбоустановок. Разом з тим значна частина вузлів і деталей, що працюють в зоні помірних температур, залишаються придатними для подальшої експлуатації. Необхідно виявити вплив тривалої міцності і малоциклової втоми на роботу роторів парової турбіни.

При проектуванні розрахунковий ресурс встановлюється з урахуванням його вичерпання за рахунок повзучості матеріалу в умовах тривалого статичного навантаження і малоциклової (термічної) втоми. В процесі роботи, при необхідності, оцінюється обмежений період допустимої експлуатації на стадії розвитку тріщини.

Найбільш висока ймовірність появи тріщин в зонах концентрації напружень. Такими зонами в роторах турбін є ободи дисків з пазами для хвостовиків лопаток, осьовий канал і термокомпенсаційних канавки в зоні ущільнень, а також радіусні переходи від диска до бочки ротора.

Для термокомпенсаційних канавок термічні напруги є визначальними, з точки зору ймовірності появи тріщин, але ця зона не лімітує ресурс турбін, що працюють в базовому режимі.

Оцінка малоциклової втоми проводиться в критичних зонах вузлів, схильних до впливу термічних напружень через тепловміни при змінних режимах. Поява тріщин від малоциклової втоми при досягненні напрацювання турбоагрегатами $2 \cdot 10^5$ годин і, в окремих випадках менше, цілком закономірно.

Головною особливістю питання про тривалості роботи високотемпературних роторів є накопичення в металі через повзучості незворотної залишкової деформації зі зниженням його пластичних властивостей.

Залежно від умов експлуатації основними факторами, що лімітують безаварійну роботу конструкції при тривалому навантаженні, можуть бути граничні деформації або руйнують напрути.

Зазвичай при проектуванні приймають величину деформації повзучості в інтервалі від 0,3% до 1%. Чим нижче призначена сумарна деформація за термін служби, тим більше запас напружень по відношенню до тривалої міцності. При прийнятій максимально допустимій деформації повзучості не більше 1%, забезпечується нормативний запас по відношенню до тривалої міцності.

Повзучість металу і малоциклова втома є основними факторами, що визначають тривалість роботи високотемпературних роторів.

Ключові слова: високотемпературний ротор, ресурс, тривала міцність, малоциклова втома, повзучість, пружно-пластична деформація, пластичні властивості, термонапружений стан, термокомпенсаційні канавки.

Г. О. ШЕІНА (канд. техн. наук)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
ganna.sheina@donntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЇЇ УПРАВЛІННЯ

Розглянуто схему електричної мережі, яка включає генератор, трансформатори, що знижують та підвищують напругу, лінію електропередачі, до якої включений пристрій поздовжньої компенсації, комплексне еквівалентне навантаження, до якого входить асинхронний двигун, пристрій поперечної компенсації. Проведено математичне моделювання. Розглянута робота схеми як в режимі максимального навантаження, так і в перехідному режимі. Проаналізовано алгоритм оцінки роботи електричної мережі з позиції як мінімізації втрат потужності тобто енергозбереження, так і з позиції стійкості роботи електричної мережі. Показана ефективність залучення існуючих технічних заходів до оптимізації розподілу потоків потужностей і забезпечення оптимальних режимів.

Ключові слова: *схема електричної мережі, генератор, трансформатор, лінія електропередачі, поздовжня компенсація, поперечна компенсація, перехідний режим, стійкість роботи мережі.*

Постановка проблеми. Всі елементи електричної системи функціонально пов'язані єдністю генерування, передачі і споживання електричної енергії – електричні станції і споживачі поєднанні мережами в електроенергетичну систему. Головна вимога до електричних систем – здатність надійно забезпечувати споживача електричною енергією постійної якості у нормальному режимі. В реальних електричних системах нормальний режим абсолютно незмінним існувати не може. Причини змін режимів різні – зміна потужностей і складу навантаження (малі зміни); зміна потужностей генерації і конфігурації системи (великі зміни, такі як включення і відключення генераторів, ліній електропередач, трансформаторів, потужних підстанцій, вузлів навантаження, тощо).

Перехід від одного режиму до іншого під час нормальної роботи електричної системи – це нормальний перехідний режим реальних електричних систем. Він вимагає надійної роботи пристроїв релейного захисту, робота яких ґрунтується на докладному відображенні процесів, що можуть відбуватися в системі.

Тому необхідно мати точні математичні моделі елементів системи. Детальне відображення процесів в них найчастіше базується на диференційних рівняннях. Їх спрощення приводить до похибки моделювання. Навпаки, детальні моделі ускладнюють дослідження режимів роботи реальних електричних систем.

Аварійні перехідні режими в електричній системі виникають внаслідок або порушення режиму системи (перевантаження окремих елементів, їх автоматичне відключення, розділ системи на частини), або виходу з робочого стану обладнання системи (генераторів, трансформаторів, ліній електропередач та інше). В сучасній енергетиці України зношення основного електрообладнання енергосистем досягає високого рівня і з кожним роком його відсоток росте.

Отже актуальним є питання уточнення математичних моделей елементів мережі і алгоритмів аналізу аварійних режимів. Це дозволить підвищити точність управління процесом експлуатації електричних систем (визначення часу спрацювання реле, часу дії пристроїв протиаварійної автоматики, швидкості дії регулюючих пристроїв, швидкості підйому збудження генераторів і інше).

Мета. Розвиток енергетики України передбачає не лише будівництво нових об'єктів енергосистеми, але й раціональне управління існуючими мережами з використанням вдосконалених технічних заходів. Існуючі технічні заходи необхідно залучати до оптимізації поточного розподілу потужностей і забезпечення оптимальних режимів. Тому необхідно розвивати моделі елементів електричної мережі для автоматизації її управління.

Задачі, що підлягають вирішенню: дослідження схеми мережі за допомогою математичного моделювання, аналіз алгоритму оцінки роботи електричної мережі з позиції як мінімізація втрат потужності, так і з позиції стійкості роботи електричної мережі.

Викладення основного матеріалу дослідження. В електричній системі перехідні процеси виникають кожен раз, коли порушується баланс електричних і механічних сил. Важливо мати уявлення про те, як будуть поводитися електричні машини: як будуть змінюватися механічні та електромагнітні моменти, що діють на валах машин.

Для аналітичного вивчення перехідних процесів складається математична модель електричної системи. Складність полягає в тому, щоб скласти таку математичну модель, яка б точно відображала всі властивості реального об'єкта. І головна складність в машинах, що обертаються.

На практиці застосовують різні моделі генераторів в залежності від мети проведення розрахунків.

Система рівнянь, що достовірно і повно описує фізичні явища в синхронних генераторах – система рівнянь Парка-Горева [1], записана в осях d і q , які синхронно обертаються. Вона має наступний вид:

$$\begin{cases} u_d = R \cdot i_d + p\Psi_d - \omega\Psi_q \\ u_f = p\Psi_{fd} + R_{fd} \cdot i_{fd} \\ 0 = p\Psi_{1D} + R_{1D} \cdot i_{1D} \\ \dots \\ 0 = p\Psi_{nD} + R_{nD} \cdot i_{nD} \\ u_q = R \cdot i_q + p\Psi_q + \omega\Psi_d \\ 0 = p\Psi_{1Q} + R_{1Q} \cdot i_{1Q} \\ \dots \\ 0 = p\Psi_{mQ} + R_{mQ} \cdot i_{mQ} \end{cases} \quad (1)$$

де $\Psi_d, \Psi_{fd}, \Psi_{iD}$ – потокозчеплення по поздовжній осі симетрії ротора d для обмотки статора, обмотки збудження і i -того демпферного контуру, Ψ_q, Ψ_{jQ} – потокозчеплення по поперечній осі симетрії ротора q для обмотки статора і j -того демпферного контуру.

Для опису математичної моделі синхронних генераторів використовуються еквівалентні схеми заміщення.

Залежність між струмами і потокозчепленнями визначається видом прийнятої схеми заміщення для електричної машини і величинами індуктивностей. Якщо враховувати по одному демпферному контуру по осям симетрії ротора (рис. 1), то рівняння мають вид:

$$\begin{cases} \Psi_d = x_\sigma \cdot i_d + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_{fd} = x_{\sigma f} \cdot i_f + x_{\sigma f1D} \cdot (i_{fd} + i_{1D}) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_{1D} = x_{\sigma1D} \cdot i_{1D} + x_{\sigma f1D} \cdot (i_{fd} + i_{1D}) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{fd} + i_{1D}) \\ \Psi_q = x_\sigma \cdot i_q + x_{aq} \cdot (i_q + i_{1Q}) \\ \Psi_{1Q} = x_{\sigma1Q} \cdot i_{1Q} + x_{aq} \cdot (i_q + i_{1Q}) \end{cases} \quad (2)$$

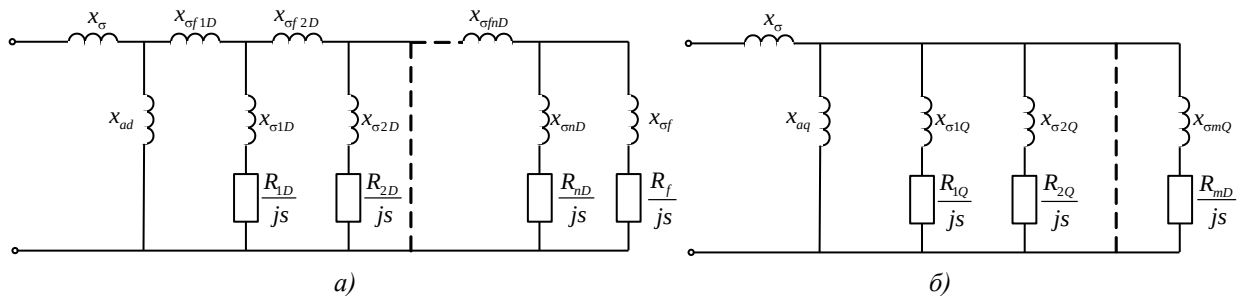


Рисунок 1 – Схеми заміщення синхронних машин за поздовжньою d і поперечною q осями симетрії ротора

Системи рівнянь (1)-(2) спрощуються в залежності від мети розрахунків [2].

Під час перехідних процесів в електричній системі проводяться спостереження зміни електрорушійних сил, струмів, напруг, потужностей, кутових швидкостей роторів та механічних моментів машин, що обертаються. Розрахунки, що дозволяють проаналізувати зміну цих величин при докладному обліку всіх елементів електричної системи, дуже складні. Тому природними є певні допущення, які дозволяють значно спростити аналіз.

Дослідження режимів електричної системи вимагає розгляду не тільки електромагнітних явищ, а й механічних явищ в її елементах: в первинних двигунах, їх автоматичних регуляторах, генераторах, двигунах навантаження, де електрична енергія знову перетворюється в механічну. Таким чином, необхідно розглядати як електричний, так і механічний стан електричної системи, тобто електромеханічні режими.

Оцінка електромеханічних процесів виконується за залежністю кута ротора $\delta = f(t)$, яка отримується з рівняння руху ротора [3]

$$P_T = P_{EM} + P_{los} + T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt}, \quad (3)$$

де: P_T – потужність турбіни, яка визначає початковий сталий режим електричної системи, P_{EM} – електромагнітна потужність генератора, P_{los} – втрати активної потужності в агрегаті, T_j – постійна інерції мас турбіни і генератора, що обертаються, δ – кут, який визначає просторове розміщення осі ротора, P_d – демпферний коефіцієнт.

Якщо знехтувати втратами в агрегаті P_{los} і демпферним коефіцієнтом P_d , що є допустимим і незначно вплине на точність розрахунків, то рівняння (3) приймає спрощений вид

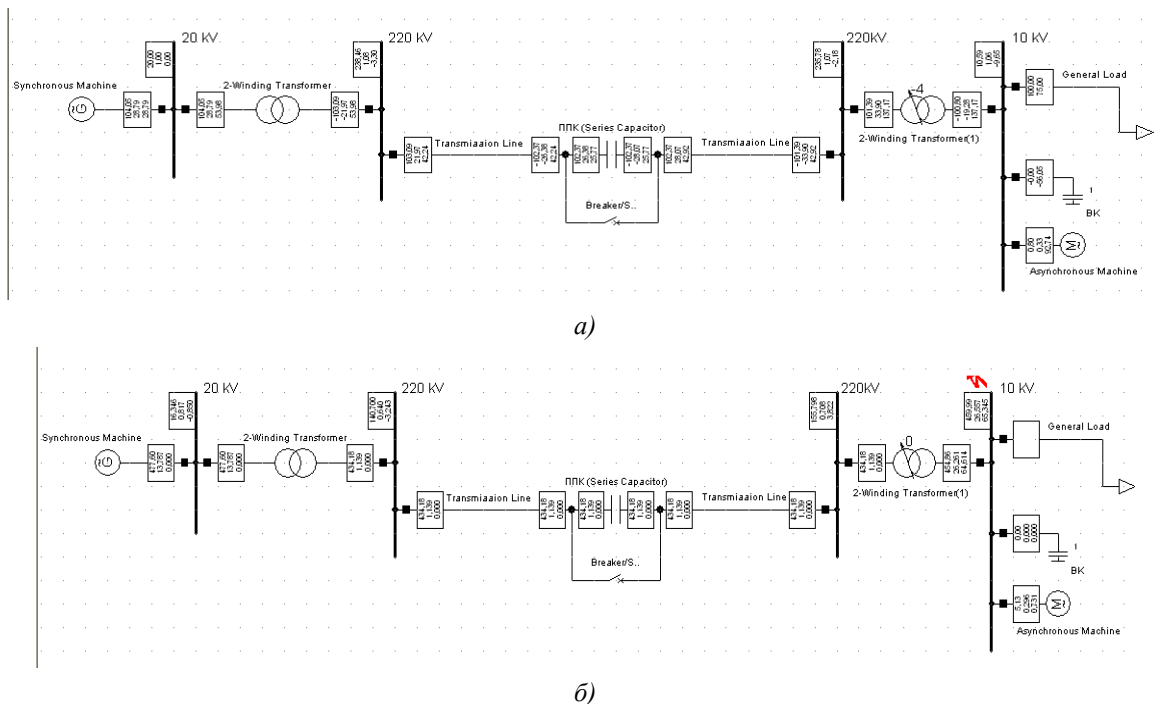
$$P_T - P_{EM} = T_j \frac{d^2\delta}{dt^2}, \quad (4)$$

$$P_T - P_{EM} = T_j \frac{d\omega}{dt} = T_j \cdot \alpha, \quad (5)$$

де: $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ – кутова швидкість, $\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2}$ – кутове прискорення мас, що обертаються, $\Delta M = T_j \frac{d^2\delta}{dt^2}$ – надлишковий момент.

Найбільш універсальним методом якісного дослідження перехідних процесів є метод чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь. Недоліком є складність урахування багатомашинної системи; складнозамкнутої, розгалуженої схеми електричної мережі і інше. Тобто в разі зміні оперативної схеми необхідно повторно виконувати перетворення схем мережі. В даний час при експлуатації реальної електричної мережі або проектуванні нових енергетичних об'єктів широко використовують моделі системи у програмному забезпеченні PowerFactory. Результати розрахунку перехідних процесів у PowerFactory виконуються на основі методів Ейлера та Рунге-Кутта для чисельного розв'язування диференціальних рівнянь та точних математичних моделей елементів електроенергетичних систем.

Математичний експеримент був виконаний для простішої радіальної схеми, приведена на рис. 2.



а – для режиму максимального навантаження, б – для аварійного режиму

Рисунок 2 – Схема мережі, яка досліджується

Отримані результати. В електричній мережі, яка розглядалася, був встановлений пристрій поздовжньої компенсації (ППК), на силових трансформаторах – пристрій регулювання напруги під навантаженням (РПН). Пристрій поздовжньої компенсації встановлюється для підвищення пропускної здатності лінії електропередачі

без збільшення перетину проводів [4]. Це додаткові конденсатори включені послідовно навантаженню в кола змінного струму, в яких протікає повний струм лінії електропередачі при нормальному режимі і струм короткого замикання при аварійному режимі.

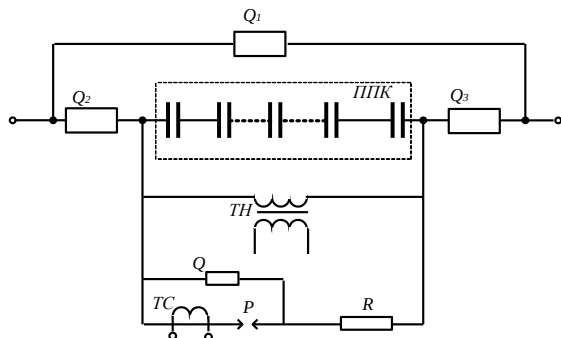


Рисунок 3 – Схема пристрою поздовжньої компенсації

Узагальнена схема ППК приведена на рис. 3. Вимикачі Q_1 , Q_2 і Q_3 необхідні для виведення ППК з роботи, проведення ремонту. Паралельно конденсаторам включений трансформатор напруги TH . Для захисту від перенапруг паралельно конденсаторам підключений обмежувальний опір R (або реактор, який обмежує струм), розрядник P , трансформатор струму TC і шунтовий вимикач Q .

Параметри генератора ТВВ-320: $P_{i\ o\ i} = 320$ МВт, $U_{i\ o\ i} = 20$ кВ, $S_{i\ o\ i} = 375$ МВА, $\cos\phi_{i\ o\ i} = 0,85$, $x_d = 1,698$. Параметри силових трансформаторів: для трансформатора, що підвищує, - $S_{i\ o\ i} = 200$ МВА,

$U_{\hat{a}\ i\ o\ i} = 242$ кВ, $U_{i\ i\ o\ i} = 20$ кВ, $u_k = 11\%$, $\Delta P_{no\ load} = 330$ кВт, $\Delta P_{cor} = 880$ кВт, $I_{no\ load} = 0,5\%$; для трансформатора, що знижує, - $S_{i\ o\ i} = 125$ МВА, $U_{\hat{a}\ i\ o\ i} = 242$ кВ, $U_{i\ i\ o\ i} = 10,5$ кВ, $u_k = 11\%$, $\Delta P_{cor} = 380$ кВт, $\Delta P_{no\ load} = 120$ кВт, $I_{no\ load} = 0,55\%$. Довжина лінії електропередачі - 70 км. Сумарне навантаження підстанції складає 100 МВт, $\cos\phi_{i\ o\ i} = 0,8$. Воно включає й асинхронні двигуни ($P_{i\ o\ i} = 800$ кВт, $\cos\phi_{i\ o\ i} = 0,9$, $\eta = 95,3\%$, число пар полюсів $2p = 2$, номінальна частота обертання $n = 1500$ об/хвил.).

У таблиці 1 наведені результати порівняння вихідного режиму і режимів роботи мережі з використання запропонованих технічних заходів. Розраховувався сталий режим (режим максимального навантаження) і перехідний режим (трифазне коротке замикання).

Таблиця 1 – Зведені результати аналізу роботи схеми мережі

	Режим без РПН і без ППК	Режим без РПН і з ППК	Режим з РПН і з ППК
Втрата напруги в лінії електропередач, %	1,73	0,98	1,22
Відхилення напруги на шинах споживачів, %	10,76	9,62	0,86
Розвантаження генераторів за реактивною потужністю, %	вихідний режим	на 8,1 %	на 44,5 %
Втрати потужності в елементах мережі, %			
P_{Total} / Q_{Total}			
P_{load} / Q_{load}	3,68 / 17,3	3,60 / 14,5	3,25 / 9,50
P_{noload} / Q_{noload}	2,76 / 26,5	2,67 / 23,81	2,30 / 18,9
	0,92 / 9,20	3,68 / -9,31	0,95 / - 9,40
Рівень струмів короткого замикання, %			
мережа 220 кВ	вихідний режим	збільшився на 14,2 %	збільшився на 14,2 %
мережа 10 кВ		збільшився на 6,1 %	збільшився на 6,1 %

Включення ППК у лінію електропередач дозволило знизити втрати напруги в мережі на 0,75 %, знизити відхилення напруги на шинах 10 кВ від бажаної напруги, яка визначається методом зустрічного управління напруги, на 1,14%. Незначно знизилася втрата активної потужності на 0,08%, але реактивної – на 2,8 %. Це дозволило розвантажити мережу від передачі реактивної потужності і, природно, розвантажити синхронні генератори на 8,1 %. Але, як і очікувалося, рівень струмів короткого замикання збільшився на шинах 220 кВ споживчої підстанції на 14,2 %, а на шинах 10 кВ – на 6,1 %. Тобто необхідно передбачати установку пристроїв обмеження струмів короткого замикання (реакторів, трансформаторів з розщепленою обмоткою низької напруги). Проте залежність кута вильоту ротора має меншу амплітуду і період згасання (рис. 4) ніж у вихідному режимі, тобто підвищується стійкість роботи електричної мережі.

Як зазначено в [4] структура сучасного протиаварійного керування є складним комплексом різноманітних пристроїв, призначеним запобігти виходу режиму роботи енергосистеми за границю області стійкості або забезпечити повернення в неї при порушенні нормального режиму. Комплекс пристроїв реалізує принцип ешелонованої оборони, суть якого така: на кожному рубежі захисту життєздатності енергосистеми вводяться в

дію все нові пристрої керування, призначенні припинити аварійний перехідний процес або хоча б зменшити його негативний вплив на енергосистему й отже, сприяти встановленню нового усталеного режиму. Так, на першому етапі виконуються дії, спрямовані на усунення збурення та послаблення його впливу на енергосистему. Це регулювання збудження, автоматичне форсування збудження тощо.

Використання пристроїв регулювання напруги під навантаженням на трансформаторах найбільш ефективний засіб забезпечення бажаної напруги на шинах споживачів. Відхилення напруги зменшилося (напруга піднялася до бажаного рівня) і не перевищує допустимого значення. Внаслідок підвищення рівня напруги на шинах 10 кВ, збільшується реактивна потужність, генерована пристроєм поперечної компенсації. Тому розвантаження синхронних генераторів складає 44,5 %. Так само залежність кута вильоту ротора має меншу амплітуду і період згасання, тобто підвищується стійкість роботи електричної мережі.

Застосування всіх технічних засобів одночасно дає максимальний ефект регулювання режимів електричної мережі і підвищення показників її функціонування.

Висновки. Розглянутий алгоритм раціонального управління електричними мережами з використанням технічних засобів (пристроїв компенсації реактивної потужності, пристроїв регулювання напруги). Оцінено роботу електричної мережі з позиції мінімізації втрат потужностей і стійкості роботи.

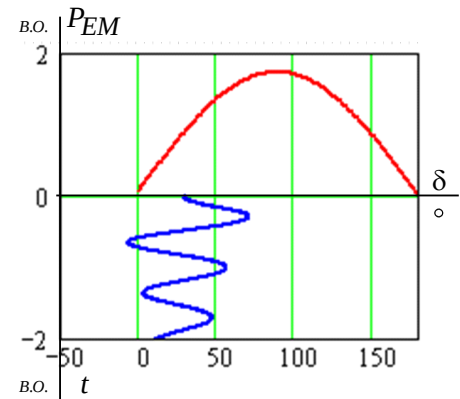


Рисунок 4 - Електромагнітна потужність P_{EM} і кут ротора δ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gonen T Modern Power System Analysis / T. Gonen // CRC Press. – 2013.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов // Л.: Энергия – 1980.
3. Kundur P. Power system stability and control./ P. Kundur // McGraw-Hill. – 1994.
4. Поспелов Г.Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, В.Т. Федин // Л.: Энергоатомиздат – 1983.
5. Букович Н.В. Протиаварійна режимна автоматика електроенергетичних систем / Н.В. Букович // Львів – 2003.

REFERENCES

1. Gonen, T (2013), Modern Power System Analysis, [Modern Power System Analysis], CRC Press, USA.
2. Vazhnov, A. (1980), Perehodnyie protsessy v mashinah peremennogo toka, [Transient Process in AC machines], Enerhiya, Leningrad.
3. Kundur, P (1994), Power system stability and control, [Power system stability and control], McGraw-Hill, USA.
4. Pospelov, G.E., Sych, N.M and Fedin, V.T. (1983), Kompensiruyuschie i reguliruyuschie ustroystva v elektricheskikh sistemah, [Compensating and regulating devices in electrical systems], Energoatomizdat, Leningrad.
5. Bukovich, N.V., (2003), Protyavariina rezhymna avtomatyka elektroenerhetychnykh system, [Anti-emergency mode automation of electric power systems], Lviv, Ukraine.

Надійшла до редколегії 05.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

G. SHEINA

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Research of an electrical network elements models for automation of its management. The scheme of the electric network, which includes the generator, the transformers, the electric transmission line, which includes the device of compensation, the complex equivalent load, which includes the asynchronous motor, the device of compensation, is considered. Mathematical modeling was carried out. The work of the scheme is considered in the mode of maximum load, and in the transition process. The algorithm of the electrical network estimation from the point of power losses minimization in steady-state regime, i.e. energy saving, and from the standpoint of the stability of the electrical network, is analyzed. The effectiveness of attracting existing technical measures to optimizing the distribution of power flows and providing optimal regimes is shown.

Key words: circuit of electric network, generator, transformer, power line, compensation, transition process, stability of network operation

УДК 621.311.161

О.Ю. КОЛЛАРОВ (канд.техн.наук.,доц.), **С.О. СКРИПНИК** (магістр)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
saveliiskrypnyk@yandex.ua

АНАЛІЗ ПОВІТРЯНИХ ВІТРОВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У статті проаналізовані інноваційні вітрогенеруючі установки, а саме повітряні види вітрогенераторів. Розглянуто детально, якою повинна бути швидкість потоку вітру для номінальної роботи генеруючого агрегату. Поданий розрахунок швидкості вітру для висоти 1000 метрів, на якій встановлюються такі літальні апарати. Наведено таблицю та графік енергетичної залежності від потоку вітру, з урахуванням його швидкості на площу поверхні, яку охоплюють лопаті вітрогенератора. Проаналізовано вітрові потоки для аеромобільної станції за допомогою програми Flow Simulation.

Ключові слова: офшорна енергетика, вітрогенератор, аеростат, потік вітру, каркас, лопаті, генерація, Flow Simulation, SolidWorks Edition.

Постановка проблеми. З розвитком електричних технологій вчені все більше замислюються про те, як генерувати, зберігати і правильно перетворити енергоресурси, які знаходяться в надрах землі: вугілля, газ, нафта, а також невичерпні джерела: сонце, вода, вітер. Промислова енергетика, яка використовує генеруючі альтернативні джерела – капіталомістка галузь. Для того, щоб «зловити» вітер, інженери-конструктори прагнуть забратися все вище. А це, в свою чергу, досить складне і ресурсно-витратне завдання. В офшорній енергетиці фундамент і монтаж технологічно обґрунтованих проєктів – це близько 30-40% капітальних витрат, а також оренда великих площ на яких знаходяться енергогенеруючі установки. Тож не дивно, що робляться численні спроби знизити капітальні витрати і, відповідно, вартість кіловат-години електроенергії, виробленої на основі сонячної і вітрової енергії.

Аналіз попередніх досліджень. Енергія вітру - безкоштовна, невичерпна, безпечна енергія. Установкою, перетворюючи енергію повітряних потоків в електричну або теплову називають вітрогенератором. Більшість сучасних вітряних установок мають порівняно низький ККД (до 30%) і високу вартість виробництва.

Також, на використання вітрогенераторів природа накладає певні обмеження. Все впирається в середню швидкість вітру в регіоні. Відомо, що початкова швидкість обертання лопотів вітрогенератора становить 2 м/с. При максимальному ККД швидкість вітряка повинна бути від 9 до 12 м/с. Вже починаючи з швидкості вітру 4 м/с установка вітрогенератора вважається доцільною.

Однак прогрес не стоїть на місці, і нові розробки піднімають ефективність вітрогенераторів, в буквальному сенсі, на нову висоту. Однією з найбільш трудомістких частин при створенні вітрової електростанції є монтаж наземних систем: щогли, генератора, ротора, лопатей. На малих висотах, біля землі, вітрові потоки не постійні, а підйом генеруючих потужностей на велику висоту робить щоглу занадто складною і дорогою конструкцією для встановлення та експлуатації [1].

Таким інноваційним напрямком є повітряна вітроенергетика, що запускає в небеса на висоти 200, 400 або навіть 1000 метрів літаючі вітряні електростанції - дирижаблі або аеростати (рис. 1, а, б), «повітряні змії» (рис. 1, д, е), дрони і інші літальні апарати, оснащені вітряними турбінами або призводять в дію наземні генератори за допомогою своїх «повідків» (рис. 1, в, г).

Літаючі вітрогенератори не вимагають фундаментів і значних транспортних витрат. При цьому вони працюють з хорошим «комерційним» вітром - на висотах в кілька сотень метрів вітер стабільніше і сильніше, такий вітер генерує більше енергії [2].

На висоті літаючі турбіни цілком можуть показати свої переваги перед наземними, адже сила вітру, як вже казалося раніше, зростає з висотою, а потужність вітряків, як вже з'ясувано на практиці, пропорційна кубу сили вітру. Це означає, що навіть при подвоєнні за рахунок висоти сили вітру літаюча турбіна може видавати в 8 разів більше потужності, ніж наземна.

Метою даної статті є аналіз ефективності встановлення вітрогенераторів на висотах від 200 до 1000 метрів за допомогою літальної техніки. В подальшому цей аналіз дозволить більш конкретно та обґрунтовано виступувати альтернативні джерела на такі комплекси як дирижаблі чи аеростати.

Викладення основного матеріалу дослідження. Так при розрахунках та аналізі оптимальної висоти отримані дані були обрані по двох параметрах: потоку вітру і довжині кабелю, тобто по масі і розривному зусиллі кабелю, щоб генеруючий пристрій міг піднятися у повітря. Загалом більшість літальних апаратів спираються на показники аеродинамічних функцій літального апарату, до якого кріпиться вітрогенератор.

Також головним елементом такого виду енергетики є його надійність та безпека. Такі джерела не тільки

екологічно чисті, а й енергоефективні.

Висота на якій знаходитиметься аеростат, повітряний змій або літак 1000 метрів. Таким чином на цій висоті швидкість вітру розраховується за формулою:

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha = 5 \cdot \left(\frac{1000}{2}\right)^{0,14} = 11,93 \cong 12 \text{ м/с}$$

де: V_0 – середня швидкість потоку вітру на території України;

H – висота на яку піднімається агрегат;

H_0 – висота замірів середньої швидкості;

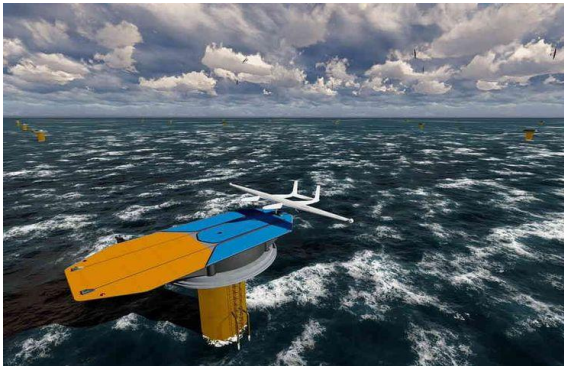
α – емпіричний показник степеня.



а



б



в



г



д



е

Рисунок 1 – Види літаючих вітрогенеруючих установок: а,б – повітряний аеростат, в,д – літак на повідку, д,е – повітряний змій

Потужність вітрогенератора при максимальному поглинанні середньорічної швидкості потоку вітру дорівнює:

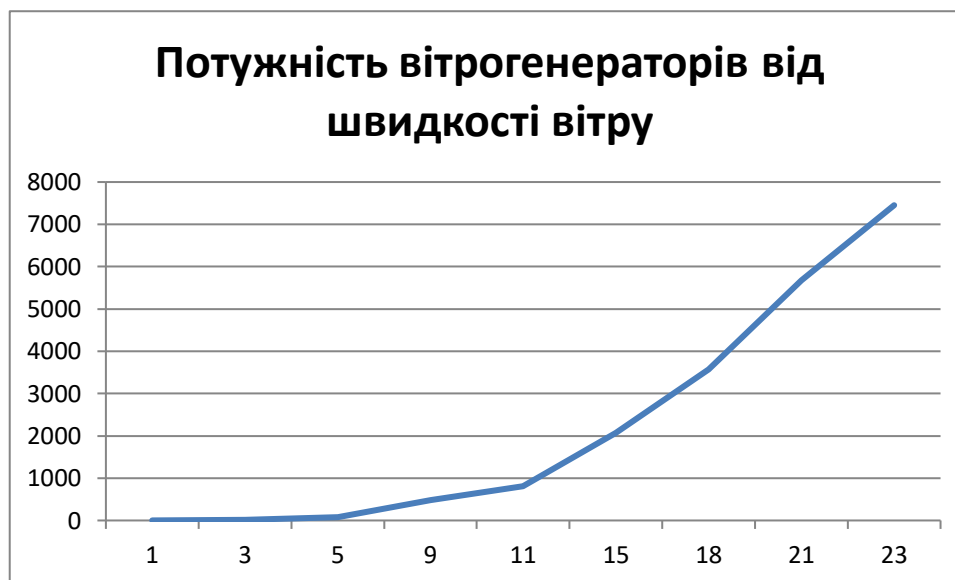
$$P_{w1} = S_G \cdot K_e \text{ кВт}$$

де S_G – площа, що описується лопатями вітрогенератора;

K_e – коефіцієнт, що враховує потужність 1 м^2 площі лопотів вітрогенератора з втратами у редукторі та генераторі (табл.1).

Таблиця 1 – Показники енергії вітру від швидкості на площу вітрогенеруючої установки

Швидкість вітру, м/с	Потужність генерації, Вт/м ²
1	1
3	17
5	77
9	477
11	815
15	2067
18	3572
21	5672
23	7452



[1] Рисунок 2 – Графік залежності енергії вітру від швидкості на площу вітрогенеруючої установки

З огляду на всі недоліки і переваги даного виду альтернативних джерел енергії, можливо розробити сонячно-вітровий повітряний комплекс (СВПК), з'єднавши сонячну і вітрову енергії таким чином, щоб такий оптимальний об'ємний літаючий об'єкт у вигляді кулі чи дирижабля з найбільшою площею для сонячних панелей при мінімальному обсязі газоподібного наповнювача, дозволить підняти кілька турбінних вітрогенераторів за допомогою сили тяги гелію [2].

Таким чином постає завдання розробити такий каркас для аеростата для того, щоб збільшити потік вітру. Наприклад зробити в центрі аеростата чи дирижабля конічну трубу, а саме з елементом конфузору для встановлення всередині труби деякої кількості вітрогенераторів.

Таких вітрогенераторів встановлено на дирижаблі два. Один знаходиться в передній частині дирижабля і має розміри лопотів 14 метрів у діаметрі, що дозволяє вловити збільшений потік вітру за рахунок конічної труби, як було сказано раніше. Другий знаходиться у задній частині, його діаметр 5 метрів. Розглядалося, також, встановлення більшої кількості вітрових установок в середину труби, але під час аналізу в програмі SolidWorks Edition 2013 в пакеті прикладних програм Flow Simulation було помітно зменшення потоку до мінімальних параметрів, що є несприятливим для встановленого там вітрогенератора. Тобто такий генератор не працював би в номінальному режимі і є не рентабельним рішенням.

Вихідні дані для моделювання в програмі SolidWorks Edition 2013 (табл.2.).

Таблиця 2 – Вихідні дані для моделювання на висоті 1000 метрів

Параметр	Числове значення
P, тиск	89885 Па
T, температура	281,65 К $\approx$ 8,5°C
V, швидкість потоку вітру	12 м/с

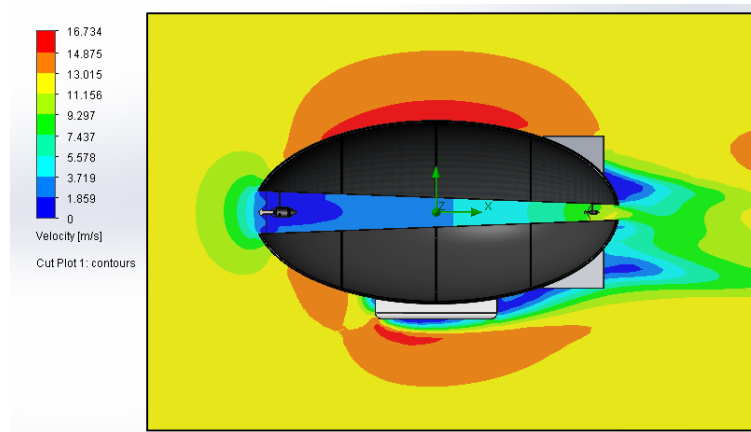


Рисунок 3 – Аналіз потоку вітру при швидкості 12 м/с

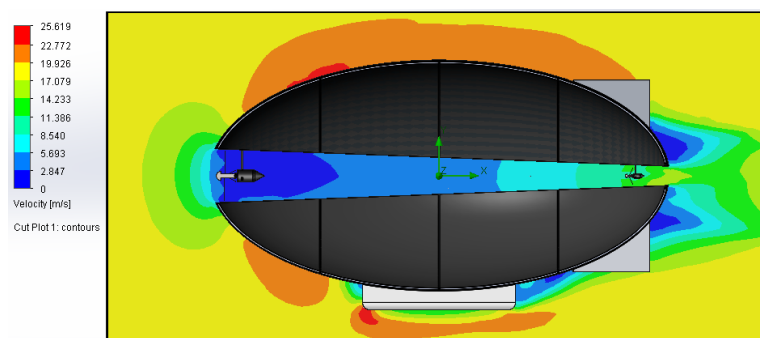


Рисунок 4 – Аналіз потоку вітру при швидкості 18 м/с

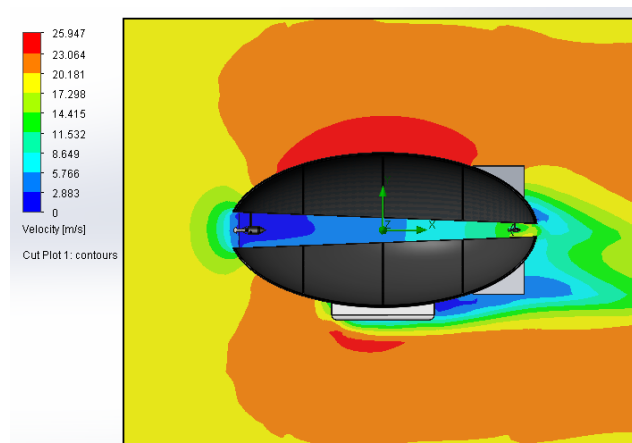


Рисунок 5 – Аналіз потоку вітру при швидкості 20 м/с

Таким чином після аналізу потоку вітрів різної швидкості (рис.3,4,5) можливо зрозуміти, яка швидкість для дирижабля є несприятливою або взагалі аварійною. Так помічаємо, що при 18 м/с потік в деяких ділянках доходить до помітки 25,6 м/с, а при 20 м/с майже до 26 м/с, тобто цей показник є межею для початку зниження дирижабля на безпечну висоту, щоб запобігти аварійній ситуації.

Докладно розглянуто експлуатацію комплексу у холодну пору року. Тому проведено аналіз температури в середині конічної труби, щоб вітрогенератори не обледеніли та не вийшли з ладу (рис.6). Температура в трубі підвищується за рахунок тертя та швидкісних вітрогенераторів, температуру в трубі та в самій оболонці

підвищується вдень за допомогою сонячного тепла, а також її можливо підтримувати за допомогою підігріву окремих ділянок гондоли, що збільшить в свою чергу підйомну силу гелія.

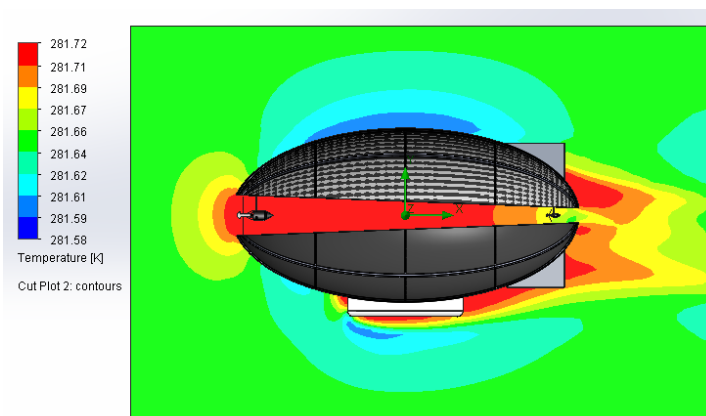


Рисунок 6 – Аналіз температури в конічній трубці

Висновки. Таким чином, після детального аналізу, такі літаючі вітроустановки нададуть змогу збільшити ККД генерації електричної енергії у декілька разів. На висоті більше 1000 метрів потоки вітру стабільніше та сильніше, тобто генерація майже постійна. Також, зменшить капітальні витрати на встановлення високих габаритних фундаментів на землі, що призведе до економії коштів. Інноваційний сонячно-вітровий повітряний комплекс є гібридною системою зі збільшеним ККД у порівнянні зі стандартними видами генеруючих систем. Такі види альтернативних джерел енергії можливо встановлювати на території України, тим самим покращити її енергоефективність і економічну незалежність в майбутньому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проектуємо електрику разом. URL: <http://vgs-design-el.blogspot.com>.
2. Алтухова Т.В., Скрипник С.А. Создание инновационной модели солнечно-ветрового воздушного комплекса для энергоснабжения промышленных предприятий. Матеріали фахового наукового журналу "Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки". – Київ: ТНУ, 2018. – Том 29 №3/2018 (68). – С.61–65.

REFERENCES

1. We design electricity together. Available at: <http://vgs-design-el.blogspot.com>.
2. Altukhova, T. V. and Skrypnyk, S. A. (2018), " Creation of an innovative model of solar-wind air complex for power supply of industrial enterprises", Materials of the professional scientific journal "Scientific notes of Tauride national University. V. I. Vernadsky. Series: technical Sciences", vol. 29, no. 3, pp. 61–65.

Надійшла до редколегії 07.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

O. KOLLAROV, S. SKRYPNYK

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Analysis of air wind turbines for electric power generation. With the development of electric technologies, scientists are increasingly thinking about how to generate, store and properly transform the energy resources that are in the bowels of the earth: coal, oil and gas, as well as renewable sources: sun, water, wind. Industrial energy is used in generating alternative sources-capital-intensive industry. In order to "catch" the wind, design engineers tend to climb higher. And this, in turn, is quite a complex and resource-intensive task. In offshore energy the Foundation and installation of technologically sound projects are about 30-40% of capital costs, as well as the lease of large areas on which power generating plants are located. The article analyzes innovative wind turbines, namely flying types of wind generators. Such an innovative direction is air wind power, which launches into the sky at a height of 200, 400 or even 1000 meters flying wind power plants-airships, balloons,"kites, drones and other aircraft equipped with wind turbines or drive ground generators with their "leashes". Sorted out in detail what should be the flow of wind speed for the nominal

operation of the generating unit. Nature imposes certain restrictions on the use of wind turbines. Everything depends on the average wind speed in the region. It is known that the initial rotation speed of the wind turbine rustles is 2 m/s. At maximum efficiency, the speed of the windmill should be from 9 to 12 m/s. Starting from the wind speed of 4 m/s, the installation of a wind turbine is considered appropriate. The presented calculation of the wind speed for the height at which such aircraft and the power of the wind generator are installed at the maximum absorption of the average annual wind flow rate. A table and a graph of the energy effect of the wind flow, taking into account its speed on the surface area covered by the blades of the wind turbine, are presented. Taking into account all the advantages and disadvantages of this type of alternative energy sources, it is possible to develop a solar-wind air complex (SWAC) connecting solar and wind energy in such a way that it can be used by optimal voluminous flying objects in the form of a ball or airship. The largest area for solar panels with a minimum volume of gaseous filler will allow to raise several-turbine wind turbines using helium traction power. Thus, after a detailed analysis, such flying wind turbines will allow to increase the efficiency of electric power generation several times. At altitudes of more than 1000 meters wind streams are more and more stable, so the generation is almost constant. It will also reduce capital costs for the installation of high overall dimensions on the ground, that will definitely save money. The innovative solar-wind air system is a hybrid system with increased efficiency, compared to standard types of generating systems. Such types of alternative energy sources may be installed on the territory of Ukraine, thereby improving its energy efficiency and economic independence in the future.

Key words: *offshore power, wind turbine, balloon, wind flow, skeleton, vane, generation, Flow Simulation, SolidWorks Edition.*

Д.О. ОСТРЕНКО, (аспірант)
О.Ю. КОЛЛАРОВ, (канд. техн. наук, доцент)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
ostrenko-dmitry2013@yandex.ua

РОЗРОБКА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МРРТ КОНТРОЛЕРА

Сьогодні існує декілька способів підтримки значення максимальної потужності. Це може бути як вже вбудовані в систему контролери за пошуком значенням потужності (або МРРТ контролери), так і окремі інтелектуальні системи (з фаззі-логікою або нейронні мережі). В роботі розглянуто приклад застосування нейронної мережі для пошуку точки максимальної потужності в системі електроживлення з відновлювальним джерелом енергії (сонячною панеллю). Нейронна мережа-двошарова (перший шар – лінійна функція, а друга – сигмоїд), в її основу покладено принцип диференціювання. Для вирішення проблеми було розглянуто процес навчання нейронної мережі, виконано її побудову в програмному пакеті Matlab.

Ключові слова: *сонячна панель, точка максимальної потужності, нейронна мережа, зворотний зв'язок, где, matlab, mppt, smart grid, вах, автономна система електроживлення, оптимізація, алгоритм.*

Мета роботи – розробити нейронну мережу, що мала б структуру контролю за потужністю в автономній системі електроживлення, з метою забезпечення її максимальної ефективності.

Навантаження на мережі централізованого електропостачання постійно збільшується, що часто призводить до їх перевантаження, аварій, економічних втрат, які виникають внаслідок погіршення якості електроенергії, а також до перерв в електропостачанні [1].

Одним з методів вирішення проблеми перевантаженості мереж є впровадження автономної системи електроживлення. Ці системи є частиною структури розподіленої генерації енергії. Принцип розподіленої генерації включає відновлювані джерела енергії (ВДЕ). В роботі джерелом енергії розглянута є сонячна панель. Генерація електричної енергії, в побудованій системі, базується на фізичних процесах, що відбуваються у напівпровідниках під дією сонячних променів.

Для ефективного застосування сонячних батарей (СБ) потрібно виконати оптимізацію отримання енергії від СБ шляхом пошуку та підтримки значення точки на кривій характеристиці потужності, яка б відповідала її максимальному значенню. Також необхідно зробити процес оптимізації режимів заряду акумуляторної батареї (АБ). Ще одним завданням, в більшості випадків, є перетворення постійного струму на змінний струм, який необхідний для використання споживачем.

Максимальне відстеження потужності МРРТ – це техніка, яка часто використовується для вітрових турбін та фотоелектричних сонячних систем, для максимізації видобутку енергії за будь-яких умов. Сучасні контролери, що застосовуються в сонячній енергетиці мають деякі недоліки зокрема: на час виміру необхідно відключити напругу живлення, що йде до споживача та заводити її на опір, проміжок між вимірами в деяких таких контролерах може доходити до чотирьох годин, а значить такі системи не зможуть швидко відреагувати на навколишні зміни.

В роботі пропонується розглянути нейронну мережу в якості пристрою для пошуку точки, що дорівнює значенню максимальної потужності.

Теорія і апарат штучних нейронних мереж (ШНМ) та нейромережових моделей (НМ) є напрямком науки і техніки, що активно розвивається. Основні перспективи їх використання пов'язані з вирішенням складних практичних завдань. У телекомунікаційних системах вони застосовуються при вирішенні таких важливих завдань: управління комутацією, адаптація, маршрутизація, управління трафіком в телекомунікаційних мережах, планування мереж рухомого радіозв'язку, оптимальний розподіл каналів в стільникових радіомережах.

Рішення будь-якої задачі з використанням ШНМ включає в себе наступні етапи:

- розробка моделі з нейронною мережою;
- формування вхідного і бажаного вихідного сигналів ШНМ;
- формування сигналу помилок і функціонала оптимізації;
- формування структури НМ, адекватної розв'язуваної задачі;
- розробка алгоритму налаштування нейронних мереж, еквівалентного процесу рішення задачі в нейромережевому логічному базисі;
- рішення задачі з використанням розробленої НМ.

В даній роботі було виконано аналіз та побудову нейронної мережі, яка відповідає принципам пошуку МРРТ. Вона здійснює диференціювання вхідних даних і потім робить пошук екстремуму (ex) в зазначених межах:

$$-0.05 \leq ex \leq 0.05$$

Загальний вигляд такої штучної нейронної мережі показано на рисунку 1. Тут вхідні сигнали позначенні векторами G та T . Ці позначення відповідають реальним значенням рівню сонячної інсоляції та температурі, що надходить на фізичну сонячну панель. Вихідною змінною є значення, що відповідає напрузі при максимальній потужності.

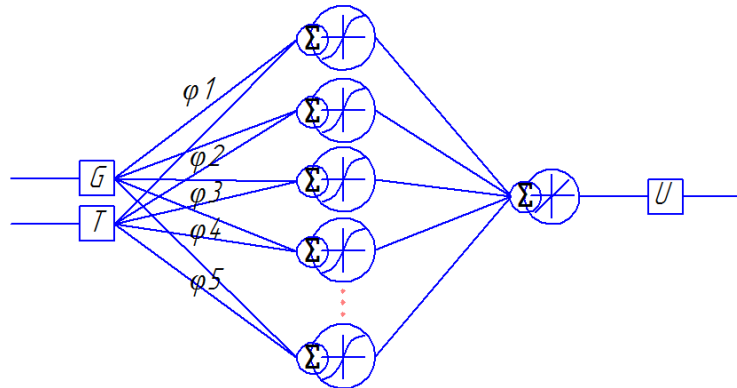


Рисунок 1 – Структурна схема мережі та деталізована схема функції активації

Велику роль в роботі нейрона відіграє функція активації. Функція активації є способом нормалізації вхідних даних. Це означає що, якщо на вході буде велике число, пропустивши його через функцію активації, вихід нормалізується у потрібному діапазоні. В даній роботі побудована нейронна мережа з використанням лінійної та сигмоїдної функції[1].

$$y = \frac{1}{1 + e^{-c \cdot s}} \quad (1)$$

Представлена мережа побудована в пакеті Matlab, шляхом написання скрипту.

У ході навчання мережі, як і в інших мережах (наприклад з зворотнім розповсюдженням помилки) на вхід мережі подається і виконується прямий прохід. Для кожного кроку часу вираховується помилка, як і у мережі з зворотнім розповсюдженням помилки. Зміна вагових коефіцієнтів вираховується для кожного нейрона мережі та потім складаються. Набори вагових значень усіх ланок мережі повинні бути однаковими.

В основу НМ було покладено багатоваріаційний перцептрон. Для того, щоб побудувати БП, необхідно обрати його параметри. Для навчання необхідно виконати вибір значення ваг та порогів навчання.

Загальний алгоритм рішення:

визначити, що вкладається в вхідний вектор – він повинен тримати в собі інформацію;

– теж саме зробити і з вихідними вектором, щоб його компоненти тримали повну відповідь на задачу;

– обрати тип функції активації;

– обрати кількість шарів та нейронів у ньому;

– завдати діапазон зміни попередньо обраних об'єктів;

– присвоїти початкові дані ваговим коефіцієнтам та параметрам, що будуть змінюватися при навчанні нейронної мережі, проте тут необхідно дотримуватися певних значень, аби не перешкоджати процесу навчання;

– провести навчання та зробити підбір параметрів мережі, при яких вона буде вирішувати завдання найкращим чином;

– провести моделювання – подати на вхід мережі умови завдання у вигляді вектору. Отримати вихідний вектор, що і буде рішенням задачі [2].

Алгоритм навчання показано на рисунку 2

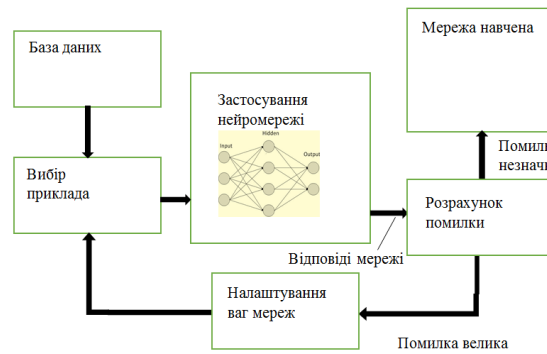


Рисунок 2 – Алгоритм навчання нейронної мережі

Однією з часто використовуваних методик покращення результатів навчання нейронної мережі є додавання до визначення функції помилки мережі так званого регулюючого параметра [3]:

$$E_S = E + \gamma \cdot \Omega,$$

де E – середньоквадратичне відхилення,

Ω – регулюючий параметр,

γ – коефіцієнт, що визначає ступінь його впливу на помилку E_S .

У ході навчання була досягнута точність, що відповідає початковим умовам та не виходить за межі 0.1 В. Зміна помилки при навчанні показана на рисунку 4.

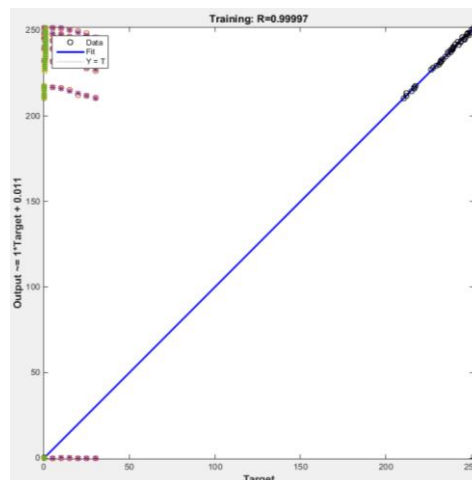


Рисунок 3 – Зміна помилки

Після побудови мережі, та аналізу результатів роботи, була побудована поверхня (рисунок 5).

(P,U,T)

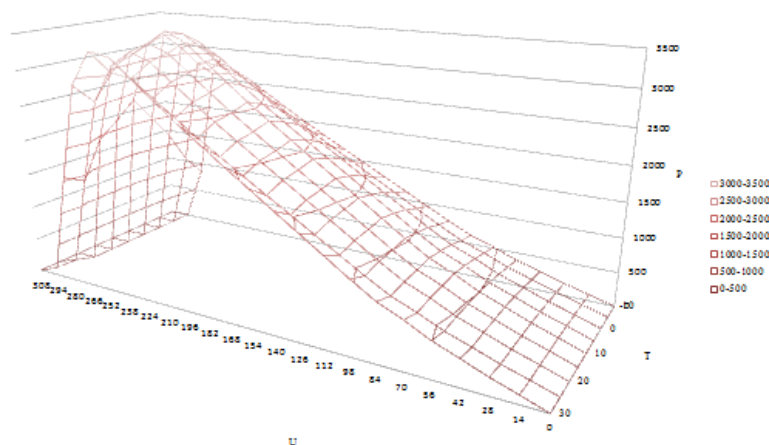


Рисунок 4 – Поверхня максимальної потужності

Побудована НМ може бути вбудована в систему, що промодельована в [4]. Для того щоб промодельовати нейронну мережу в реальному часі в Simulink, необхідно скористуватися блоком Matlab Function (рисунок 5).

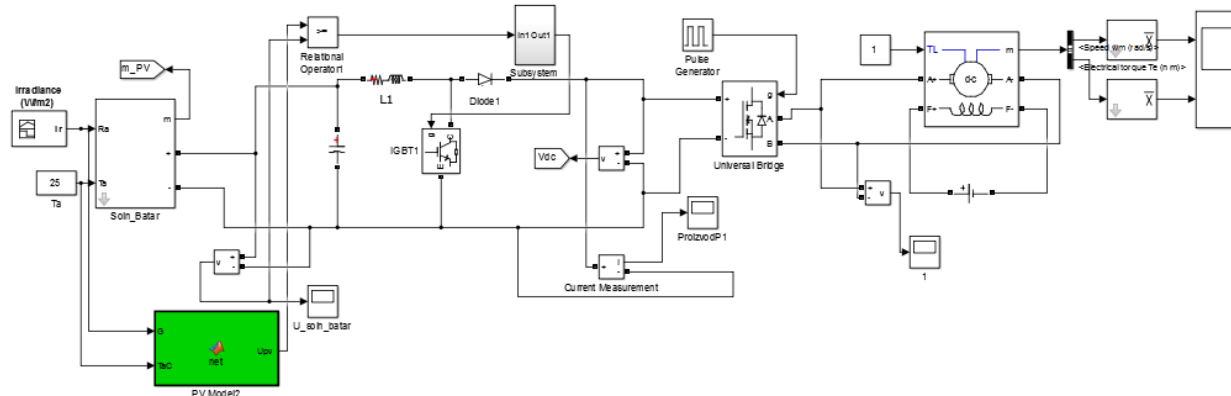


Рисунок 5 – Модель системи та вихідні результати

Висновки. В ході роботи була показана розробка нейронної мережі для контролю за потужністю в системі з ВДЕ. Це модель, яка використовує для роботи алгоритм слідування за точкою максимальної потужності.

При розробці нейронної мережі використовувався метод – в принцип, якого покладено диференціювання.

Було вирішено розглянути нейронну мережу в рамках системи розподільної генерації тому, що звичайний метод максимуму поганий тим, що вимірювання витрат підвищує невідповідність установки, також необхідно зупинити процес передачі енергії. На реальний процес також впливає помилка, внаслідок, старіння обладнання.

Метод використання нейронної мережі працює безпосередньо з пристроєм. Згодом нейронна мережа покращує властивості системи, так як вона враховує всі попередні виміри і здатна до перенавчання. У цих вимірах враховується знос решти устаткування. Даний метод є найбільш оптимальним і вигідним. Також нейронна мережа дозволяє спрогнозувати події.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Никифоров А. П. Оптимизация систем управления в smart-грид энергосетях на основе обобщения информационных потоков / А. П. Никифоров. // Сборник научных работ института электродинамики. Научно-произв. журнал «Техническая электродинамика» НАН Украины и Матер. 14 науч.- техн. конфер. «Проблемы современной электротехники ПСЕ-2016». – 2016. №5. – С. 64–66. ISSN 1607-7970. Scopus, ДАК, РИНЦ, COMPENDEX, I-Copernicus, ELibrary, EBSCO, PROQUEST.
2. Вороновський Р. К., та ін. Генетичні алгоритми, штучні нейронні мережі і проблеми віртуальної реальності / Г. К. Вороновський, К. В. Махотило, С. М. Петрашев, С. А. Сергеев.–Х.: ОСНОВА, 1997.– с. 25-38.
3. Брюхомицький Ю. А. Нейромережеві моделі для систем інформаційної безпеки. Навчальний посібник. – Таганрог: Вид-во ТРТУ, 2005. –с. 61-90.
4. Остренко Д.О., Система пошуку точки максимальної потужності(ПМП) в ВДЕ, ТАК-2017.
5. Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.І. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук-2001р. 374с.

REFERENCES

1. A. P. Nikiforov, Optimization of control systems in smart grid on the basis of generalization of information flows. // Collection of scientific works of the Institute of electrodynamics. Scientific production. journal "technical electrodynamics" of NAS of Ukraine and Mater. 14.- techne. confer. "Problems of modern electrical engineering PSE-2016". - 2016. No. 5. – Pp. 64-66. ISSN 1607-7970. Scopus, LAK, Russian science citation index, COMPENDEX, I-Copernicus, ELibrary, EBSCO, PROQUEST.
2. Voronovsky, R., et all., genetic algorithms, artificial neural networks and virtual reality problems / G. K. Voronov, K. Makhotilo, S. Petrashev, S. Sergeev.–H.: the FOUNDATION, 1997.- p. 25-38.
3. Bruhomicky Y. Neural network model to information security systems. Textbook. – Taganrog: Publishing house TRTU, 2005. - p. 61-90.
4. Ostrenko D.O. "The system of search of the point of maximum power in the RES: / Д.О. Остренко / "ТАК": telecommunications, automation, computer-integrated technologies: Sb. reports: abstracts of reports – Pokrovsk, DonNTU State University of Technology, 2017. – p. 249 - 251.
5. O. Chorniy, A. Lugoviy, D. Rodkin Modeling of Electromechanical systems. Kremenchug-2001. 374s.

D. OSTRENKO, O. KOLLAROV.

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Development of a neural network with the characteristics of MPPT controller. In our time, there are several ways to find the maximum power value. This may be already built into the system controllers search on the value of the power (or call them MPPT controllers) and a separate intellectual system (fuzzy logic or neural networks). The paper presents an example of using a neural network to find the maximum power point in the power supply network with a renewable energy source (solar panel).

It was decided to do this, because the usual method of maximum is bad because the cost measurement increases the disadvantage of the installation, also in the measurements it is necessary to stop the process of energy transfer. The real process is also affected by an error due to aging of the equipment.

The neural network method works directly with the device. Subsequently, the neuron network improves the properties of the system, as it takes into account all previous measurements and is capable of retraining. These measurements take into account the ageing of the rest of the equipment. It was concluded that this method is the most optimal and profitable. Also, the neural network allows you to predict events.

The constructed system has two input values (solar insolation level and temperature) and one output (voltage at maximum power). To solve the problem, the process of neural network training was considered, it was built in the software package Matlab.

Key words: *solar panel maximum power point, neural network, feedback, renewable energy, matlab, solar, smart grid, volt-ampere characteristics of the autonomous power supply system, optimization, algorithm, matlab.*

УДК 621.165

Є.В. Гармаш (аспірант), **О.Ю. Колларов** (канд. техн. наук, доц.),
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
Alizabet1593@gmail.com

АНАЛІЗ РОБОТИ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ПРИ НОМІНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРАХ

Для опису робочого процесу турбоустановки розглянемо конструкцію проточної частини багатоступінчастої парової турбіни конденсаційного типу. Проточна частина турбіни складається із ступенів. Залежно від напрямку потоку ступені поділять на: осьові, радіально-осьові, діагональні та інші. Так як об'єктом дослідження є турбіна, то пара рухається по поверхнях, близьких до циліндричних. Течія пари по циліндричним поверхням описується осьовими ступенями, тому далі будуть розглядатися тільки ці ступені.

Ключові слова: турбіна, ступінь, тепловий перепад, ентальпія, тиск, температура, сопло, лопатка, котел, трикутник швидкостей, циліндр, решітка, регулюючі клапани.

Постановка проблеми. В наш час у більшості промислово розвинутих країн виробництво електричної енергії, в більшості випадків, виготовляється на електричних станціях з паротурбінними установками, які працюють на органічному паливі.

Крім того, важливим елементом будь-якої теплової електростанції (ТЕС) є парова турбіна. Парова турбіна – це тепловий двигун безперервної дії, в якому потенційна енергія пари перетворюється на механічну роботу обертання ротора з подолання сил опору приводної машини (електричного генератора, живильного насоса, вентилятора).

Сьогодні, проектуванню і виготовленню турбін приділяють особливу увагу в теплоенергетиці. Виробник намагається створити агрегат, який би максимально довго працював без істотного зниження коефіцієнту корисної дії (ККД) при номінальних параметрах для різних виробничих ситуацій, але як показує практика це неможливо.

Мета работ. Розглянути проблему вибору режиму роботи турбіни, та визначити оптимальні робочі параметри для досягнення максимальної економічної ефективності. Для опису робочого процесу турбоустановки розглянемо конструкцію проточної частини багатоступінчастої парової турбіни конденсаційного типу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проточна частина турбіни складається із ступенів. Залежно від напрямку потоку ступені поділять на: осьові, радіально-осьові, діагональні та інші. Так як об'єктом дослідження є турбіна, то пара рухається по поверхнях, близьких до циліндричних. Течія пари по циліндричним поверхням описується осьовими ступенями, тому далі будуть розглядатися тільки ці ступені [1].

Раніше було зазначено, що турбіна К-200-130 ЛМЗ одновальна. Це означає, що на загальному валу насаджено ряд дисків, на периферії яких встановлені робочі лопатки. Диски розділені діафрагмами, в яких встановлюються соплові лопатки. Елемент турбіни, що складається із діафрагми і наступного диска з робочими лопатками, що утворюють робочу решітку, представляють турбінну ступінь. Діафрагми двох сусідніх ступенів утворюють камеру, в якій, розташовується робоча решітка.

В турбіні К-200-130 ЛМЗ застосовується сопловий паророзподіл. Особливістю такого паророзподілу є наявність регулюючого ступеня, який працює із змінною парціальністю при зміні пропуску пари і в цьому відношенні істотно відрізняється від подальших ступенів турбіни. Так як наявний тепловий перепад на цей ступінь відносно малий і складає $h_0^{pc} = 80 \div 120$ кДж/кг то він виконаний у вигляді одно вінцевого активного ступеня [1].

Наявний тепловий перепад турбіни, від початкового стану пари до тиску в вихлопному патрубку, розподіляється між послідовно розташованими ступенями. Таким чином, кожен ступінь переробляє лише частину загального теплового перепаду, який припадає на всю турбіну.

На рисунку 1 [2] представлений процес розширення пари в багатоступінчастій турбіні. Процес складається з послідовно протікаючих процесів окремих ступенів, причому кінцевий стан попереднього ступеня є початковим станом наступної ступені. Пар, що підводиться до турбіни, має початкову температуру t_0 і початковий тиск P_0 та енергетичний потенціал h_0 , протікає через стопорні і регулюючі клапани. Ця течія супроводжується втратами, тому тиск пари на виході з котла, перед стопорним клапаном буде на 3 – 6 % вище, ніж тиск перед сопловою решіткою регулюючої ступені. У сопловій решітці регулюючого ступеня пар розширюється, за рахунок цього швидкість при витіканні зростає. Основна частина кінетичної енергії потоку пари перетворюється в енергію обертання ротора турбіни, тому швидкість пари на виході з робочих лопаток

зменшується.

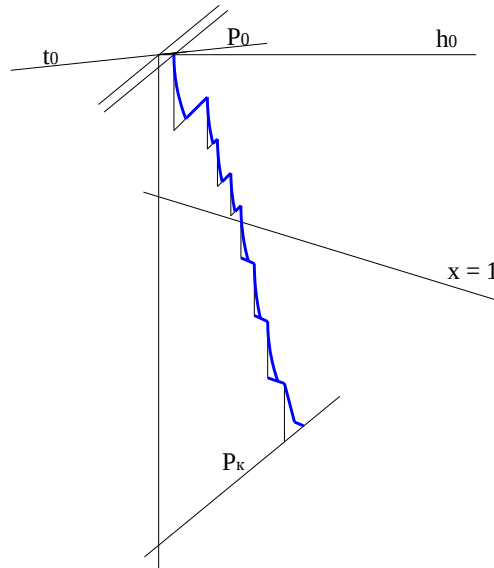


Рисунок 1 – Процес розширення пари в багатоступінчастій турбіні

Розглянемо докладно перетворення кінетичної енергії потоку пари в енергію обертання ротора турбіни на прикладі одного ступеня. [2]

Потік пари, на виході з соплової решітки має швидкість C_1 . Проходячи проміжок, що відокремлює нерухомі соплові лопатки від робочих, надходить у канали робочої решітки. При обтіканні робочої решітки пар розширюється від тиску на вході, до тиску на виході з робочих лопаток, одночасно паровий потік змінює напрямок в робочій решітці. Таким чином, потік пари передає кінетичну енергію робочим лопаткам, які обертають ротор турбіни.

Спираючись на вище зазначене можна стверджувати, що процес розширення пари триває в кожному наступному ступені, до тих пір, поки не буде досягнуто тиску за останнім ступеням P_{2z} із урахуванням втрат у вихлопному патрубку турбіни.

Також із рисунка 1 слідує, що при розширенні пари та зниженні тиску, зростає питомий об'єм, тому прохідні перетини соплових і робочих решіток збільшуються у напрямку руху пари. Через збільшення прохідних перетинів соплових і робочих решіток відповідно збільшуються діаметри ступенів і висоти лопаток.

Тепловий розрахунок турбіни виконується з метою визначення основних розмірів і характеристик проточної частини: числа і діаметрів ступенів, висот їх соплових і робочих решіток і типів профілів, ККД ступенів, окремих циліндрів або турбіни в цілому. Розрахунок проводиться для номінальних параметрів зазначених у першому розділі.

За початковим значенням тиску пари $P_0 = 13$ МПа і температури $t_0 = 540$ °С визначається стан пари перед стопорним клапаном точка A_0 , (перетин ліній P_0 і t_0). За допомогою h_s -діаграми визначається енергетичний потенціал пари $h_0 = 3443,4$ кДж/кг. Тиск пари перед соплами регулюючого ступеня з урахуванням втрат у стопорних, регулюючих клапанах і перепускних паропроводах:

$$P'_0 = P_0 \cdot (0,95 \div 0,96), \text{ МПа} \quad (1)$$

$$P'_0 = 13 \cdot 0,95 = 12,35 \text{ МПа}$$

Точка A'_0 (перетин ліній P'_0 і t_0), визначає стан пари перед соплами регулюючого ступеня. За допомогою h_s -діаграми або [3] визначається ентальпія $h'_0 = 3449,02$ кДж/кг, ентропія $s = 6,6$ кДж/кг і питомий об'єм $V'_0 = 0,028$ м³/кг.

Тиск за останнім ступеням із урахуванням втрат у вихідному патрубку:

$$P_{2z} = \left[1 + \lambda \cdot \left(\frac{C_{вп}}{100} \right)^2 \right] \cdot P_{2п}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

$$P_{2z} = \left[1 + 0,09 \cdot \left(\frac{110}{100} \right)^2 \right] \cdot 0,0037 = 0,0041 \text{ МПа},$$

де λ – коефіцієнт, що враховує аеродинамічні властивості вихлопного патрубка конденсаційної турбіни;

$P_{2п}$ – тиск в конденсаторі, МПа;

$C_{вп}$ – середня швидкість потоку у вихлопному патрубку для конденсаційних турбін, м/с.

Витрата пари на турбіну по попередньо заданому ККД (без обліку витоків через кінцеві ущільнення) визначається за формулою:

$$G = \frac{N_e^p}{H'_0 \cdot \eta_{0e}}, \text{ кг/с} \quad (3)$$

де N_e^p – розрахункове електричне навантаження, кВт;

H' – наявний тепловий перепад на проточну частину турбіни кДж/кг;

η_{0e} – відносний електричний ККД турбогенератора.

Значення відносного електричного ККД турбогенератора визначається за таблицею 1 в залежності від його потужності.

Через те, що тепловий розрахунок проводиться для навантаження

210 МВт, то $\eta_{0e} = 0,851$.

Для турбін із проміжним перегрівом пари значення тиску за ЦВТ визначається за формулою:

$$P_I = (0,15 \div 0,18) \cdot P_0, \text{ МПа} \quad (4)$$

$$P_I = 0,16 \cdot 13 = 2,08 \text{ МПа}$$

Таблиця 1 – Значення відносного електричного ККД турбогенератора

Середнє значення ККД, %	Потужність турбоагрегата, МВт				
	50	100	150	200	300
η_{0e}	81–83,5	83,5–84	84–86	84–86	84–86

Від точки A'_0 по ізоентропі $s = 6,6$ кДж/кг відкладається точка К (перетин ліній P_I і ізоентропи $s = 6,6$ кДж/кг). Значення тиску в цій точці дорівнює $P_I = 2,08$ МПа, та ентальпії $h_I = 2960,56$ кДж/кг.

Втрати тиску в проміжному пароперегрівачі і паропроводах складають від 10 до 12,5 %:

$$P_I^{\text{III}} = (0,875 \div 0,9) \cdot P_I, \text{ МПа} \quad (5)$$

$$P_I^{\text{III}} = 0,9 \cdot 2,08 = 1,87 \text{ МПа}.$$

Точка A'_I (перетин ліній P_I^{III} і t_{III}) при тиску $P_I^{\text{III}} = 1,87$ МПа, температурі $t_{\text{III}} = 540$ °С, має ентальпію $h'_I = 3555,42$ кДж/кг і ентропію $s = 7,58$ кДж/кг. Від точки A'_I по ізоентропі $s = 7,58$ кДж/кг відкладається точка В з тиском $P_{2z} = 0,0041$ МПа, ентальпією $h_{2z} = 2280$ кДж/кг. При тиску $P_{2\text{II}} = 0,0037$ МПа, ентальпія дорівнює $h_{2\text{II}} = 2265$ кДж/кг.

Втрати енергії у випускному патрубку визначають за формулою:

$$\Delta H_{\text{II}} = h_{2z} - h_{2\text{II}}, \text{ кДж/кг} \quad (6)$$

$$\Delta H_{\text{II}} = 2280 - 2265 = 15 \text{ кДж/кг}$$

Втрати енергії на клапанах:

$$\Delta H_{\text{кл}} = h'_0 - h_0, \text{ кДж/кг} \quad (7)$$

$$\Delta H_{\text{кл}} = 3449,02 - 3443,4 = 5,62 \text{ кДж/кг}$$

Формула для визначення наявного теплового перепаду на проточну частину турбіни:

$$H'_0 = H_0^I + H_0^{II}, \text{ кДж/кг} \quad (8)$$

де H_0^I – наявний тепловий перепад циліндру високого тиску, кДж/кг;

H_0^{II} – наявний тепловий перепад циліндрів середнього та низького тиску, кДж/кг.

Наявний тепловий перепад ЦВТ:

$$H_0^I = h_0^{A_0} - h_0^K, \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

$$H_0^I = 3443,4 - 2960,56 = 482,84 \text{ кДж/кг}$$

Наявний тепловий перепад ЦСТ і ЦНТ в цілому дорівнює:

$$H_0^{II} = h_0^{A'_I} - h_0^B, \text{ кДж/кг} \quad (10)$$

$$H_0^{II} = 3555,42 - 2280 = 1275,42 \text{ кДж/кг}$$

Наявний тепловий перепад на проточну частину турбіни дорівнює (формула 8):

$$H'_0 = 482,84 + 1275,42 = 1758,26 \text{ кДж/кг}$$

Витрата пари на турбіну по попередньо заданому ККД дорівнює:

$$G = \frac{210 \cdot 10^3}{1758,26 \cdot 0,851} = 140,35 \text{ кг/с}.$$

Висновки. Нормальна експлуатація парових турбін залежить від розрахунково-обґрунтованого вибору режиму роботи, при якому досягається максимальна економічна ефективність турбоустановки.

Особлива увага приділяється енергоблокам з турбінами одиничною потужністю 200 МВт, випущеним Ленінградським металічним заводом. На ТЕС України в експлуатації знаходиться 43 енергоблоки з турбінами К-200-130.

Ресурс більшості цих турбін вироблений повністю або підходить до свого завершення.

У зв'язку з продовженням ресурсу енергоблоки з турбінами потужністю 200 МВт в ряді випадків експлуатуються при параметрах і навантаженнях нижче номінальних, що призводить до підвищених витрат палива і часткової втрати потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виробнича інструкція по установці і обслуговуванні парової турбіни і допоміжного обладнання для блоку 200 МВт.
2. Занин А.И., Соколов В.С. Паровые турбины: Учебное пособие для СПТУ.–М.–Высшая шк., 1988–208 с.
3. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М: Энергоатомиздат, 1984.– 420 с.
4. Методические указания для курсового проектирования для учащихся – заочников специальности «Парогенераторные и турбинные установки тепловых электростанций». Сост. Логинов И.Г. – Иваново: ВЗЭТ, 1978.– 101с.
5. Занин А.И., Соколов В.С. Паровые турбины: Учебное пособие для СПТУ.–М.–Высшая шк., 1988–208 с.

REFERENCES

1. Production instruction for installation and maintenance of steam turbine and auxiliary equipment for 200 MW unit.
2. Zanin, A. I., Sokolov V. S. Steam turbines: a textbook for the vocational school.- M.-Higher SHK., 1988-208 S.
3. Rivkin, S. L., Alexandrov, A. A. Thermodynamic properties of water and water vapor. - M: Energoatomizdat, 1984.- 420 p.
4. Methodical instructions for course design for students of correspondence students of the speciality "Steam turbine installations of thermal power plants". Comp. Loginov I. G.-Ivanovo: VZET, 1978.- 101S.
5. Zanin, A. I., Sokolov V. S. Steam turbines: a textbook for the vocational school.- M.-Higher school., 1988-208 S.

Надійшла до редколегії 14.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленько В.Ф.

Y. HARMASH, O. KOLLAROV

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Analysis of the operation of the steam turbine at rated parameters. To describe the turbine workflow, we consider the design of the flow section of a multi-stage steam turbine of a condensing type. The turbine flow section consists of degrees. Dependencies depending on the direction of flow are divided into: axial, radial-axial, diagonal and others. Since the object of study is a turbine, the couple moves along the surface, close to cylindrical. The flow of a pair with a cylindrical surface is described by axial degrees, therefore, only these degrees will be considered further. Normal operation of steam turbines depends on a design-based choice of the mode of operation at which the maximum economic efficiency of the turbine installation is achieved. Special attention is paid to power units with turbines with a unit capacity of 200 MW, issued by the Leningrad Metal Plant. There are 43 power units with K-200-130 turbines for heat in Ukraine's power plants. The resource of most of these turbines is fully produced or is nearing completion. In connection with the extension of the life of a power unit with 200 MW turbines, in some cases, they are operated at lower rated parameters and loads, which leads to increased fuel costs and partial loss of power.

Keywords: turbine, degree, thermal differential, enthalpy, pressure, temperature, nozzle, blade, boiler, velocity triangle, cylinder, lattice, control valves.

УДК 621.311.1

С.О. СКРИПНИК (магістр), Г.О. ШЕІНА (канд.техн.наук.,доц.)

Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет»

saveliiskrypnyk@yandex.ua

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕХОДУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ НА НАПРУГУ 20 КВ

У статті проаналізовано стан електричної мережі на території України, який є на даний час незадовільним через застаріле комутаційне обладнання. В процесі дослідження встановлено ряд недоліків системи 6 (10) кВ, що призводить до великої втрати електричної енергії, яка передається на велику відстань до споживача різних категорій. Розглянуто детально, які переваги має система електропостачання з класом напруги 20 кВ. Розроблено ряд установ поетапного переходу на концепцію з номінальною напругою в 20 кВ.

Ключові слова: комутаційне устаткування, трансформатор, реновація, розподільна підстанція, уніфікація, пропускна здатність.

Постановка проблеми. Перед НКРЕКУ (Національна комісія України, що здійснює регулювання у сфері енергетики і комунальних послуг) стоїть завдання поліпшення якості послуг, що надаються з передачі та розподілу електроенергії.

Аналіз існуючих електричних мереж вказує на фізичну і моральну зношеність електрообладнання (вік деякого обладнання сягає 50-70 років). Через застарілість технічної бази українських розподільчих електричних мереж стала звичною висока втрата електроенергії. На якості передачі електроенергії кінцевому споживачу позначається і низький рівень автоматизації.

Розвиток країни і її економіки неминує призводити до зростання числа енергоємного обладнання при загальному збільшенні кількості споживачів (і як результат - навантаження на електричну мережу), яке часто досягає технічної межі існуючих мереж. Дефіцит потужності прийнято вирішувати локально. Для забезпечення електроживленням нових споживачів (багатоповерхівка, завод і т. п.) Від електростанцій (або підстанцій) прокладаються паралельно нові лінії електропередач, будуються нові розподільчі підстанції. НКРЕКУ пропонує підійти до вирішення цього завдання глобально і пропонує розглянути можливість поетапного переходу на використання класу середньої напруги 20 кВ замість повсюдно застосованих напруг 6 (10) кВ. Даний напрямок розвитку розподільних мереж вважається перспективним і необхідним для нашої країни.

Впровадження напруги 20 кВ в міські мережі (заміна старих електромереж або будівництво нових) економічно вигідне завдяки постійному збільшенню щільності навантаження в містах, посилення вимог до якості електроенергії. Застосовувати електричні мережі з напругою 20 кВ вигідно не тільки в масштабі міст. Моделювання сільських мереж на напругу 10, 20 і 35 кВ показало, що електричні мережі 10 кВ доцільні при щільності навантаження менше 60 кВт / км². Мережі з напругою 35 кВ раціонально реалізовувати, якщо зона обслуговування перевищує 25 км. Впроваджувати електричні мережі з напругою 20 кВ доцільно в наступних випадках: при щільності навантаження більше 65 кВт / км², при заміні ліній живлення 6кВ, при будівництві нових селищ [1-2].

Аналіз попередніх досліджень. Використання номінальної напруги 20 кВ є новим рівнем в заощадженні електроенергії, який дозволить підняти пропускну здатність, знизити втрати, а також збільшити надійність і безпеку використовуваних електромереж.

Якщо проаналізувати використання номінальної напруги 20 кВ в системах електропередачі, то спираючись на досвід країн, в яких вже впроваджена дана технологія, можна виділити основні її переваги над класичними для нас системами з номінальною напругою 6/10 кВ:

- Пропускна спроможність. При рівних початкових технічних умовах і умовах навколишнього середовища (перетин жил кабелю, температура навколишнього середовища і т.п.) електричні мережі з номінальною напругою в 20 кВ мають збільшену пропускну здатність електропередачі у порівнянні з напругою 6(10) кВ.

- Зниження витрат (технологічних), які використовуються на передачу електроенергії.

- Резерв потужності для споживачів.

- Зменшення довжини мереж, завдяки використанню щоголових КТП 20 / 0,4 кВ.

- Розвантаження розподільних пристроїв підстанцій, ліквідація дефіциту потужності.

- Підвищення якості електропостачання.

Метою даної статті є аналіз підвищення ефективності роботи електромереж України за рахунок переходу з класу напруги 6(10) кВ на 20 кВ.

Викладення основного матеріалу дослідження. В даний час в Україні склалося так, що в ланцюзі

«виробництво - передача - постачання - споживач» електроенергії найменше уваги приділяють розподільним електричним мережам напругою 0,4-35 кВ, що є причиною неефективної роботи і уповільнює розвиток цих мереж, призводить до прискореного їх зносу і суттєвих труднощів, щодо приєднання до них нових потужностей споживачів.

Як правило, процес переходу на концепцію з номінальною напругою в 20 кВ ділять на два види:

- реконструкція існуючих електромереж 6/10 кВ на номінальну напругу 20 кВ, що також дозволить збільшити надійність функціонування систем електропостачання;
- використання напруги 20 кВ при будівництві нових електромереж.

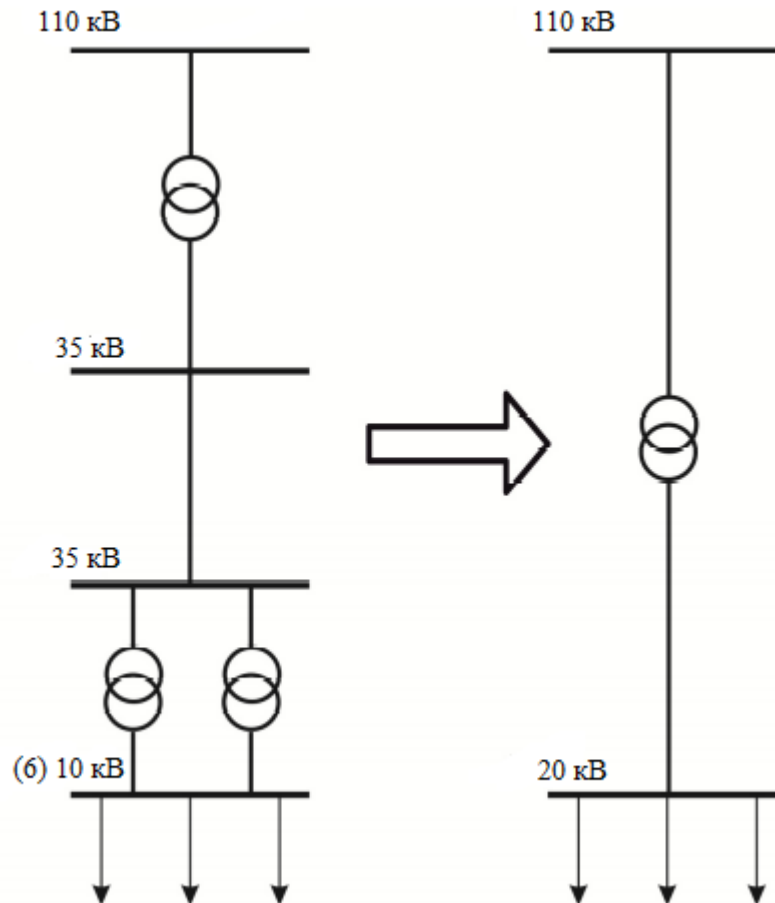


Рисунок 1 – Схема електрозабезпечення з 3-х ступеневої на 2 ступеневу.

Природно, процес переходу на номінальну напругу 20 кВ буде фінансово витратним проектом з повною реконструкцією, або заміною обладнання. Тому найбільш прийнятний варіант - це заміна обладнання, що вже відпрацювало свій нормативний термін, на нове, з великим навантаженням, а також паралельне побудова нових електромереж з напругою 20 кВ, що дозволить уникнути великих миттєвих капіталовкладень та дозволить фінансувати цей проект поетапно (рис.1) [3].

Серед країн, які вже використовують дану концепцію: Австрія, Італія, США, Німеччина, Франція, Фінляндія і багато інших. На жаль, в Україні і далі використовується розподільні мережі, напругою 6/10 кВ, для яких основні рішення були розроблені в середині минулого століття.

У будь-якому випадку, застосування успішного переходу - його грамотне техніко-економічне обґрунтування, а також прорахунок повної вартості проекту і грамотний розрахунок отриманої вигоди.

Для реалізації плану по модернізації електричних мереж зі зміною класу напруги на 20 кВ необхідно вирішити ряд завдань:

Підготовка нормативно-технічної бази.

Реконструкція живильних підстанцій 220/110 кВ (виділення резервів потужності на клас напруги 20 кВ і т. п.).

Підготовка технічної документації з економічним обґрунтуванням концепції впровадження мереж з напругою 20 кВ в рамках окремо взятого міста.

Наявність конкурентного ринку обладнання та кабельної продукції вітчизняного виробництва для побудови мереж з напругою 20 кВ.

Розглянемо проблеми, пов'язані з реалізацією четвертого завдання, від якої залежить матеріальна частина впровадження мереж 20 кВ. Електрична схема і компонування розподільного пристрою мережі 20 кВ нічим не відрізняється від мереж 6 (10) кВ (вони відносяться до мереж одного класу). Електричні мережі складаються з трьох складових частин: трансформаторна підстанція, розподільні пристрої й лінії електропередач. Силові трансформатори для головних знижувальних підстанцій (110/20 кВ і 220 / 20кВ) є в номенклатурі вітчизняних фірм, що випускають високовольтне обладнання, але не з досить широким діапазоном потужностей, як у існуючих ТП на напругу 110/6 кВ або 110/10 кВ. Необхідно використовувати досвід зарубіжних фірм для випуску необхідних трансформаторів.

Розподільний пристрій 20 кВ включає в себе високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, запобіжники, вимикачі навантаження і т. п. Високовольтні запобіжники на 20 кВ випускаються багатьма фірмами і мають номенклатуру, схожу номенклатурі запобіжників на 10 кВ, а вартість їх в два рази вище останніх. Різниця у вартості комутаційного обладнання на 20 кВ і 10 кВ становить 20-30%. Рекомендується закладати при проектуванні мережі 20 кВ елегазові або вакуумні високовольтні вимикачі.

У разі реконструкції існуючих електричних мереж 6 (10) кВ на напругу 20 кВ для розміщення трансформаторів і комутаційного устаткування можна використовувати будівлі підстанцій 6 (10) кВ. Існує можливість підібрати трансформатори на 20 кВ таким чином, щоб їх габарити були аналогічні трансформаторів 6 (10) кВ. Таким чином, без додаткових витрат можна провести заміну трансформатора. Схожа ситуація складається і при зіставленні шаф КРУ (комплектного розподільного пристрою) - металеві шафи випускають уніфікованими для класів напруги 6, 10, 20 кВ. Відмінність полягає лише в «начинці» шафи.

Для поетапного переходу на електричні мережі із середньою напругою 20 кВ необхідно проводити модернізацію існуючих мереж 6 (10) кВ, які відпрацювали свій нормативний термін. Звичайна комплексна реконструкція електричних розподільних мереж 6 (10) кВ, яка включає в себе заміну обладнання на аналоги, розраховані для системи 20 кВ.

Результати ж інвестиційної діяльності 2012 року в розподільних електричних мережах України наступні. Освоєно капіталовкладення на реновацію і розвиток розподільних електричних мереж в межах 4 млрд грн. Середня вартість, введеного в експлуатацію 1 км ліній з навантаженням, складається в межах 4 млн грн. Річний обсяг відновлення розподільних мереж становить 0,1% загальної їх кількості.

Першочерговими завданнями для впровадження цього цільового проекту є:

- напрацювання та затвердження на законодавчому рівні додаткових механізмів залучення інвестицій в реновацію і розвиток розподільних електромереж, в тому числі отримання і повернення під державні гарантії пільгових кредитних ресурсів;
- прискорене і ефективне застосування стимулюючого регулювання у сфері передачі електроенергії місцевими (локальними) електромережами;
- розробка та затвердження схем реновації та розвитку розподільних електричних мереж з обов'язковим урахуванням нових підходів до їх побудови;
- забезпечення своєчасного прийняття перспективних рішень, виготовлення високотехнологічного електрообладнання і пристроїв.

Висновки. Застосування напруги 20 кВ в електричних мережах України підвищать ефективність роботи всієї системи електропостачання, що в свою чергу зменшить втрати на передачу електричної енергії до споживачів різної категорії. Також, така концепція дозволить підвищити надійність системи енергозабезпечення та збільшити загальне навантаження електричної мережі окремих ділянок, особливо це стосується сільських районів та підприємств, що знаходяться далеко від місць розподілення енергії. Перехід з класу напруги 6 (10) кВ до 20 кВ, призведе до покращення якості напруги, що істотно підвищить енергетичну незалежність країни.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Таврида електрик Україна. URL: http://tavrida-ua.com/articles/novye_podhody_k_postroeniyu_raspredeletelnyh_elektricheskikh_setey_04-35_kv.html.
2. ЄДС інжиніринг. URL: <http://eds-ltd.com.ua/perehod-elektrosetey-6-10-kv-na-napryazhenie-20-kv/>.
3. Цыганенко Б. В. Перспективы перевода распределительных сетей Украины на номинальное напряжение 20 кВ. Наукові праці Вінницького національного технічного університету "Електроенергетика та електротехніка". – Вінниця: ВНТУ, 2016. – №1/2016.

REFERENCES

1. Tavrida Electric Ukraine. URL: http://tavrida-ua.com/articles/novye_podhody_k_postroeniyu_raspredeletelnyh_elektricheskikh_setey_04-35_kv.html.
2. EMT engineering. URL: <http://eds-ltd.com.ua/perehod-elektrosetey-6-10-kv-na-napryazhenie-20-kv/>.
3. B. Tsyganenko. (2016), "Prospects for the transfer of distribution networks of Ukraine to the rated voltage of 20 kV". Scientific notes of Vinnitsa national technical university "Electric power engineering and electrical engineering". no. 1.

Надійшла до редколегії 17.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

A. SHEINA, S. SKRYPNYK

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Analysis of the possibility of switching the Ukrainian electricity network to a voltage of 20 kV. An analysis of existing electrical networks indicates the physical and moral depreciation of electrical equipment (the age of some equipment is 50-70 years). Due to the obsolete technical base of Ukrainian distribution electrical grids, a high loss of electricity has become commonplace. The quality of the transmission of electricity to the end user is also reflected in the low level of automation.

The development of the country and its economy inevitably leads to an increase in the number of energy-intensive equipment with a general increase in the number of consumers (and as a result the load on the electricity grid), which often reaches the technical limit of existing networks. The power shortage is decided locally. To provide power to new consumers (multistory, factory, etc.). From power plants (or substations) parallel new power lines are laid, new distribution substations are being built. NERC suggests that this problem be addressed globally, and proposes to consider the possibility of a phased transition to the use of a class of average voltage of 20 kV instead of the generally applied voltage of 6 (10) kV. This direction of development of distribution networks is considered perspective and necessary for our country.

Using a nominal voltage of 20 kV is a new level in saving energy, which will increase the throughput, reduce losses, as well as increase the reliability and safety of the used power grids.

If we analyze the use of the nominal voltage of 20 kV in power transmission systems, then based on the experience of countries in which this technology has already been introduced, it is possible to distinguish its main advantages over the classical systems for us with a nominal voltage of 6/10 kV:

- Bandwidth. With equal initial technical conditions and environmental conditions (intersection of cable rods, ambient temperature, etc.), electrical networks with a rated voltage of 20 kV have an increased transmission capacity compared to a voltage of 6 (10) kV.

- Reduced costs (technological) used for electricity transmission.
- Reserve power for consumers.
- Reducing the length of the networks, due to the use of 20 / 0.4 kV MFP.
- Unloading of distribution devices of substations, elimination of power shortages.
- Improving the quality of electricity supply.

The primary tasks for implementing this target project are:

- Development and approval at the legislative level of additional mechanisms for attracting investment in renovation and development of distribution electricity grids, including obtaining and returning under the state guarantees of preferential credit resources;

- accelerated and effective application of stimulating regulation in the field of transmission of electricity by local (local) electricity grids;

- development and approval of schemes of renovation and development of distribution electric networks with due consideration of new approaches to their construction;

- ensuring timely adoption of promising solutions, manufacturing of high-tech electrical equipment and devices

The use of voltage of 20 kV in electric networks of Ukraine will increase the efficiency of the entire system of electricity supply, which in turn will reduce the losses of transmission of electricity to consumers of different categories. Also, such a concept will increase the reliability of the energy supply system and increase the overall load on the electricity network of individual sites, especially for rural areas and enterprises located far from energy distribution sites. The transition from the voltage class 6 (10) kV to 20 kV will lead to improved voltage quality, which will significantly increase the energy independence of the country.

Key words: *switching equipment, transformer, renovation, distribution substation, unification, bandwidth.*

УДК 621.3

О. А. ШТЕПА (канд. техн. наук, доц.), О. М. ЛЮБИМЕНКО (канд. ф.-м. наук, доц.),
 Державний вищий навчальний заклад
 «Донецький національний технічний університет»
o.a.shtepa@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ВИТРАТ ЕНЕРГОНОСІЇВ

Політика енергозбереження передбачає розробку високоефективних автоматизованих систем обліку витрат енергоносіїв. Проведено аналіз особливостей функціонування автоматизованої системи енергомоніторингу в умовах бюджетних установ. Виділено і проаналізовано особливості функціонування системи в таких об'єктах. Запропоновано і обґрунтовано концепцію розробки структури автоматизованої системи енергомоніторингу на базі ідей і технологій IoT. Описано структуру системи автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв з перевагами в питаннях економічності, швидкості впровадження та гнучкості настроювання.

Ключові слова: IoT, інтернет речей, енергомоніторинг, енергозбереження, контроль енергоспоживання, енергоносії, автоматизований збір інформації, інтернет, інтерфейс зв'язку, мікроконтролер, ESP8266, концепція проектування.

Вступ

Мета енергозберігаючої політики сучасної країни полягає не в обмеженні споживання енергоресурсів, а у підвищенні ефективності використання первинних енергоносіїв [1]. Сучасний розвиток народного господарства вимагає впровадження енергетичного менеджменту й енергетичного аудиту, які стали частиною проектів з оптимізації споживання енергоресурсів. Поняття енергетичного менеджменту можна вважати синонімом управління енергоспоживанням.

Окремим напрямком розвитку ідей політики енергозбереження в Україні є кроки, що спрямовані на впровадження реальних заходів у сфері споживання паливно-енергетичних ресурсів бюджетними установами. Зокрема, розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2017 р. № 732-р «Про затвердження плану заходів із впровадження систем енергетичного менеджменту в бюджетних установах» передбачається вимога щодо обов'язкового впровадження енергоменеджменту та енергомоніторингу у всіх бюджетних установах [2].

Мета дослідження – підвищення ефективності розробки, впровадження та подальшої експлуатації автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв шляхом обґрунтування структури такої системи в умовах державних та бюджетних установ.

Сформульована мета визначає наступні завдання дослідження:

- формулювання основних вимог до функціоналу системи обліку витрат енергоносіїв;
- аналіз особливостей умов функціонування автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв в умовах бюджетних установ, зокрема виділення існуючих типових обмежень та доступних ресурсів;
- сформулювати концептуальні принципи розробки структурної схеми системи;
- запропонувати структуру системи та проаналізувати основні її переваги.

Опис

Сьогодні для управління багатоквартирними будинками використовується кілька класів інформаційних систем [3]. В якості інформаційних систем розглядалися інформаційні системи, які, найімовірніше, будуть використовувати вже відомі і реалізовані інтелектуальні технології «Розумне місто» (Smart City), «Розумні вимірювання» (Smart Metering), «Розумний будинок» (Smart Home), «Розумні енергомережі» (Smart Grid), «Розумне місто» (Smart City) і концепцію Internet of Things (IoT) (Інтернет речей). Зазначаючи ряд переосмислень з 2010-х років, концепція IoT продовжує залишатися поняттям, що розвивається. Наповнення концепції новим змістом відбувається і сьогодні, завдяки розвитку технологій бездротових мереж, хмарних обчислень і межмашинної взаємодії. Спроби сформулювати принципи IoT робляться дослідниками періодично протягом останніх років і відображають динаміку розвитку концепції, як в області споживчої електроніки, так і в сфері інтересів промисловості [4]. Реалізація автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв на базі концепції IoT може бути здійснена на основі існуючої тенденції зростання обчислювальних можливостей мікропроцесорів і мікроконтролерів, призначених для роботи в IoT.

Розглянемо основні функції пристрою, для системи енергомоніторингу. Такий пристрій, вочевидь, розташовано безпосередньо на об'єкті контролю та:

- здійснює збір даних з приладів обліку витрати ресурсів (тепло- і водопостачання, електроенергія і т.ін.);
- здійснює збір даних з датчиків контролю ряду параметрів, набір яких визначається необхідною функціональністю системи (температура повітря всередині і зовні приміщення, вологість, освітленість, час

відкриття контрольованої двері / вікна / сейфа, концентрація газів, рівень шуму і т.і.) в залежності від специфіки об'єкта;

- передає зібрані дані до центрального серверу для накопичення, обробки та зберігання із заданою періодичністю.

Основні об'єкти, що можуть бути віднесено до бюджетних установ (наприклад навчальні заклади, лікарні, будівлі державних установ і т.і.) треба проаналізувати з точки зору особливостей функціонування автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв. Суттєвими з точки зору обґрунтування концепції розробки системи енергомоніторингу будуть в першу чергу типові для таких об'єктів обмеження і наявні ресурси, використання яких може підвищити ефективність проектування, впровадження або експлуатації розроблюваної системи. Проведений аналіз дозволив сформулювати ряд цікавих особливостей об'єктів згаданого типу.

По-перше, було відзначено велику розмаїтість моделей експлуатованих приладів обліку енергоресурсів (лічильників електроенергії, споживання води, газу теплової енергії та інші). Це пояснюється відсутністю єдиної стратегії впровадження приладів обліку в регіоні і вимагає індивідуального підходу до проектування системи на кожному об'єкті, що суттєво ускладнює та уповільнює таку роботу.

По-друге, не всі експлуатовані на даний момент моделі приладів обліку дозволяють здійснювати автоматизований збір інформації. Потрібне узгодження в питаннях вибору моделей приладів обліку.

По-третє, має місце досить широке використання на об'єктах підключення до мережі Internet. Це робить можливим істотну економію витрат на експлуатацію системи за рахунок використання вже існуючих ліній зв'язку.

Окрім того, розташування приладів обліку на кожному об'єкті індивідуально і може бути суттєво рознесено в просторі. Це може стати причиною істотного збільшення витрат за рахунок витрат на монтаж кабельних ліній зв'язку.

На основі проведеного аналізу особливостей об'єктів автоматизації, сформульованого необхідного функціоналу та існуючих аналогів, з'являється можливість сформулювати основні принципи проектування апаратної частини автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв. З метою підвищення ефективності розробки, впровадження та подальшої експлуатації автоматизована система обліку витрат енергоносіїв повинна проектуватися з дотриманням наступних принципів.

1. Модульна структура пристрою, яка забезпечує:

- гнучкість при проектуванні і монтажі системи в умовах варіабельності потреб і обмежень кожного об'єкта;
- можливість підключення різнотипних приладів обліку і максимального набору додаткових датчиків моніторингу в тому числі і в процесі експлуатації з метою розширення функціональних можливостей системи;
- зниження витрат за рахунок можливості використання тільки необхідної конфігурації і функціоналу.

2. Підтримка декількох технологій передачі даних до серверу, що забезпечує:

- можливість істотної економії на послуги зв'язку за рахунок можливості використання існуючих на об'єкті каналів зв'язку;

- можливість вибору оптимальної технології зв'язку для кожного об'єкта індивідуально.

3. Підтримка бездротових технологій зв'язку, яка забезпечує:

- технологічність монтажу системи на об'єктах, де монтаж дротових ліній (для зв'язку пристрою з центральним сервером або з датчиками і приладами обліку в межах об'єкта) пов'язаний з додатковими витратами;
- скорочення вартості і час монтажу.

4. Мінімізація зовнішніх органів управління, що забезпечує:

- обмеження доступу неавторизованих осіб до параметрів налаштування режимів роботи пристрою;
- зниження енергоспоживання пристрою;
- збільшення ступеня захищеності від впливу зовнішніх негативних чинників, що в цілому збільшує надійність роботи.

5. Використання сучасної елементної бази з перевагою найбільш інтегрованих рішень для:

- скорочення витрат на розробку за рахунок зменшення числа окремих елементів, що вимагають узгодження, налаштування та індивідуального монтажу;
- підвищення надійності розробленого пристрою за рахунок скорочення числа внутрішніх зв'язків і окремих компонентів.

У відповідності до запропонованого вище принципу побудови структури системи на концепції IoT, оберемо у якості базового одне з популярних рішень для інтернету речей ESP8266 мікроконтролер китайського виробника Espressif з інтерфейсом Wi-Fi. За принципом модульної побудови пристрою відокремимо базову частину, яка буде включати в себе мікроконтролер ESP8266, блок живлення, акумуляторну батарею на випадок перебоїв із зовнішнім живленням, модуль годинника реального часу і перетворювач UART - RS232 у якості найбільш часто використовуваного інтерфейсу зв'язку для приладів обліку. Високий ступінь інтеграції, реалізований розробниками у ESP8266 забезпечує можливість підключення датчиків (температура, вологість, тиск і т.і.) та інших периферійних пристроїв (або додаткових модулів) за найбільш популярними інтерфейсами SPI, I²C, UART, безпосередньо до мікроконтролера. Найбільш економічний засіб зв'язку із центральним сервером системи є вбудований у ESP8266 інтерфейс IEEE 802.11 b/g/n (Wi-Fi), який може працювати із наявним на об'єкті звичайним WiFi-роутером. Обсяг інформації енергомоніторингу зазвичай є незначним, що дозволить не вимагати

розширення існуючого каналу доступу в мережу Internet. Водночас, таке рішення дозволить розміщати пристрій моніторингу у будь-якому місці будівлі, де є (або може бути легко забезпечено) зв'язок із WiFi-роутером. Додаткові модулі зв'язку здатні забезпечити альтернативні або дублюючі (за необхідності) інтерфейси передачі даних моніторингу до центрального сервера за допомогою Ethernet або GSM-модема. Окремі додаткові модулі можуть бути застосовані у разі необхідності забезпечити комунікації з приладами обліку енергоносіїв за відповідними інтерфейсами (RS485, ModBus, MBus) або розширити функціонал системи за рахунок використання додаткових сенсорів моніторингу навколишнього середовища (температура, вологість, ступінь освітленості, шуму і т.ін.), стану важливих для місця розташування об'єктів (відчинені двері, вікна, присутність людини, тощо) (рис. 1).

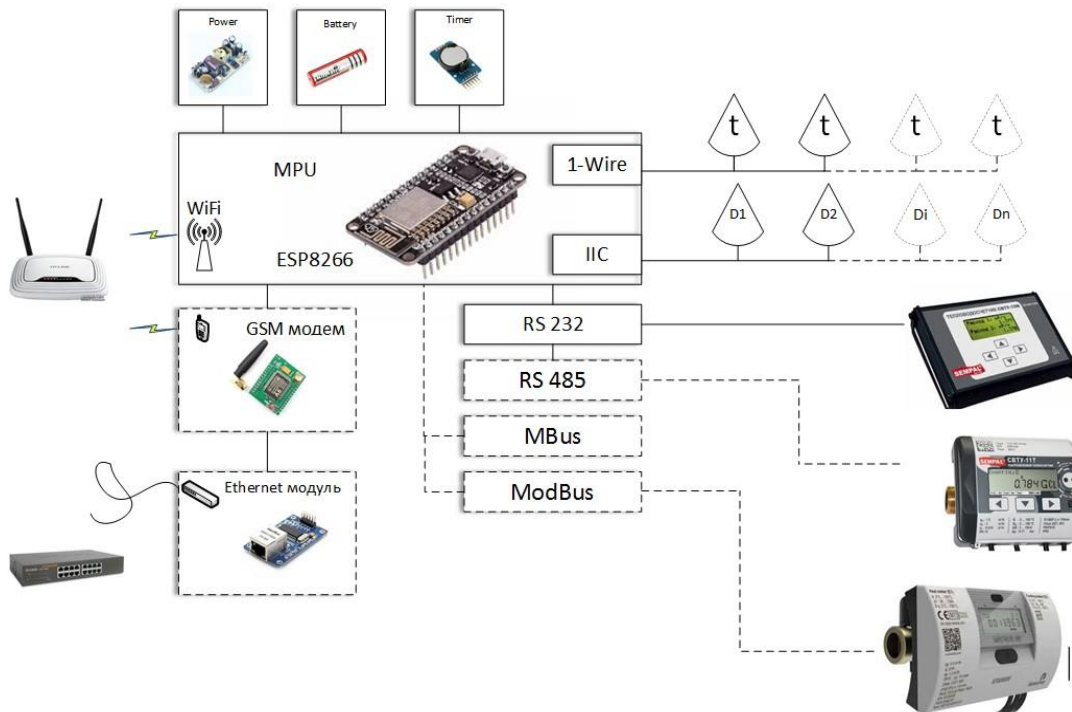


Рисунок 1 - Структура автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв

Компактність та відносно невелика ціна такого пристрою дозволяє замість того, щоб у випадках, коли прилади обліку розташовано далеко один від одного, вирішувати проблему прокладання кабелів, просто використати декілька модулів, що підключені до різних лічильників. Таке рішення також може дозволити використати всі переваги технології mesh-мереж.

Висновки

В результаті дослідження запропоновано обґрунтування концепції побудови структури автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв в умовах державних та бюджетних установ, яка забезпечує підвищення ефективності розробки, впровадження та подальшої експлуатації такої системи за рахунок максимального використання існуючих типових обмежень та доступних ресурсів.

Наукова новизна дослідження полягає у формулюванні обґрунтування концептуальних принципів побудови автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв на основі ідей технології IoT і раціонального використання доступних ресурсів та врахування типових особливостей об'єкту автоматизації.

Практична значущість роботи полягає у сформульованих принципах проектування системи енергомоніторингу та запропонованій структурі системи автоматизованої системи обліку витрат енергоносіїв з перевагами у питаннях економічності, швидкості впровадження та гнучкості налаштування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї [електронне видання] : Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / Уклад.: С.П. Денисюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79 с.
2. Про затвердження плану заходів із впровадження систем енергетичного менеджменту в бюджетних установах. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2017 р. № 732-р
3. Попов А.А. Разработка облачного информационного сервиса для функционирования инновационной ИТ - инфраструктуры организации по управлению многоквартирными домами// Электронный журнал

«Известия РЭУ». 2013. №4(14): Сайт. – URL:http://old.rea.ru/Main.aspx?page=Nomer_4__14_ (дата обращения: 15.12.17)

4. Bradicich T. The 7 Principles of the Internet of Things (IoT) [Electronic resours] / T. Bradicich // Opening Remarks, Industrial Internet Consortium Summit June 23, 2015, Houston, Texas – Access mode: <http://blog.iiconsortium.org/2015/07/the-7-principles-of-the-internet-of-things-iot.html> (last access: 20.05.17).

REFERENCES

1. Denisjuk, S.P., Kocar, O.V., Chernec'ka, Ju.V. (2016) Energy efficiency of Ukraine. Best project ideas [e-edition]: Project "Professionalization and Stabilization of Energy Management in Ukraine" [Energetichna efektyvnist' Ukraïni. Krashhi proektni ideï [elektronne vidannja] : Proekt «Profesio-nalizacija ta stabilizacija energetichnogo menedzhmentu v Ukraïni»] Kiyiv, 79 p

2. On Approval of the Plan of Measures for the Implementation of Energy Management Systems in Budgetary Institutions. By the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 26, 2017, No. 732-p [Pro zatverdzhennja planu zahodiv iz vprovadzhennja sistem energetichnogo menedzhmentu v bjudzhetnih ustanovah. Rozporjadzhennjam Kabinetu Ministriv Ukraïni vid 26 kvitnja 2017 r. № 732-r]

3. Popov A.A. (2013) The development of cloud information service for the operation of innovative IT - infrastructure management organizations apartment buildings [Razrabotka oblachnogo informacionnogo servisa dlja funkcionirovanija innovacionnoj IT - infrastruktury organizacii po upravleniju mnogokvartirnymi domami], available at: http://www.rea.ru/Main.aspx?page=Nomer_4__14_ (last access: 15.12.17).

4. Bradicich T. (2015) The 7 Principles of the Internet of Things (IoT) [Electronic resours] Opening Remarks, Industrial Internet Consortium Summit June 23, 2015, Houston, Texas – available at: <http://blog.iiconsortium.org/2015/07/the-7-principles-of-the-internet-of-things-iot.html> (last access: 20.05.17).

Надійшла до редколегії 20.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

A.A. SHTEPA¹, E.N. LYUBIMENKO¹

¹Donetsk National Technical University

The substantiation of the energy monitoring automated system structure. The policy of energy saving provides development of the highly effective automated systems of accounting of power consumption. Research objective is increase in efficiency of development, introduction and further operation of the automated systems of accounting of power consumption by justification of structure of such system in the conditions of the public and budgetary institutions. The analysis of features of operating conditions of the automated systems of accounting of power consumption in the conditions of budgetary institutions, in particular allocation of the existing standard restrictions and available resources is carried out. Features of functioning of system in such objects are allocated and analyzed. A big variety of models of the operated metering devices of energy resources, rather wide use on subjects to connection to Internet network, high probability of essential dispersion in space of the locations of metering devices is noted. The conceptual principles of development of the block diagram of system are formulated. The relevance of use modular structure of the device, support of several technologies of data transmission to the server, supports of wireless technologies of communication, use of modern element base with advantage of the most integrated solutions is proved. For an illustration of the offered concept the structure of system on the basis of the popular microcontroller for the Internet of things (ESP8266) with the built-in support of the WiFi interface is offered. By the principle of modular creation of the device it is separable a basic unit which will include the microcontroller, the power supply unit, the rechargeable battery, the module of real time clock and the RS232 converter as the most often used communication interface for metering devices. High extent of integration, realized by developers in ESP8266 provides a possibility of connection of sensors (temperature, humidity, pressure, etc.) and other peripheral devices (or additional modules) on the most popular SPI, I2C, UART interfaces, directly to the microcontroller. The most economic means of communication with the central server of system is the IEEE interface 802.11 b/g/n (WiFi is built in ESP8266) which can work with the usual WiFi router which is already available on an object. The concept provides increase in efficiency of development, introduction, flexibility of control and the subsequent operation of such system due to the maximum use of the ideas of IoT technology, use of available resources and accounting of typical features of an object of automation.

Key words: *IoT, the Internet of things, energy monitoring, energy saving, energy consumption control, energy carriers, the automated data collection, the Internet, the communication interface, the microcontroller, ESP8266, the concept of design.*

УДК 621.311.001.57

Б.О. ЖУК (аспірант), **В.В. КИРИК** (доктор технічних наук, професор)**Національний технічний університет України****«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»****b_zhuk@ukr.net, vkyryk@ukr.net**

АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ ВИМИКАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Досліджено вплив геомагнітних індукційних струмів на аварійне відключення магістральних ліній електропередавання. Розроблена математична модель для оцінки рівня напруженості геоелектричного поля на основі даних коливань геомагнітного поля Землі. В моделі враховані провідності земної кори регіонів України. Наведено графіки коливання геоелектричного поля для одного з аварійних відключень ліній електропередавання 750 кВ. Приведені статистичні діаграми часових збігів максимального значення поверхневого потенціалу з моментами автоматичних відключень ліній.

Ключові слова: геомагнітні індукційні струми, поверхневий потенціал, повний поверхневий опір, геомагнітні збурення, геоелектричне поле, ЛЕП 750 кВ, аварійні відключення, магістральні лінії електропередавання.

На сьогодні електрична система України характеризується складною замкненістю та наявністю ліній і мереж різних класів напруги. Протяжність ліній електропередавання, значна кількість взаємопов'язаних контурів, зростання ступеня неоднорідності, вплив навколишнього середовища, ускладнюють процес функціонування електроенергетичної системи. Також відкриваються нові проблеми пов'язані з розвитком, які ускладнюють процес функціонування об'єднаної електроенергетичної системи. У теперішній час фіксується досить значна частка автоматичних відключень магістральних електропередавання (ЛЕП) напругою 750 кВ по неустановленим чинникам. Однією з причин відключень ЛЕП може бути геомагнітне збурення навколишнього простору. В сучасних умовах, виявлені залежності між сонячною активністю та геомагнітними бурями. Тому однією з важливих проблем вважається присутність геомагнітних індукційних струмів (ГІС) в мережі. Як є проявом сонячної активності на поверхні Землі. Сонячна активність супроводжується викидами у навколишній простір швидких заряджених частинок – сонячного вітру. Швидкість сонячного вітру може значно коливатися протягом періоду сонячної активності. Взаємодія сонячного вітру з іоносферою Землі призводить до змін конвекції магнітосферної плазми, коливань і скручування магнітного поля більш ніж на 100 нТ. Тобто, в іоносфері Землі виникають вихрові потоки і струмені заряджених частинок, що циркулюють над землею на висотах в сотні і тисячі кілометрів. Їх прийнято називати магнітними бурями або штормами [1]. Геомагнітні струми в іоносфері неоднорідні, їх амплітуда може досягати 10^6 А. Зміна струмів і їх зміщення призводить до коливань магнітного поля Землі. Ці коливання викликають зміну магнітного поля планети. В результаті на поверхні Землі, відповідно до закону Фарадея, виникає різниця потенціалів електричного поля. В протяжних лініях електропередавання виникають геомагнітні індукційні струми ГІС (Geomagnetically induced currents GIC).

Наявні на Землі протяжні електропровідні елементи, зокрема, магістральні лінії електропередавання та заземлені нейтралі їх силових трансформаторів, створюють шляхи і умови для протікання ГІС. У світі відомі випадки, коли такі струми призводили до аварій в енергосистемах, викликали перевантаження, сприяли помилковому спрацюванню релейного захисту та призводили до пошкодження обладнання. Протікання струму ГІС в обмотках силового трансформаторного призводить до зсуву робочої точки на кривій намагнічування силового трансформатора. Внаслідок чого трансформатор переходять у стан насичення. Насичення осереддя може призводити до таких проблем, як:

- виникнення значного струму намагнічування, місцевого перегріву та збільшення втрат потужності в обмотках трансформатора;
- трансформатор починає генерувати в енергосистему широкий спектр парних і непарних вищих гармонік, які можуть перевантажити конденсаторні батареї та викликати спрацювання релейного захисту;
- різко зростає споживання трансформатором реактивної потужності;
- можливі механічні руйнування конструкції трансформатора від локального перегріву при інтенсивному впливі магнітного потоку розсіювання.

Оскільки діапазон частот ГІС знаходиться в межах 0,001...1 Гц, то в порівнянні з частотою енергосистеми 50 Гц, індукований струм можна вважати квазіпостійним [2]. Коливання магнітного поля Землі можуть проникати на сотні кілометрів углиб поверхні. Тому при розрахунках геоелектричного поля необхідно враховувати як провідності Земної кори, так і її мантиї. Крім того, реакція Землі залежить від кутової частоти коливань магнітного поля, тому розрахунки повинні враховувати її поведінку.

В ході досліджень, вчені США, Фінляндії та Канади прийшли до висновку, що величина поверхневого потенціалу електричного поля може знаходитися в межах 1...10 В/км [3]. Значення поверхневого потенціалу відрізняється по широті, а на його величину впливає електрична провідність ґрунту, геологічні розломи, близькість морського узбережжя та інші геологічні фактори.

Геомагнітні індукційні струми в періоди магнітних бур постійно фіксуються в енергосистемах світу. Як приклад, можна навести події в березні 1989 року в енергосистемі Канади [4]. Під час гігантського спалаху на Сонці сталася одна з найпотужніших магнітних бур XX сторіччя, яка супроводжувалася інтенсивним полярним сійвом. Вночі фактично значна територія Канади занурилася в пільму. Окремі сильні збурення магнітного поля призвели до відключення всієї електроенергетичної системи Квебека, включаючи Монреаль. Кілька потужних трансформаторів на території Канади і США вийшли з ладу. Зареєстровано сотні спрацьовувань систем релейного захисту та автоматики.

Для розрахунку та оцінки впливу ГІС на магістральні електричні мережі створено математичну модель для визначення напруженості геомагнітного поля. Залежність напруженості геоелектричного поля від геомагнітного поля та повного поверхневого опору описується виразами:

$$E_x(\omega) = Z(\omega)H_y(\omega); \quad (1)$$

$$E_y(\omega) = -Z(\omega)H_x(\omega); \quad (2)$$

де $E_x(\omega)$ – напруженість геоелектричного поля, направлено на північ (В/м); $E_y(\omega)$ – напруженість геоелектричного поля, направлено на схід (В/м); $H_x(\omega)$ – напруженість геомагнітного поля, направлено на північ (А/м); $H_y(\omega)$ – напруженість геомагнітного поля, направлено на схід (А/м); $Z(\omega)$ – повний поверхневий опір (Ом), який залежить від структури земної кори [5]. Зв'язок між напруженістю магнітного поля $H(\omega)$ та магнітною індукцією $B(\omega)$ має вигляд [6]:

$$H(\omega) = -\frac{B(\omega)}{\mu_0}, \quad (3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – магнітна проникність повітряного простору.

Послідовність етапів розрахунку геоелектричного поля можна представити структурною схемою зображеною на рис. 1.

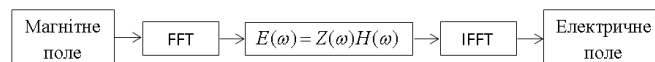


Рисунок 1 – Структурна схема розрахунку геоелектричного поля

Дані щодо зміни магнітного поля від часу $B(t)$ були взяті із сайту Intermagnet (International Real-time Magnetic Observatory Network - <http://www.intermagnet.org/>) Львівської обсерваторії за 06.06.2015р. Застосовуючи до компонент даних коливань магнітного поля Землі виду $B_x(t)$ та $B_y(t)$ швидке перетворення Фур'є (FFT) розраховано частотний спектр зміни магнітного поля для $B_x(\omega)$, $B_y(\omega)$ (рис.1). Відповідно до частотного спектру магнітного поля розраховано опір кожного шару Землі.

В розрахунку були прийняті дані про питомий опір шарів Землі у залежності від глибини для території, на якій знаходиться місто Львів (модель 42) [7]. Для обчислення повного поверхневого опору була використана одновимірна модель. Вона не враховує поперечні зміни провідності, але забезпечує прийнятні наближення у області, яка не перебуває поблизу меж провідності, таких як берегові лінії.

Розрахунок повного поверхневого опору, починаючи від нижнього шару до поверхні, виконувався за наступною математичною моделлю:

1. Для кожного шару Землі визначається власний коефіцієнт розповсюдження:

$$k_n = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_n}; \quad (4)$$

де ω – кутова швидкість, (рад/с); μ_0 – магнітна проникність вільного простору; σ_n – провідність n – го шару, (1/(Ом·м)).

2. Повний поверхневий опір, для нижнього шару де немає відбиття, розраховується за виразом:

$$Z_n = \frac{j\omega\mu_0}{k_n}; \quad (5)$$

3. Розрахунок коефіцієнта відбиття від нижнього шару визначається за виразом:

$$r_n = \frac{1 - k_n \frac{Z_{n+1}}{j \cdot \omega \cdot \mu_0}}{1 + k_n \frac{Z_{n+1}}{j \cdot \omega \cdot \mu_0}}; \quad (6)$$

4. Повний поверхневий опір розраховується за виразом:

$$Z_n = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \left(\frac{1 - r_n \cdot e^{-2k_n d_n}}{k_n (1 + r_n \cdot e^{-2k_n d_n})} \right). \quad (7)$$

Коефіцієнти розповсюдження та відповідні повні поверхневі опори є функціями від частоти, тому послідовність викладених розрахунків виконується для кожної частоти відповідно до прямого перетворення Фур'є. До розрахунку беремо тільки повний поверхневий опір (верхнього шару Z_1), в якому вже враховано коефіцієнти відбиття шарів що лежать нижче [8].

Використовуючи вирази (1) та (2) знаходимо значення геоелектричного поля $E(\omega)$. Застосування зворотного швидкого перетворення Фур'є (IFFT) до значень компонент геоелектричного поля $E_x(\omega)$ і $E_y(\omega)$ дало можливість отримати криві коливань геоелектричного поля від часу $E_x(t)$ та $E_y(t)$ [9].

Представлена модель розрахунку геоелектричного поля реалізована в програмному середовищі Mathcad. Алгоритм програми представлено на рис. 2. Програма дозволяє оцінити коливання напруженості геоелектричного поля у день аварійного вимкнення ЛЕП та встановити часовий зв'язок між цими подіями.

Для дослідження впливу збурень магнітного поля Землі на аварії в магістральних лініях електропередавання була взята наступна інформація: «Архів автоматичних вимкань ПЛ 220-800кВ ДП "НЕК "Укренерго" у період з 01.01.2011 до 31.12.2015 з невстановлених причин». На основі цих даних було проведено дослідження залежності аварій від зміни напруженості геоелектричного поля, що виникає унаслідок збурень магнітного поля.

Для кожної із аварій, були взяті дані про коливання геомагнітного поля Землі $B_x(t)$ та $B_y(t)$ для відповідної дати та регіону з сайту Intermagnet (<http://www.intermagnet.org/>). Оскільки дані на сайті викладені із прив'язкою до всесвітнього часу UTC, було зроблено відповідне переведення годинникової шкали до часового поясу України. З 27 березня 3:00 год по 30 жовтня 4:00 год – літній час, відповідно UTC+3 і у зимовий час UTC+2. Дані розрахунків представлено на рис.3. Криві відображають збурення магнітного поля Землі у даному регіоні на протязі доби та розраховане відповідне їм значення коливань геоелектричного поля. Коливання показані покомпонентно $B_x(t)$ та $B_y(t)$ у відповідності до коливання геомагнітного поля направлено на північ та на схід. На рис.4 представлено криві коливання модулів геомагнітного поля $B_m(t)$ та геоелектричного $E_m(t)$. На основі значень модулів визначається максимальне значення напруженості електричного поля, яке використовується для подальшого розрахунку електричної мережі 750 кВ об'єднаної енергосистеми України. Результати роботи програми для аварійного відключення ПЛ 750 кВ «Чорнобильська АЕС – Хмельницька АЕС» 06.07.14р о 13:37 представлені на рисунках 3 та 4. Для даного випадку встановлено, що розбіжність між моментом відключення ЛЕП та розрахунковим збуренням (сплеском) напруженості геоелектричного поля складає 30 хвилин. Дане відхилення можна викликати неточністю визначення напруженості магнітного поля та розрахунковою похибкою визначення поверхневого опору Землі.

На основі досліджень коливань поверхневого потенціалу встановлено, що збуреннями магнітного поля Землі, які можуть викликати аварійні відключення магістральних ліній електропередавання можна вважати такі, значення поверхневого потенціалу при яких перевищує 4 В/км (рис.5).

На рис. 6 представлена діаграма у відсотковому співвідношенні між максимальними значеннями модулів напруженості геоелектричного поля та моментами аварійних вимкнень магістральних ЛЕП напругою 750 кВ, які приведені для 38 випадків автоматичних вимкань ЛЕП по невстановленим причинам.

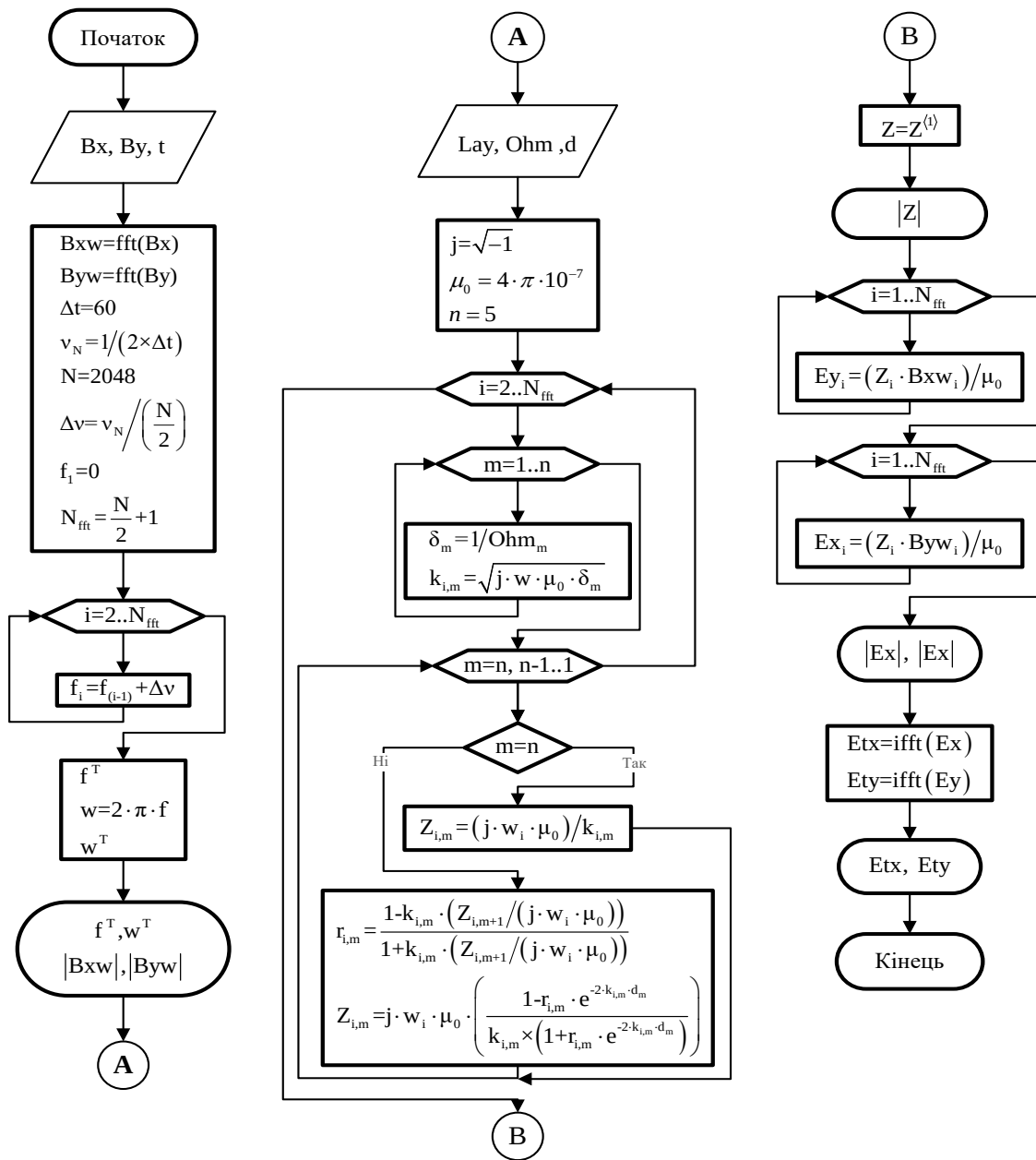


Рисунок 2 – Блок - схема програми для обчислення геоелектричного поля в середовищі Mathcad

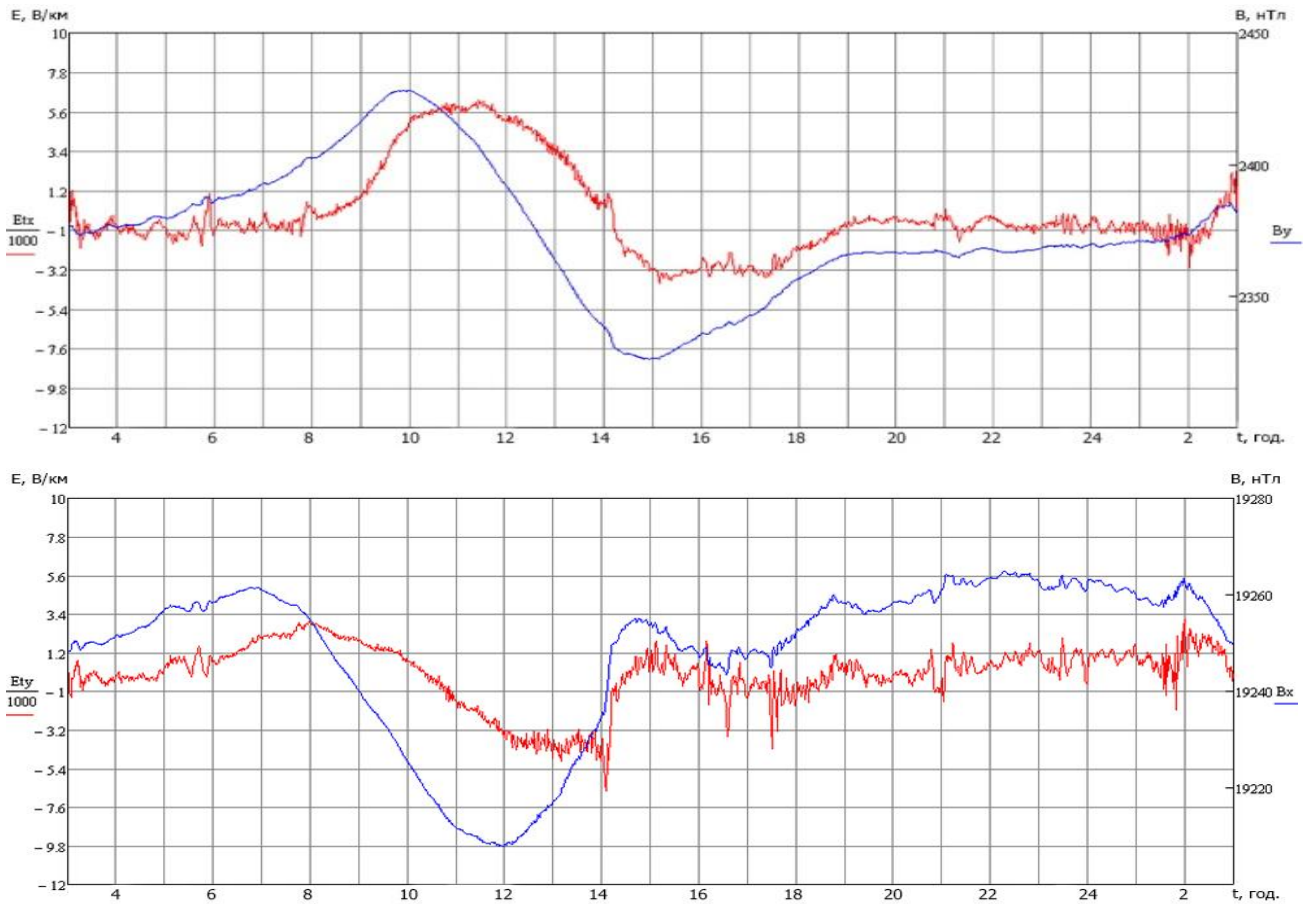


Рисунок 3 – Графіки коливань компонент магнітної індукції геомагнітного (B_x), (B_y) та напруженості геоелектричного (E_x), (E_y) полів від часу

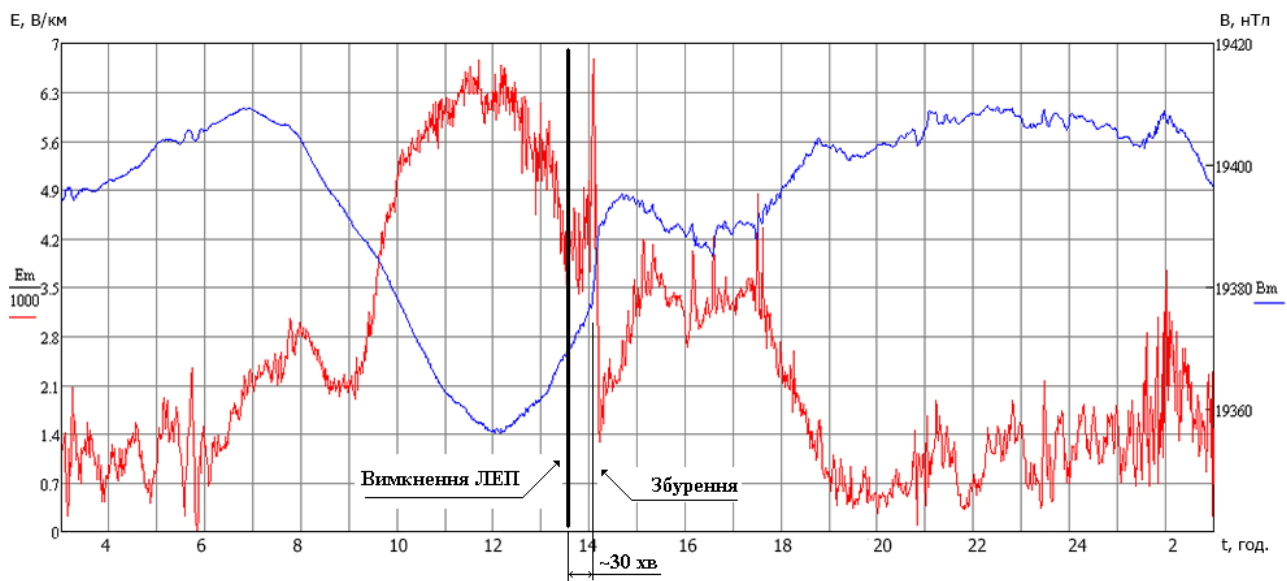


Рисунок 4 – Графіки коливань модулів магнітної індукції геомагнітного (B_m) та напруженості геоелектричного (E_m) полів від часу



Рисунок 5 – Інтенсивність поверхневого потенціалу при відключеннях ліній електропередавання

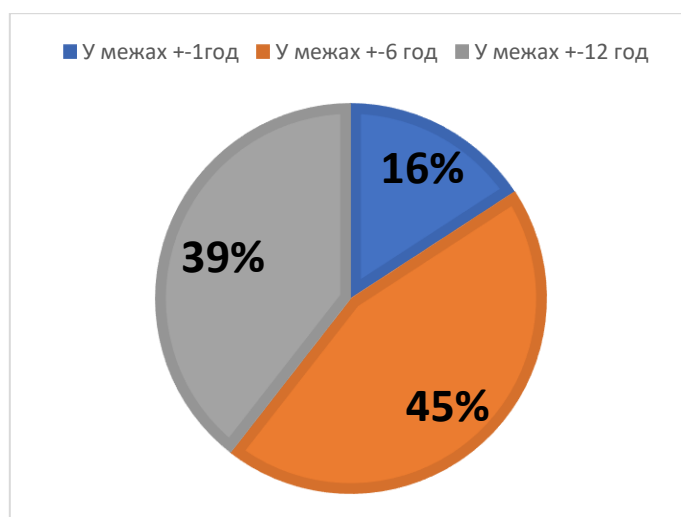


Рисунок 6 – Діаграма кількісного співпадіння максимального значення поверхневого потенціалу з моментами вимкнення ліній електропередавання напругою 750 кВ з відхиленням в одну годину, шість та дванадцять годин

Розрахунок геоелектричного поля Землі та співставлення моментів аварійних відключень магістральних ліній електропередавання об'єднаної енергосистеми України по невстановленим причинам зі збуреннями геоелектричного поля показав, що одним з можливих чинників аварійного вимикання ЛЕП з великою вірогідністю можна вважати геомагнітні індукційні струми.

Установлено, що у 33 випадках з прийнятих до аналізу 38 автоматичних відключень ліній електропередавання напругою 220...800 кВ з невстановлених причин, зафіксованих у ДП "НЕК "Укренерго", у моменти відключень спостерігалися сильні геомагнітні збурення, які призвели до наведення поверхневого потенціалу в регіонах де проходять траси даних ЛЕП. Часові відхилення моментів відключення ЛЕП та збурень геоелектричного поля у 87 % випадків знаходились в інтервалі від 30 хвилин до 12 годин, що з врахуванням неточності визначення напруженості магнітного поля та розрахунковою похибкою визначення поверхневого опору Землі є достатнім для припущення того, що чинником аварійного відключення ЛЕП можна вважати збурення магнітосфери Землі, викликане викидами сонячної плазми в навколосезний простір. Для більш точної доказової бази необхідно проводити моніторинг магнітного поля Землі на всіх підстанціях напругою 750 кВ об'єднаної енергосистеми України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Tsurutani, B., Gonzalez W. (1997). The interplanetary causes of magnetic storms: A review, Magnetic Storms, AGU Geophysical Monograph p.98.
- Koen J. and Gaunt C.T. (2002). Geomagnetically induced currents at mid-latitudes. In Proc. International Union of Radio Science (URSI) General Assembly, Maastricht.

- John G. Kappenman, Vernon D. Alberston, (Mar. 1990). "Bracing for the geomagnetic storms," IEEE Spectrum, pp.27 – 33,
- Sabdullah M, Haryono T., (June 17-19, 2007) "Analytical study of Geomagnetically Induced Current Phenomenon at Power Transformer," Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics Institut Teknologi Bandung, Indonesia, pp.830 – 833.
- Simpson F., Bahr K. (2005) Practical Magnetotellurics, Cambridge University Press, p. 5.
- Juan A. Martinez V., (2010) Power System Transients: Parameter Determination, CRC Press.
- Estimation of the electric resistivity Distribution (eurhom) in the european Lithosphere in the frame of the eurgic Wp2 project. Acta Geod. Geoph. Hung., (2012). Vol. 47(4), pp 377-387.
- DRAFT Application Guide for Computing GIC in the Bulk Power System, 4.1.(2013), pp. 6 – 30.
- Кирик В., Нагорний Р. Дослідження розподілу геомагнітних індукційних струмів у магістральних електричних мережах 750 кВ. Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2014 - №2 (36). - ст. 101-105.)

REFERENCES

- [1] Tsurutani, B., Gonzalez W. (1997). The interplanetary causes of magnetic storms: A review, Magnetic Storms, AGU Geophysical Monograph p.98.
- Koen J. and Gaunt C.T. (2002). Geomagnetically induced currents at mid-latitudes. In Proc. International Union of Radio Science (URSI) General Assembly, Maastricht.
- John G. Kappenman, Vernon D. Alberston, (Mar. 1990). "Bracing for the geomagnetic storms," IEEE Spectrum, pp.27 – 33,
- Sabdullah M, Haryono T., (June 17-19, 2007) "Analytical study of Geomagnetically Induced Current Phenomenon at Power Transformer," Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics Institut Teknologi Bandung, Indonesia, pp.830 – 833.
- Simpson F., Bahr K. (2005) Practical Magnetotellurics, Cambridge University Press, p. 5.
- Juan A. Martinez V., (2010) Power System Transients: Parameter Determination, CRC Press.
- Estimation of the electric resistivity Distribution (eurhom) in the european Lithosphere in the frame of the eurgic Wp2 project. Acta Geod. Geoph. Hung., (2012). Vol. 47(4), pp 377-387.
- DRAFT Application Guide for Computing GIC in the Bulk Power System, 4.1.(2013), pp. 6 – 30.
- Kyryk V., Nagornoi R. (2014) Investigation of the distribution of geomagnetic induction currents in main electrical networks of 750 kV. Power engineering: a scientific journal.- №2 (36). - p. 101-105. (Ukr)

Надійшла до редколегії 24.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

B. ZHUK, V. KYRYK

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Polytechnic Institute"

Analysis of emergency disconnections of main power lines. Automatic disconnections in trunk transmission lines 750 kv as a result of geomagnetic induction currents is studied The influence of geomagnetic induction currents on emergency switching-off of the main transmission lines is investigated. A mathematical model for the estimation of tension level of the geoelectric field, based on the data of the geomagnetical field oscillation of the Earth is worked out. The model takes into account the conductivity of the earth's crust for each of the regions. The presented graphs show geoelectric field oscillations for one of emergency outages on 750 kV transmission lines. On the basis of fluctuations studies on the surface potential of the earth on the territory of Ukraine, one can consider as intensive perturbations whose value is greater than 4 V/km. The statistical diagrams of coincidences of the maximum value of the surface potential with the disconnection of power lines are given. In 33 cases on the days of outages we observed strong geomagnetic disturbances, which led to the imposition of a surface potential in the regions where these lines pass. These trips account for 87% of all failures without established causes.

Keywords: *geomagnetic induction currents, superficial potential, geomagnetic indignations, geoelectric field, transmission lines, 750 kV, emergency shutdown, main transmission lines.*

УДК 621.713.13: 621.313

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.)¹,
А.П. НІКІФОРОВ (д-р техн. наук, доц.)²

¹Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», ²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

¹svf1934@gmail.com, ²a.p.nikiforov@i.ua

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 1. СИНТЕЗ

Реалізація сучасних концепцій розвитку мереж, а саме «Смарт-грид», «Цифрова підстанція», «Цифрова комірка», «Аутсорсинг служб» має на увазі передачу та осмислення великої кількості інформації про процеси, що відбуваються в електромережі. Дослідження показують, що для стійкості роботи деяких алгоритмів пристроїв релейного захисту та автоматики в розподільних електромережах напругою 6–35 кВ недостатньо обсягу вхідної інформації. Заповнення нестачі обсягу черпається із можливостей інтелектуальних, пошукових алгоритмів розпізнавання образів, які здатні виділяти смислові стани із сигналів процесів, що відбуваються в мережах. Сформована узагальнена еквівалентна структурна схема інформаційних датчиків, що складає морфологічний автомат на початковому рівні структури пристрою. Пропонується спосіб отримання додаткової інформації на основі послідовності кроків, а саме структурованого поділу інформації, контролю проходження елементарних інформаційних складових по структурним схемам об'єкта управління і захисту, далі пристроїв релейного захисту та автоматики, та на вихід системи управління SCADA. Складена порівняльна таблиця структур датчиків.

Ключові слова: *смарт-грид, релейний захист та автоматика, захист від однофазних замикань на землю, структурно-інформаційний метод, смисловий сигнал, розпізнавання образів, моделювання.*

Постановка проблеми. Дослідження [1.1–1.5] виявили ряд причин, що не дозволили реалізувати пристрої RPA, які б досягли стійкості роботи, необхідної для практики [2.1–2.5]. Для визначення подальшого поля роботи визначимо межі цієї проблеми рядом причин, що обмежують стійкість роботи пристроїв релейного захисту і автоматики (RPA). Перетворимо рис. 1.1 щодо початкового морфологічного рівня (рис. 1.3) відносно смислової ситуації SN. Під ситуацією SN розуміється динамічна зміна виходу $S_{OCP}(t)$ як реакція структурної схеми OCP на появу зміни в будь-якій координаті OCP (вхідній або внутрішній). Тобто SN модулює сигнали промислової частоти на виході об'єкта контролю і захисту (OCP) (рис. 1.2–1.3). Це формує зміни в сигналах перехідних процесів (ПП).

Одна з причин — недостатній обсяг інформації для розпізнавання смислових ситуацій SN. Заповнити недолік обсягу інформації можна за рахунок нових способів отримання інформації, додаткових датчиків TS, підвищення їх якості роботи (рис. 1.4). Для заповнення загального обсягу інформації при складних ситуаціях SN необхідна наявність TS для всіх параметрів вхідних сигналів — частота, фаза, час проходження, співвідношення особливих моментів в сигналах ПП. Таке уявлення використовується, наприклад, в системах SCADA (рис. 1.1), коли вся інформація про OCP передається відразу на верхній рівень системи або для аналізу спостерігачами в аутсорсингових підприємствах.

Ще причина — збіг двох смислових станів. А саме відсутність селективної інформації в OCP збігається із відсутністю роботи пристроїв при неправильній або неякісній обробці інформації чи відмови елементів. В цьому випадку можна застосувати тестування OCP ситуаціями SN (рис. 1.1) розпізнаванням первинних символів TS інформації для селективного пошуку пошкодженої ділянки мережі.

Ще одна причина — компромісна мінімізація структурної частини і конструктивної реалізації. Це призвело до мінімізації алгоритмічної частини пристроїв. В даний час розвиток електронної бази (мікроконтролер МК, ПЛІС, операційний підсилювач) не вносить помітних обмежень в конструктивну реалізацію пристроїв. Звідси випливає, що для досягнення заданої глибини розпізнавання та стійкості роботи пристроїв і системи RPA можна синтезувати та реалізувати в їх конструкції всі необхідні алгоритми отримання інформації, обробки, прийняття рішень.

Мета роботи. Визначити найбільш ефективні структури інтелектуальних інформаційних датчиків для розробки пристроїв RPA та систем SCADA в рамках сучасних концепцій розвитку мереж. Синтез смарт-TS виповнити на прикладі контуру нульової послідовності електромережі (КНПМ) напругою 6–35 кВ.

Вихідні теоретичні положення. Згідно структурно-інформаційному (SI) методу [1.1–1.4], аналіз перехідних

процесів (ПП) в електроенергетичних мережах різних класів напруги ведеться за допомогою динамічного подання процесів, які можна представити внутрішніми інформаційними складовими узагальненої структурної схеми (GES) пристроїв і терміналів RPA. Якість обробки динамічних потоків інформації в системах RPA енергомереж контролюється смисловим сигналом $S(t)$ (рис. 1.1). Такий сигнал формується на кожному ієрархічному рівні обробки загального обсягу інформації в системі — морфологічному, синтаксичному, семантичному. Обсяг інформації про стан ОСП виділяється пристроями RPA на основі демодуляції ПП. В опублікованих роботах [1.1, 1.4] для ієрархічних рівнів пристрою, терміналу підстанції і в цілому всієї системи SCADA складені узагальнені еквівалентні структурні схеми автоматів розпізнавання сенсу. Ці схеми дозволяють одноманітно описати відомі та нові пристрої в рамках концепцій розвитку мереж.

Синтез TS реалізується в такий спосіб. Все різноманіття, «складність» сигналів реальних мереж контролюється за допомогою високочастотних аварійних файлів ПП реєстраторів. Реєстратори розташовуються в пристроях RPA і поставляють аварійні файли для аналізу в режимі аутсорсингу. Для усунення причин будемо далі використовувати спосіб динамічного синтезу TS в САПР з контролем алгоритмів реального часу при використанні презентабельної вибірки сигналів аварійних файлів ОСП. При синтезі і розробці в САПР пристроїв RPA використовуються реальні принципи схеми датчиків TS. Контролюється фізична реалізація завдань в режимі послідовного вдосконалення від «простого» до «необхідного» в САПР. Робота технологічного та інших процесів в мережі розглядається далі згідно ланцюжку SCADA—ОСП (рис. 1.1). Під обсягом інформації мається на увазі площа сигналу $S_{SMART}(t)$ (рис. 1.2). Під стійкістю роботи мається на увазі якість розпізнавання смислових ситуацій SN в сигналах ПП в ОСП. Сигнал $S_{SMART}(t)$ відображає зміни смислової інформації в ОСП і в системі автоматичної стабілізації нормального режиму роботи (АСНОР або ASNOM) мережі (рис. 1.1–1.3)

$$S_{SMART}(t) = 3a(t) - Прому(t) = Fix[\beta \times K_{SB} \times (S_S(t) - S_B(t))] = Fix[\beta \times K_{SB} \times f(\sum KSN(t) - \sum KBM(t))], \quad (1)$$

де $N=1, 2, \dots$; $M=1, 2, \dots$; Σ — сума всіх вагових коефіцієнтів KSN або KBM , які встановлюють значимість правил PS , PB автомата SyntA, ваговий коефіцієнт K_{SB} результуючого кореневого правила P_{SB} автомата SemA, β — загально масштабуючий коефіцієнт. Функція Fix описує роботу блоку фіксації, в якому при розвитку ПП запам'ятовуються активовані правила PS , PB на певний час для накопичення значення $S_{SMART}(t)$. Цей сигнал може змінюватися в діапазоні «0%» і «100%» (рис. 1.6). Функція Fix аналогічна роботі аварійного реєстратора і діє при появі «активуючого» TS, що задається в настройках пристрою RPA. Такий TS звичайно відомий для ОСП. Схема GES математично описується переліком — граматикою G (2)

$$G_O \rightarrow (TSSN, TSBM, NTSSN, NTSBM, PSN, PBM, P_S, P_B, P_{SB}), \quad (2)$$

де O — об'єкти, наприклад, ОСП, GES, TS, RPA, ASNOM, SCADA, PS і PB — правила зв'язків TS та вторинних NTS, P_{SB} — результуюче кореневе правило схеми GES. Виконавчими органами (EU) системи ASNOM (рис. 1.1) є виходи алгоритмів RPA, об'єднані блоком експертної системи ExS. У ExS формуються кінцеві смислові висновки, приймаються рішення про автоматичне усунення відхилень від р1 «NM» нормального режиму (NM) роботи ОСП.

Згідно із SI-методом контролюється вся наявна інформація про ОСП. Перш за все, ОСП замінюється коливальними контурами з відповідними частотними складовими (ЧС), тобто від високочастотної ВЧС до супер-НЧС (рис. 1.6). До коливальних відносяться також низько добротні контури, в яких розвивається тільки одна полу хвиля коливання. Структура ОСП представляється схемою GES_{OSP} на загальному полі інформаційних датчиків TS (рис. 1.1–1.7), які розпізнають ситуації SN . Кожна SN розділяється на елементарні складові — нетермінальні складові NTS (рис. 1.7). Завдання забезпечення повноти обсягу інформації може вирішуватися встановленням відповідності кожної елементарної складової в SN . Контроль ПП стає логічним критерієм зміни виходів TS. Це зменшує їх взаємозалежність від параметрів в ОСП, часу, тривалості та моментів виникнення. Наприклад, амплітудні параметри сигналів контурів ОСП контролюються і представляються відповідними TS. Кожен коливальний контур ОСП контролюється пристроями RPA, встановленими на приєднаннях ділянки ОСП. Пристрої на морфологічному ієрархічному рівні далі будемо представляти схемою GES_{TS} з граматикою G_{TS} (рис. 1.8).

ОБГРУНТУВАННЯ НАЯВНОСТІ СУПЕР-НИЗЬКОЧАСТОТНИХ (ІНФОРМАЦІЙНИХ) КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ В ОСП. Відомо, що в пристроях RPA, SCADA, АСКОВЕ вхідна інформація дискретизується за часом у блоці АЦП. Частота дискретизації АЦП вибирається виходячи з наявності в ОСП самої високочастотної складової ВЧС. Наприклад, дискретизація може становити 20 точок на період ВЧС, яка може дорівнювати 10 кГц для розподільної мережі 6–35 кВ. Отже, блоком АЦП будуть свідомо зафіксовані у вхідному сигналі всі складові з меншою власною частотою (тобто всі НЧС). Так відомо операторний опис ОСП

$$y(t) = W(D)x(t), \quad W(D) = \frac{R(D)}{Q(D)} = \frac{b_m D^m + \dots + b_2 D^2 + b_1 D + b_0}{a_n D^n + \dots + a_2 D^2 + a_1 D + a_0}, \quad (4)$$

де $D = d/dt$, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ — константи; $m \leq n < \infty$.

Константи в (4) з індексами n і m описують найбільші частоти, з якими можливі рухи в ОСП. Покладемо далі, що для АЦП ці константи a_n, b_m будуть початковими a_0, b_0 з якими змінюється інформація в ОСП. Тоді щодо

площу, а не миттєві значення сигналів в ПП в ОСР що застосовується при детектуванні. Тобто в цій роботі введено новий смисловий сигнал $S_{TS}(t)$. Тоді контроль ПП інтерпретується логічним осмисленням зміни виходів TS. При достатньо великому числі TS зменшується їх взаємозалежність від інших параметрів в ОСР, часу, тривалості та моментів виникнення. Наприклад, амплітудні параметри сигналів контурів ОСР контролюються і представляються відповідними TS. Таким чином, структуру ОСР можна описати сукупністю схем GES_{RPA} (рис. 1.3–1.4) згідно з рис. 1.8, що беруть участь в управлінні ОСР, тобто сукупністю їх граматик G , а саме

$$G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{TS} = \Sigma G_{RPA} = G_{SCADA}, \text{ де } \Sigma \text{ — сума складових.} \quad (3).$$

ФОРМУВАННЯ СМИСЛОВОГО СИГНАЛУ В МОРФОЛОГІЧНОМУ АВТОМАТІ ПРИСТРОЇВ.

Виповнимо послідовне застосування до датчиків TS принципу опису схем автоматів розпізнавання SyntA і SemA, розробленого раніше в SI-методі. Ці автомати знаходяться на ієрархічно вищих рівнях обробки інформації. Будемо вважати, що аналогічно автоматом SyntA і SemA, в структурі автомата MorphA формування інформації також поділяється на дві структурні складові — «За» видачу TS («Селективність») та «Проти» неправильної видачі TS («Блокування»). Це дозволить контролювати якість роботи TS за смисловим сигналом $S_{TS}(t)$ аналогічно виділені раніше сигналам $S_{RPA}(t)$, $S_{ASNOM}(t)$, $S_{SCADA}(t)$ (рис. 1.6–1.8). Будемо орієнтуватись на розробку цифрових інформаційних смарт-датчиків TS із схемою GES_{TS} і граматику G_{TS} (3) для схеми GES_{RPA} (рис. 1.3). Датчики TS можуть брати участь в безпосередньому інформаційному забезпеченні схем GES_{ASNOM} , GES_{SCADA} згідно (3) (рис. 1.1, 1.4–1.5), а саме $G_{OCP} \approx G_{SCADA} = \Sigma G_{TS}$. З цього потоку інформації можна виділити окремий випадок отримання додаткової інформації в ланцюжку ОСР–RPA–Термінал для забезпечення вдосконалення алгоритмів розпізнавання складних ситуацій SN та реалізації їх в пристроях захисту від ОЗЗ і терміналу «Т-КНПС».

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СМАРТ-ДАТЧИКІВ. Схема GES_{TS} датчиків TS застосовується в узагальненій структурній схемі пристроїв RPA. На рис. 1.1 та 1.5 показано, поділ елементів схеми RPA на ієрархічно підлеглі автомати MorphA, SyntA, SemA. Видно, що схему RPA вдається явно розділити на автомати SyntA, SemA по відношенню до формування сигналу $S(t)$. Але на морфологічному рівні поділ елементів не однозначний (рис. 1.8). Це пов'язано з необхідністю поділу одного й того ж реле K , існуючого в реальній мережі, на дві частини вхідну (інформаційну) і вихідну (контакти). Те ж відноситься до порогового елементу ρN із гістерезисом і вихідними рівнями спрацювало–неспрацювало.

Відходячи з моделі ОСР і SN (рис. 1.6–1.8), що представлені в формі БІХ-фільтра, походять передумови до формування інформаційного сигналу $S(t) = 3a(t) - \text{Проти}(t)$ в автоматі MorphA і його елементах. Виділимо елементи схеми GES_{TS} , що відповідають за ці дві частини. На морфологічному рівні або в автоматі MorphA також застосовуються правила «За», «Проти» для формування різницевого сигналу $S_{TS}(t)$, необхідні для розпізнавання та для формування виходу TS. Правилами PS «За» описується зона пропускання вхідного сигналу фільтром і ширина петлі гістерезису порогового елемента ρN . Правилами PB «Проти» описуються зона не пропускання фільтра, рівень порогу спрацювання елемента ρN . Вхідна частина виділяє селективну інформацію і відфільтровує вихідну інформацію, не допускає самоходу.

Сукупність структурних елементів схеми GES_{TS} показана на рис. 1.8. У схемі GES_{TS} реалізується на одних структурних елементах ряд важливих частин схеми. Такими частинами є — гальванічна розв'язка, що перетворює сигнал на виході вимірювального трансформатора в потенційний сигнал для подальшої обробки в TS, перетворювач диференціального сигналу в вихідний сигнал TS із загальним потенційним виходом (аналогова земля). Схема включає цифрові фільтри, пороговий елемент ρN , час-імпульсний критерій для фільтрації короточасних подій, витримку часу для узгодження з іншими TS, об'єднавчий елемент 1 для реалізації кореневого символу.

Вхідні сигнали $U1$, $U2$ рис. 1.8 представляються в узагальненому вигляді

$$U1 = A \sin(\alpha), U2 = B \cos(\beta), \text{ де } \alpha = \omega t, \beta = \omega t + \varphi.$$

Згідно з правилами тригонометрії порівняння $U1$, $U2$ можна виконувати будь-яким з математичних дій «–», «×»

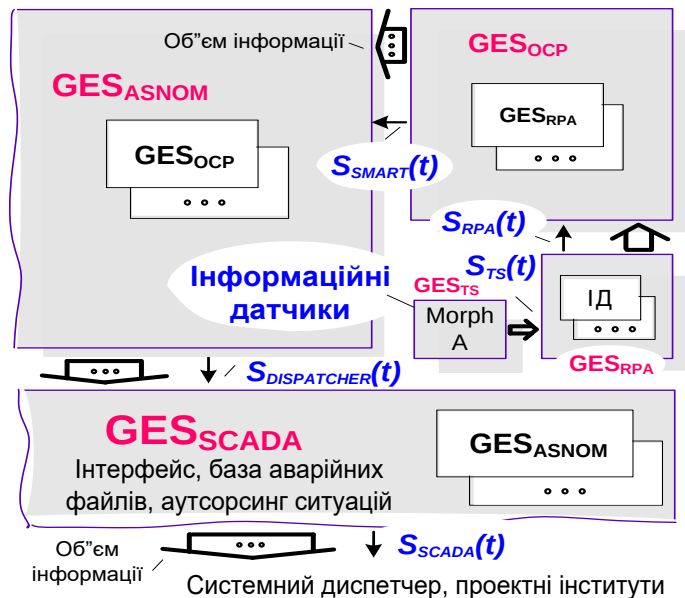


Рисунок 1.5 – Ілюстрація порівняння фіксованого обсягу сигналу $S(t)$ із наростанням обсягу в SCADA

$$U_S = U_1 \times U_2 = K_{AB} [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$$

при $\varphi = 0^\circ$ або

(4)

$$U_S = U_1 - U_2 = K_{AB} [\sin(\alpha - \beta)/2 + \cos(\alpha + \beta)/2]$$

при $\varphi = -90^\circ$.

Можна порівняти схеми GES наступним чином. Схема GES_{TS} відрізняється від схеми GES_{RPA} тим, що формування сигналу $S(t)$ та правил PS , PB відбувається в схемі динамічно і переважно послідовно. У схемі GES_{RPA} правила PS , PB формуються динамічно і переважно паралельно. Величини вагових коефіцієнтів KS , KB правил PS , PB можуть вибиратися достатньо довільно з початкового базового значення, наприклад $KS=5$. Величина вагового коефіцієнта K_{SB} кореневого символу $PsSB$ може бути будь-якою, оскільки при розрахунку коефіцієнта ефективності $K_{EFF} = K_S/K_Z$ його вплив самоусувається. Узагальнену схему GES_{TS} можна застосувати для синтезу TS, аналогічно розробленим в попередніх роботах схемах GES_{RPA}, GES_{ASNOM}, GES_{SCADA}. Схеми GES можна розглядати як «навігаційні» карти проходження сигнальної інформації або інформаційних складових. Так в залежності від завдання сигнали (4) замінюються на інформаційні складові відповідно до (3).

ВИМОГИ ДО СМАРТ-TS. Відомі алгоритми TS можна розділити умовно на «прості» і «складні», виходячи із завдань, цілей, способу отримання результатуючої інформації. Наприклад, алгоритми амплітудного детектування є найбільш «простими» TS, а алгоритми фазового детектування відносно дії з синхронним детектуванням «складними» TS. Під «складними» слід розуміти інтелектуальність алгоритмів. Далі будемо вирішувати завдання розвитку інтелектуальності алгоритму формування TS, як необхідні якості для досягнення стійкості роботи TS та якості розпізнавання ситуацій SN . Тому на перший план виходять вимоги до смарт-TS і завдання їх синтезу.

Вимоги до смарт-TS формуються виходячи з отримання кінцевого результату, яким може бути забезпечення повноти і якості перетворення вхідної інформації для роботи схем GES_{RPA}, GES_{ASNOM} и GES_{SCADA} — 1. Підвищення обсягу селективної і блокуючої інформації; 2. Підвищення інтелектуальності та якості формування TS; 3. Організація якості зняття первинної інформації із вимірювальних трансформаторів; 4. Реалізація вимог ПУЕ; 5. Єдині способи отримання інформації в різних каналах; 6. Мінімум конструктивних зв'язків. 7. Захист від перешкоджаючих складних ситуацій SN .

ЗАВДАННЯ ДО СИНТЕЗУ СМАРТ-TS. Слід зазначити, що якість перетворення інформації в TS походить із загально технічних завдань і реалізується, в тому числі, вбудованими в МК та ПЛІС апаратними блоками і визначається їх обчислювальною потужністю. КІХ-фільтри характеризуються відсутністю власних коливань, а також лінійність фазо-частотної характеристики. Дозволяють працювати з переривчастими, різко змінюваними сигналами при ОЗЗ, горінні дуги в місці ОЗЗ, КЗ, зміні ситуацій при розвитку ПП в ОСР. До завдань синтезу смарт-TS відносяться —

1) Пошук способів поділу загального обсягу інформації на складові, наприклад, багатоканальні TS «Знак спрямованості змінного вхідного сигналу»; 2) Удосконалення TS загального призначення для задіяння інформації на більш високих рівнях обробки інформації пристроїв RPA; 3) Розробка алгоритмів смарт-TS, в тому числі більш високого рівня обробки інформації (датчики екстремумів, частот, фаз, синхронізовані алгоритми обробки і ін.); 4) Використання відомих і розробка нових правил блокування PB «Проти» для підвищення якості розпізнавання певних TS; 5) Залучення накопичувальних алгоритмів для використання рідкісних, переривчастих інформаційних складових; 6) Реалізація цифрових дискретних датчиків прямого отримання виходу TS на основі задіяння певних тимчасових точок в послідовності КІХ-фільтрації; 7) Вибір відповідності діапазону амплітудних складових коливальних контурів ОСР згідно розрядності АЦП та необхідної точності для КІХ-фільтра; 8) Можлива організація ліній затримки сигналу TS для суміщення часів появи TS різних контурів при достовірності ресурсів МК; 9) Вибір параметрів цифрового фільтра (частота дискретизації, КІХ-фільтрів, число коефіцієнтів цифрового фільтра, форми АЧХ); 10) Інерція формування та власні коливальні процеси (тимчасова затримка в КІХ-фільтрах формування сигналів TS згідно загальній динаміці розвитку ПП в ОСР.

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ВІДОМИХ ДАТЧИКІВ TS ТА НОВИХ СМАРТ-TS. Виходячи із SI-методу, далі встановлюється відповідність різних інформаційних датчиків структурній схемі TS для В попередніх роботах єдність схем GES вдалося встановити для синтаксичного і семантичного рівнів пристроїв RPA, SCADA. Складається таблиця Ψ -структур TS. Для цього розглядаються алгоритми роботи відомих та нових інформаційних датчиків TS в пристроях RPA як результат моделювання в САПР та макетування, виконаних за допомогою SI-методу. Робота кожного TS розглядається у відповідному «Вікні селективності», яке формується автоматом блокування. Автомат блокування бере інформацію від інших коливальних контурів ОСР, а саме від більш і менш швидких (рис. 1.6). Це дозволяє віднести їх до схеми GES_{TS} і вдосконалювати в цих рамках. В якості автомата блокування тут мається на увазі два варіанти. Перший знаходиться в схемі GES_{RPA} і є правилами блокування PB (рис. 1.1). Другий знаходиться в GES_{TS} і теж є PB (рис. 1.8). Схеми GES_{TS} та GES_{RPA} знаходяться на різних ієрархічних рівнях. Такий поділ проявляється як послідовне формування структури сигналу $S(t)$ (рис. 1.5).

Для однакових структур, тобто тих, які мають тільки інформаційний вхід ($PS1, PS8, PS2$), а опорний сигнал ($PS3, PS9, PS4$) дорівнює 1 або 0 в залежності від реалізації порівнює елемента ($PS5, PS7$). Повторення елементів в загальному алгоритмі TS, вказується перерахуванням з відповідним множителем.

Далі приведені порівняльні параметри Ψ -структур TS, де $A < \Psi < Z$ та згруповані в Табл. 1.1. Узагальнений еквівалентний структурний схемі GES_{TS} відповідає Z-структура TS (рис. 1.8).

1. **A-структура TS.** Датчики «Знаки полувхиль струму $3i_o$, напруги $3u_o$ ». Елементарні, основні, амплітудні ненаправлені TS. Застосовується для правил PS спрямованого критерію схеми GES_{RPA} . Граматика G_A і ефективність TS

$$G_A = (PS1, PS8, PsSB, PB2, PB5, PsSB),$$

$$P_\Sigma = PSN + PBN = 5, K_\Sigma = \Sigma KSN + \Sigma KBN = 107 + 182 = 289, K_{EFF} = K_\Sigma / K_Z = 289 / 604 = 0.47;$$

2. **B-структура TS.** Датчик «Час-імпульсний критерій». Широко застосовується, наприклад, РТЗ-51. G10-структура RPA. Ненаправлений, амплітудний датчик. Використовуються для формування правил PB . Граматика G_B і ефективність TS

$$G_B = (PS1, PS8, PsSB, PB3, PB4, PB5, PB7, PsSB), P_\Sigma = 7, K_\Sigma = 107 + 250 = 357, K_{EFF} = 357 / 604 = 0.59;$$

3. **C-структура TS.** Датчики «Загального призначення від РВЦ» (фазних напруг мінімуму, максимуму, момент наростання-спадання по різниці двох точок, ін.). Граматика G_C і ефективність TS

$$G_C = (PS1, PS8, PsSB, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PsSB), P_\Sigma = 8, K_\Sigma = 107 + 267 = 374, K_{EFF} = 374 / 604 = 0.62;$$

4. **D-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «НЧС $3u_o15B, 30B$ » темп наростання НЧС $3u_o$. Датчик для формування «Вікна селективності». Контролюються порогами послідовного появи двох точок $3u_o$ за час тривалості «Вікна». Граматика G_D і ефективність TS

$$G_D = (PS1, PS7, PS8, PsSB, PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, PsSB), P_\Sigma = 9, K_\Sigma = 177 + 229 = 406, K_{EFF} = 406 / 604 = 0.67;$$

5. **E-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Коливальний контур для $3i_o$ з пам'яттю-забування». З урахуванням чотирьох варіантів, наприклад, з резонансним контуром і ін. Граматика G_E і ефективність TS

$$G_E = (PS1, PS2, PS7, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PsSB), P_\Sigma = 9, K_\Sigma = 172 + 274 = 466, K_{EFF} = 466 / 604 = 0.74;$$

6. **F-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Температура нагріву шунта» для сигналу $3i_o$. Відносного порівняння або площі сигналу ВЧС-СЧС $3i_o$ або потужності сигналу ВЧС-СЧС $3i_o$. Застосовується для правил PS . $G_F = (PS1, PS2, PS6, PS7, PS8, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PsSB), P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 270 = 507, K_{EFF} = 507 / 604 = 0.84;$

G-структура TS. Смарт-TS. Датчик «Послідовна різницю амплітуд ВЧС-СЧС $3i_o$ і НЧС $3u_o$ у «Вікні селективності». Застосовується для правил PS . $P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 297 = 534, K_{EFF} = 534 / 604 = 0.88;$

$$G_G = (PS1, PS2, PS6, PS7, PS8, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PsSB),$$

7. **H-структура TS.** Смарт-TS. Датчики «Розсинхронізація між складовими», наприклад, СЧС $3i_o$, НЧС $3u_o$, ВЧС-СЧС $3i_o$, СЧС $3i_o$ і ВЧС перешкод. Граматика G_H і ефективність TS

$$G_H = (PS1, PS3, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 204 = 441, K_{EFF} = 441 / 604 = 0.73;$$

8. **I-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Один ТТНП з додатковою обмоткою $3u_o$ і реле РТЗ-51». Спрямованої дії за рахунок датчика, АЗ-структура RPA, СЧС, НЧС $3i_o$ складова. Граматика G_I і ефективність TS

$$G_I = (PS1, PS3, PS5, PS7, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PsSB), P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 207 + 265 = 472, K_{EFF} = 472 / 604 = 0.78;$$

9. **J-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Два ТТНП з додатковою обмоткою $3u_o$ і реле РТЗ-51». Спрямований синхронний, бруківці для різних частотних складових (СЧС, НЧС), зовнішньої попередньої обробки інформації на основі спільної роботи двох трансформаторів струму $3i_o$. Розвиток I-структури TS. Два варіанти граматики G_J і ефективність TS

$$P_\Sigma = 18, K_\Sigma = 297 + 275 = 572, K_{EFF} = 572 / 604 = 0.95;$$

$$G_{J1} = (2 * \{PS1, PS2, PS8\}, PS3, PS4, PS6, PS7, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PB8, PsSB),$$

$$G_{J2} = (2 * \{PS1, PS8, PS2\}, 2 * \{PS3, PS9, PS4\}, PS5, PS7, PsSB, 2 * \{PB3, PB8, PB2\}, PB3, PB4, PB5, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 24, K_\Sigma = 317 + 305 = 622, K_{EFF} = 622 / 604 = 1.03;$$

10. **K-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Спрямований датчик НЧС-СП», М-структура RPA. Граматика G_K і ефективність TS

$$G_K = (PS1, PS3, PS4, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 14, K_\Sigma = 247 + 275 = 522, K_{EFF} = 522 / 604 = 0.86;$$

11. **L-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Двуфазне КЗ через землю», G-структура RPA. Розвиток K-структури TS. Граматика G_L і ефективність TS

$$P_\Sigma = 15, K_\Sigma = 247 + 292 = 539, K_{EFF} = 539 / 604 = 0.89;$$

$$G_L = (PS1, PS3, PS4, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

12. **Z-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Узагальнена структура TS». Граматика G_Z і ефективність TS

$$G_Z = (PS1, PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = PSN + PBN = 18, K_\Sigma = 307 + 297 = 604, K_{EFF} = K_\Sigma / K_Z = 604 / 604 = 1.0.$$

Аналіз таблиці (Табл. 1.1) показує, що порівняно з іншими Ψ -структурами RPA, SCADA Ψ -структури TS мають відносно малі відмінності значень сумарних коефіцієнтів селективності і блокування $\Sigma KSN, \Sigma KBN$ між різними Ψ -структурами TS. Це відбувається через малий обсяг інформації, яким оперує TS. Для розрахунків при рішенні задач слід задіяти послідовне з'єднання схем GES_{OCP} і GES_{TS} згідно рис. 1.1 і 1.3. І далі контролювати розпізнавання типових смислових ситуацій SN згідно послідовності з'єднання рис. 1.1—1.6—1.4—1.7—1.3—1.8. Тобто, контролюється проходження елементарних інформаційних складових ситуацій SN на виході TS морфологічного автомата MorphA. Також послідовність дозволяє відстежувати проходження

конкретної інформаційної складової від точки формування в GES_{OCP} до виходу, наприклад, в системі GES_{ASNOM} по GES_{SCADA} .

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз Ψ -структур датчиків TS

Блокування («Against», ΣKBM)	Селективність («За», «For», ΣKSN)									
	107	172	177	207	237	247	267	297	307	317
	182	A								
	204				H					
	229		D							
	250	B								
	265			I						
	267	C								
	270				F					
	274		E							
	275					K		J1		
	292					L				
	297				G				Z	
	305									J2

понад-повільні супер-НЧС контури, які за своєю суттю є інформаційними смисловими контурами. Супер-НЧС доповнюють об'єм смислових складових при розпізнаванні аналогічно високочастотним ВЧС. Пропонується модель ОСР, що дозволяє оперувати тільки смисловими складовими при вирішенні задач RPA. Смисловими складовими доцільно оперувати в рамках сучасних концепцій побудови розподільних електромереж різного класу напруги.

2. Запропоновано узагальнену структурну схему GES_{TS} для опису інформаційних датчиків TS в автоматі MorphA пристроїв RPA. Схема GES_{TS} отримана аналогічно схемам GES_{RPA} пристроїв RPA і GES_{ASNOM} , GES_{SCADA} що знаходяться на більш високих рівнях обробки інформації. Схема GES_{TS} доповнює цей ряд, представлений в попередніх публікаціях. Дозволяє описувати структуру простих і смарт-датчиків пристроїв RPA. Такий опис структури автомата MorphA є послідовним розвитком SI-методу.

3. Показано, що якість і обсяг оброблюваної інформації в датчиках TS контролюється за допомогою смислового сигналу $S_{TS}(t)$ і є результатом роботи складових морфологічного автомата MorphA пристроїв RPA. Тобто, при вирішенні задач аналізу, синтезу, конструювання в системі RPA, потрібно оперувати наявністю селективної і блокуючої частин в структурі TS або, те ж саме, правилами PS «За» і PB «Проти» формування результату спрацювання TS.

4. Складена схема GES_{TS} для інтелектуальних смарт-TS автомата MorphA. Вони необхідні для доповнення обсягу інформації в схемі GES_{RPA} у випадках «складних» смислових ситуацій SN. Для деяких алгоритмів RPA смарт-TS беруть участь як основні. В їх структурі виявляється синхронний смарт-детектор, що доповнює синхронний детектор схеми GES_{RPA} . Послідовне багатократне синхронне детектування виявилось ефективним одночасно по селективності і блокувочі. Смарт-TS можуть бути не тільки відносною, а і абсолютної дії, тобто одноканальним детектором. Структура відомого одноканального алгоритму часо-імпульсного критерію слід віднести до морфологічного ієрархічного рівня обробки інформації.

5. Наведено таблицю ієрархічної систематизації Ψ -структур інформаційних датчиків TS, де А– Ψ –Z. Таблиця отримана, аналогічно таблицям Ψ -структур пристроїв RPA, ASNOM, SCADA, які були раніше складені SI-методом. Вона дозволяє виконувати порівняння характеристик відомих і запропонованих Ψ -структур TS, цілеспрямований розрахунок змін, що вводяться для досягнення заданих показників стійкості роботи TS. Реалізується принцип вдосконалення структури пристроїв від «найбільш простого» до «відповідного задачі», що вирішується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ПО ЧАСТИНІ 1

1.1 Nikiforov A. (2015) *Unified smart-detector for electrical power smart grid networks*, 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, UK: 1032-1039, IEEE: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15, DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487.

1.2 Никифоров А. П. (2010) *Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты*, Научно-производственный журнал «Техническая электродинамика» и Материалы 10 науч.-техн. конференц. «ПЕ-2010». НАН Украины. Институт электродинамики, – Киев, – С.73-76, ISSN 1607-7970. URL: http://lib.nmu.org.ua/catalog/site/view.html?doc_id=407519. DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921.

1.3 Nikiforov, A. P. (2017) *Application of the Theorem of 'About the Unity of the Structural Description of RPA Devices' for the Simulation of a Power Network Smart-Grid*, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131, <http://journal.utem.edu.my/index.php/jtec/article/view/1831>.

1.4 Сивокобыленко В.Ф., Никифоров А.П., Колларов О.Ю., Кардаш Д.О. (2017) *Совершенствование токовой защиты от коротких замыканий в сети смарт-грид 6-35 кВ структурно-информационным методом. Часть 1. Анализ* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – №1(18). – С. 5–15. ISSN 2074-2630, DOI: 10.13140/RG.2.1.4106.2806, URL: [http://elin.donntu.edu.ua/department/collection/Zbirnyk_1\(18\)2017.pdf](http://elin.donntu.edu.ua/department/collection/Zbirnyk_1(18)2017.pdf)

1.5 Lysenko, V. (2017) *Feedback on installed experience with digital signal processing petersen coil regulator*. IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk m.ostrogradskyi national university, pp. 384-387, Ukraine. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248939.

1.6 Javadian, S., Massaeli, M. (2011) *An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network*. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

REFERENCES (PART 1)

1.1 Nikiforov A. (2015) Unified smart-detector for electrical power smart grid networks, 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, UK: 1032-1039, IEEE: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15, DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487.

1.2 Nikiforov, A. P. (2010) Theorem on the existence of semantic signal in relay protection systems, Zhurnal «Tekhnichna Elektrodynamika», PPE-2010, pp. 73-76, Kiev, Ukraine, DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921.

1.3 Nikiforov, A. P. (2017) Application of the Theorem of ‘About the Unity of the Structural Description of RPA Devices’ for the Simulation of a Power Network Smart-Grid, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131.

1.4 Thamilvalluvan, B., Aswini, P., AntoBennet, M., Dhiviya, K., Revathi, R., Steffi, T. (2016) A novel relay used for fault detection and isolation in distribution networks containing of several DGs, Int. Conf. ICEEOT, pp. 3574-3580, Tamil Nadu, India.

1.5 Lysenko, V. (2017) *Feedback on installed experience with digital signal processing petersen coil regulator*. IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk m.ostrogradskyi national university, pp. 384-387, Ukraine. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248939.

1.6 Javadian, S., Massaeli, M. (2011) An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

Надійшла до редколегії 27.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобыленко В.Ф.

В.Ф.СИВОКОБЫЛЕНКО¹, А.П. НИКИФОРОВ²,

¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Учебно-научный институт энергетики, автоматики и энергосбережения

Разработка обобщенной эквивалентной схемы морфологического уровня распознавания переходных процессов в распределительной электросети смарт-грид. Реализация современных концепций развития сетей, а именно «Смарт-грид», «Цифровая подстанция», «Цифровая ячейка», «Аутсорсинг служб» подразумевает передачу и осмысление большого количества информации о процессах, происходящих в электросети. Исследования показывают, что для устойчивости работы алгоритмов устройств релейной защиты и автоматики в распределительных сетях напряжением 6–35 кВ недостаточно объема входной информации. Восполнение недостатка объема черпается из возможностей интеллектуальных, поисковых алгоритмов распознавания, которые способны выделять смысловые состояния из сигналов процессов, происходящих в сетях. Сформирована обобщенная эквивалентная структурная схема информационных датчиков, описывающая морфологический автомат на начальном уровне структуры устройства. Предлагается способ получения дополнительной информации на основе последовательности шагов, а именно структурированного разделения информации, контроля прохождения элементарных информационных составляющих по структурным схемам объекта управления и защиты, далее устройств релейной защиты и автоматики, и на выход системы управления SCADA. Составлена сравнительная таблица структур датчиков.

Ключевые слова: смарт-грид, релейная защита и автоматика, защита от однофазных замыканий на землю, структурно-информационный метод, смысловой сигнал, распознавание образов, моделирование.

V.F. SYVOKOBYLENKO¹, A.P. NIKIFOROV²,

¹Donetsk National Technical University

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Educational and Scientific Institute of Power Engineering, Automation and Energy Saving

Development of generalized equivalent scheme of the morphological level of recognition of transient processes in the distribution smart-grid. The implementation of modern concepts of network development, namely “*Smart Grid*”, “*Digital Substation*”, “*Digital Cell*”, “*Outsourcing Services*” implies the transfer and understanding of a large amount of information about the processes occurring in the power grid. Studies show that for the stability of the algorithms of devices of relay protection and automation in distribution networks with voltage of 6–35 kV there is not enough amount of input information. Filling up the lack of volume is derived from the capabilities of intelligent, search-based recognition algorithms that are able to separate semantic states from process signals occurring in networks. A generalized equivalent block diagram of information sensors has been formed, describing the morphological automaton at the initial level of the device structure. A method for obtaining additional information based on the sequence of steps, namely, structured separation of information, control of the passage of elementary information components according to block diagrams of the control and protection object, then relay protection and automation devices, and the output of the SCADA control system is proposed. A comparative table of sensor structures has been compiled.

Keywords: *smart grid, relay protection and automatics, earth fault protection, structure-tour-information method, cordial signal, pattern recognition, simulation.*

УДК 621.713.13: 621.313

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.)¹,
А.П. НІКІФОРОВ (д-р техн. наук, доц.)²

¹Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», ²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

¹svf1934@gmail.com, ²a.p.nikiforov@i.ua

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 2. МОДЕЛЮВАННЯ

У Частині 1 розроблена узагальнена еквівалентна схема інформаційних датчиків пристроїв релейного захисту та автоматики. Розробку вдалось виповнити послідовно від верхнього ієрархічного рівня обробки інформації в системі до нижнього в пристрої. Складено ієрархічну систематизацію Ψ-структур відомих і нових інформаційних датчиків, що дозволяє оцінити відносну ефективність їх структур. В Частині 2 виповнено моделювання за допомогою послідовності розроблених схем проходження конкретної інформаційної сигнальної складової від точки формування в розподільній електромережі 6–35 кВ до виходу, наприклад, в системі SCADA. Оцінюється різниця формування селективності і блокування схем, тобто на самому початковому рівні структури пристрою. Цей рівень реалізується спільно на одних і тих же структурних елементах. Виявлено, що деякі відомі алгоритми пристроїв і терміналів, слід віднести до початкового морфологічного рівню обробки інформації. Тоді вони стають ефективними смарт-датчиками. Показана необхідність побудови смарт-датчиків. Ілюструється різниця в способах підвищення селективності і якості блокування між морфологічним і іншими ієрархічними рівнями.

Ключові слова: *смарт-грид, релейний захист та автоматика, захист від однофазних замикань на землю, структурно-інформаційний метод, смисловий сигнал, розпізнавання образів, моделювання.*

Вдосконалення відомих датчиків si-методом. Наводиться приклад опису трьох з Ψ-структур TS пристроїв RPA (Табл. 1.1). Опис складається з результатів моделювання, синтезу та вдосконалення, що виконані в САПР. Використані САПР «OrCAD» для аналого-імпульсної реалізації пристроїв RPA та середовище «Matlab» для цифрової і імпульсної реалізації. Досягнуто мінімізації інерції фільтрів.

В-структура TS. «Час-імпульсний критерій». Відноситься до групи TS «Блокування» або до правил PB «Проти». Критерій роботи «При перевищенні сигналом деякого амплітудного значення спрацьовування вихідного порога рN відбудеться при збігу тривалості перевищення сигналу над тривалістю відсутності». Критерій дозволяє ефективно усувати більш високочастотні коливання в сигналі, імпульсні короточасні події. Задіється в схемі GES_{TS} на увазі його ефективності при правильному налаштуванні часових параметрів. Для формування час-імпульсного критерію в схему GES_{TS} введені структурні елементи з правилами PB3–PB4, що знаходяться перед пороговим елементом рN (рис. 1.1–1.2).

Короткий опис структурної схеми TS. Складається з вхідного смугового фільтру, порогового амплітудного формувача для час-імпульсного критерію, порогового детектора із гістерезисом і елементом зміщення для забезпечення високої чутливості до спрацьовування порога рN. Компаратор PB3 перетворює амплітуду вхідного сигналу в ШІМ-сигнал з подальшою демодуляцією фільтром PB4, а також правилом PB5 вихідного порога рN. Реалізовано, наприклад, в реле РТЗ-51, призначеного для завдання про пошук пошкодженого приєднання мережі при ОЗЗ (рис. 2.1–2.2). Видно, що після завершення часу спрацювання $T_{СП}$ робота часо-задаючого ланцюжка триває, тобто при наступних пробоях ОЗЗ час $T_{СП}$ буде скорочуватися. Це критично при смисловій ситуації SN «Зміна приєднань ОЗЗ», «Зміна SN з перешкодою ОЗЗ». Показано сигнали тієї ж SN в стислому масштабі у вікнах на рисунках для пошкодженого і неушкодженого ділянок ОСР. У вікнах показана зміна фазових співвідношень ВЧС–СЧС по відношенню до НЧС на зворотну (рис. 2.3–2.4). Це призводить до затягування роботи часоздаючого ланцюжка на пошкодженому приєднанні до наступного напівперіоду ОСР. Тоді розрахований позитивний вплив правила PB зменшується. При тривалій дії SN «Перешкодова» можливо помилкове спрацьовування TS. Для усунення цього ефекту роботу RC-ланцюжка також слід обнулювати після спрацьовування TS.

На рис. 2.3 показана робота TS для неушкодженого приєднання ОСР. Видно, що при ВЧС–СЧС на початку ОЗЗ відбувається спрацьовування компаратора. Час їх дії короточасний і правило PB «Час-імпульсний критерій» не дозволяє TS спрацювати хибно. Однак, при складних, тривалих SN «Пробой ОЗЗ на кожному періоді», «Зміна SN» можлива помилкова робота TS. Для усунення цього ефекту слід задіяти PB «Вікно

селективності». «Вікно» відкривається після дії ВЧС–СЧС і закривається після спрацювання TS і по зниженню $3_{\text{ио}}$.

I-структура TS. Спрямований смарт-TS «Один ТТНП $3_{\text{ио}}$ із додатковою обмоткою $3_{\text{ио}}$ спільно із реле РТЗ-51». Датчик відноситься до групи TS «Селективність». Використовується метод синхронного детектування, при якому синхронний детектор частково реалізований на двох ТТНП. Синхронізуючим є сигнал $3_{\text{ио}}$, зміщений на невеликий кут. Конструктивна реалізація TS виявляється рознесеною і розділеною на дві частини — перша знаходиться поруч з ТТНП, формує імпульсний більший сигнал і передає в контролюючу частину реле. Може застосовуватися одинарна і подвійна схеми синхронного детектора.

Критерій роботи «Збільшення обсягу інформації для селективного пошуку задіянням властивостей і параметрів двох вимірювальних трансформаторів струму ТТНП». Амплітуда і площа сформованого імпульсу має більший обсяг інформації. Формується більш виражений направлений селективний сигнал із наявної сукупності складових і перешкод. В результаті вихідний сигнал синхронного детектора виявляється у вигляді більш чітко вираженого імпульсу, полярність якого визначає пошкоджену ділянку ОСР.

Такий TS не має правил блокування РВ. Для додавання РВ можна застосувати час-імпульсний критерій. Так для реалізації час-імпульсного критерію з накопичувальним алгоритмом СЧС-датчика $3_{\text{ио}}$ можна використовувати реле РТЗ-51 без вбудованого трансреактора. Схема TS сформована і досліджена в САПР «OrCAD». Розрядні і зарядні складові відфільтровуються.

J-структура TS. Спрямований смарт-TS «Два ТТНП $3_{\text{ио}}$ із додатковою обмоткою $3_{\text{ио}}$ спільно із реле РТЗ-51». Є розвитком I-структури TS. Одним з варіантів схеми TS може бути принципова схема, побудована на трансформаторах з датчиком Холла. Реалізована за схемою балансного детектора з формувачем виходу U_s (рис. 2.1). Вхідні сигнали U_1 , U_2 представлені в узагальненому вигляді.

Дія «+» реалізована на елементах R_{73} , R_{74} , R_{15} . Коливальна складова усувається RC-фільтром R_{73} , R_{74} , R_{16} . Таким чином, два джерела сигналів результуючий сигнал, якщо один з джерел видає сигнал, при цьому інше джерело сигнал не видає. Видача джерелом сигналу залежить від фазіровки вхідних обмоток трансформатора струму. Так обмотка $3_{\text{ио}}$ включена зустрічно по відношенню до обмотці $3_{\text{ио}}$ на різних трансформаторах K_1 , K_2 .

Модель датчика Холла в САПР сформована на основі моделі трансформатора. Датчик має вбудовану схему посилення. У моделі це реалізовано операційним підсилювачем, що знаходиться між двома моделями трансформатора. Диференціальна схема формування вихідного сигналу TS із джерелом живлення, реалізована також на фізичній моделі мережі. Виготовлена фізична модель такого пристрою. Однак схема TS має намотувальні елементи, що робить схему більш трудомісткою у виготовленні та відносно громіздкою, що вимагає джерела живлення. Однак інші елементи гальванічної розв'язки (датчики Холла, сигнальні трансформатори, трансреактори) також мають обмотки. Елементи «постійної» складової « $\sin(\alpha)$ », реалізовані на елементах — вихідні обмотки датчиків Холла K_1 , K_2 , мости, випрямні, навантаження R_{15} , R_{29} .

Отримані загальні результати. Для подальшої реалізації інформаційних датчиків TS пристроїв RPA на МК-основі використовуються послідовність двох схем GES_{TS} (рис. 1.8) і GES_{RPA} [1.4]. Структура ОСР описується граматиками G розпізнавання алгоритмів пристроїв RPA та датчиків TS. Обрані Ψ -структури TS (Табл. 1.1, Табл. в [1.1, 1.4]) для контролю ряду контурів ОСР згідно із схемою $GES_{ОСР}$. Для реалізації додаткових TS в морфологічному автоматі схеми GES_{RPA} обрана J2-структура TS. Ця структура ефективніше Z-структури TS (Табл. 1.1). Це сталося завдяки залученню селективних елементів схеми GES_{TS} кілька разів, а саме для Z-структури TS коефіцієнт ефективності $K_{EFF}=1$ при сумарному коефіцієнті $K_{\Sigma}=604$ і число правил $P_{\Sigma}=7$. Для J2-структури TS коефіцієнт $K_{EFF}=1.03$ при сумарному коефіцієнті $K_{\Sigma}=622$.

Для порівняння ефективності запропонованих рішень візьмемо широко відоме реле РТЗ-51. Порівняння виконується для схем GES_{TS} та GES_{RPA} по (Табл. 1.1 і рис. 1.8). У кожній таблиці Ψ -структур TS, RPA та SCADA [1.1, 1.4] приведена структура реле РТЗ-51. Це стало можливо через те, що структуру РТЗ-51 можна інтерпретувати як «просте» реле або в якості амплітудного додаткового TS. Структура РТЗ-51 відповідає В-структурі TS (Табл. 1.1). Її ефективність складається із сумарних вагових коефіцієнтів $K_{\Sigma}=357$, коефіцієнта $K_{EFF}=0.59$ і числа правил $P_{\Sigma}=7$. Додатково в порівнянні із запропонованою в цій роботі J2-структурою TS, у якій коефіцієнт ефективності $K_{EFF}=1.03$ при сумарному ваговому коефіцієнті $K_{\Sigma}=622$. Тобто запропонована J2-структура TS на $1-0.59=0.41$ плюс 3% або на 44% ефективніше реле РТЗ-51. Структура РТЗ-51 відповідає G7-структурі RPA (Табл. 1.1).

Ефективність двох G7- і Z-структур RPA становить G7-структура RPA з $K_{\Sigma}=309$, $K_{EFF}=0.18$, $P_{\Sigma}=9$, а Z-структура RPA $K_{\Sigma}=1672$, $K_{EFF}=1$, $P_{\Sigma}=42$. Тобто запропонована в [1.4] Z-структура RPA на $1-0.18=0.82$ або на 82% ефективніше реле РТЗ-51.

При розробці нових алгоритмів чи пристроїв RPA та систем аналогічно вибирається Ψ -структура TS для морфологічного автомата схеми GES_{RPA} в [1.1, 1.4]. Вибір повторюється для всіх важливих контурів ОСР (рис. 1.6). Так для СЧС-контур ОСР спільна робота J2-структури TS і Z-структури RPA буде виконувати двічі множення $3_{\text{ио}}$ і $3_{\text{ио}}$. Один раз в схемі TS, другий раз в схемі RPA. У пристрої можна реалізувати спільну роботу J2-структури TS і Z-структури RPA для НЧС-контур ОСР. Моделювання такої послідовності багатократного синхронного детектування запропонованих структур показує, що якість формування спрямованого селективного сигналу зростає при поліпшенні відмінності сигналів для пошкодженої ділянки ОСР від сигналів непошкоджених ділянок. Тоді обсяг селективної інформації зростає.

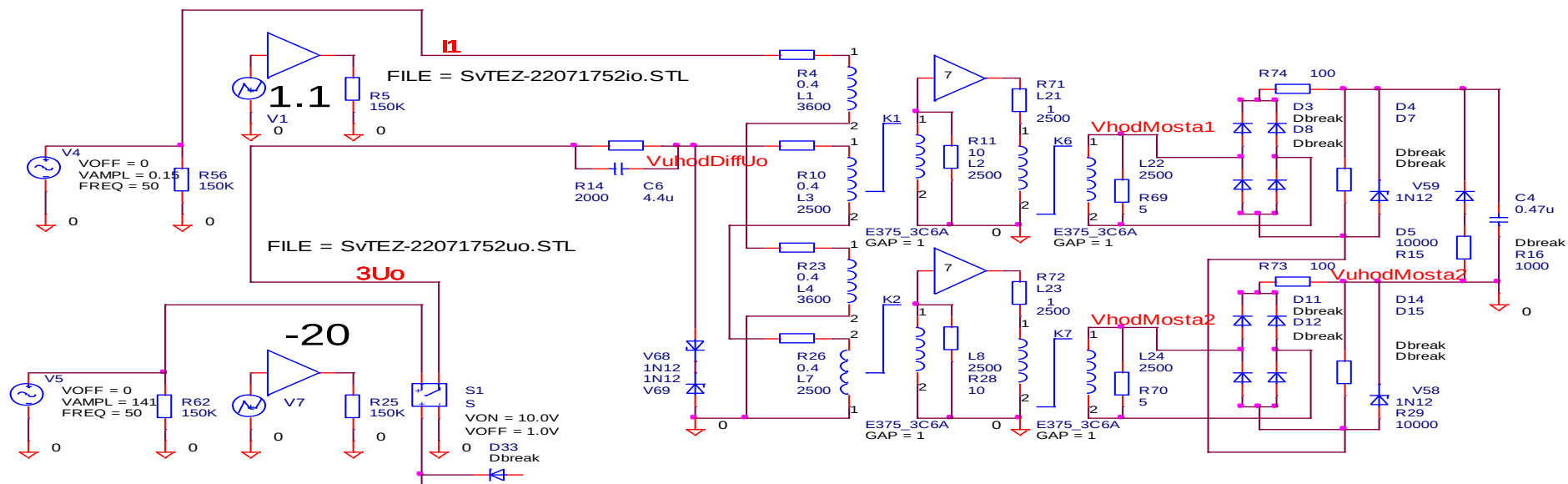


Рисунок 2.1 – *I-, J-структура TS. Направлений смарт-TS «1 і 2 ТТНП 3іо з додатковою обмоткою 3іо без реле» з параметрами для промислової частоти*

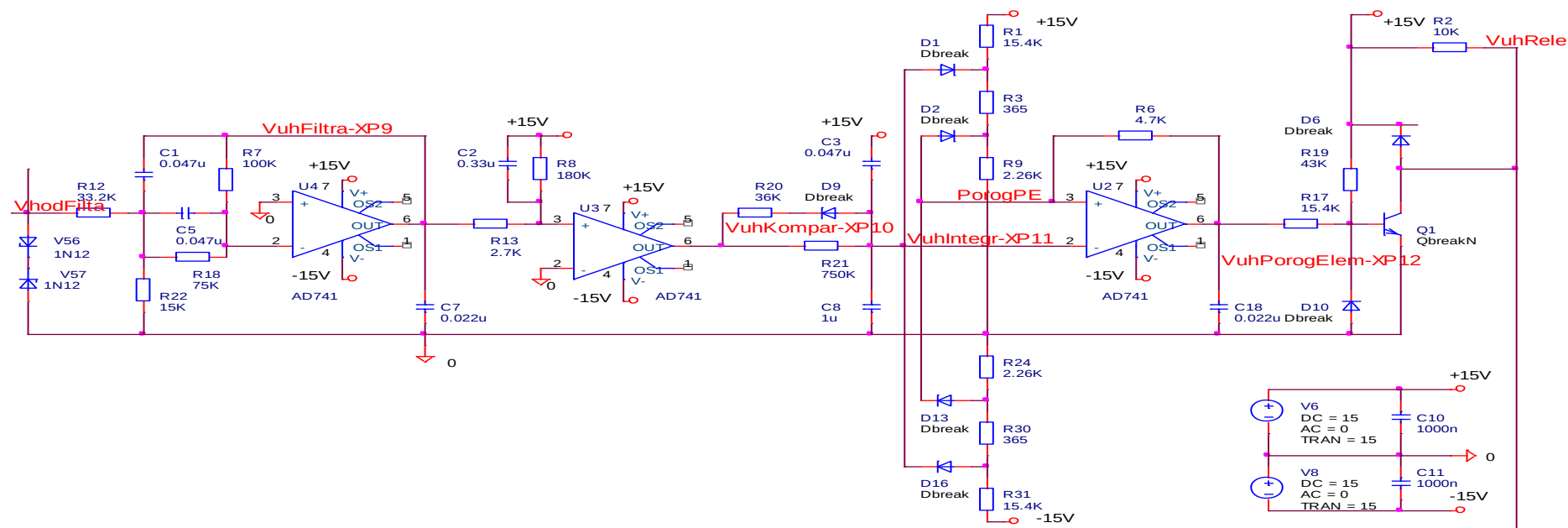


Рисунок 2.2 – *B-структура TS. Ненаправлений TS «Час-імпульсний критерій». Принципова схема реле PTЗ-51 з новими параметрами для промислової частоти*

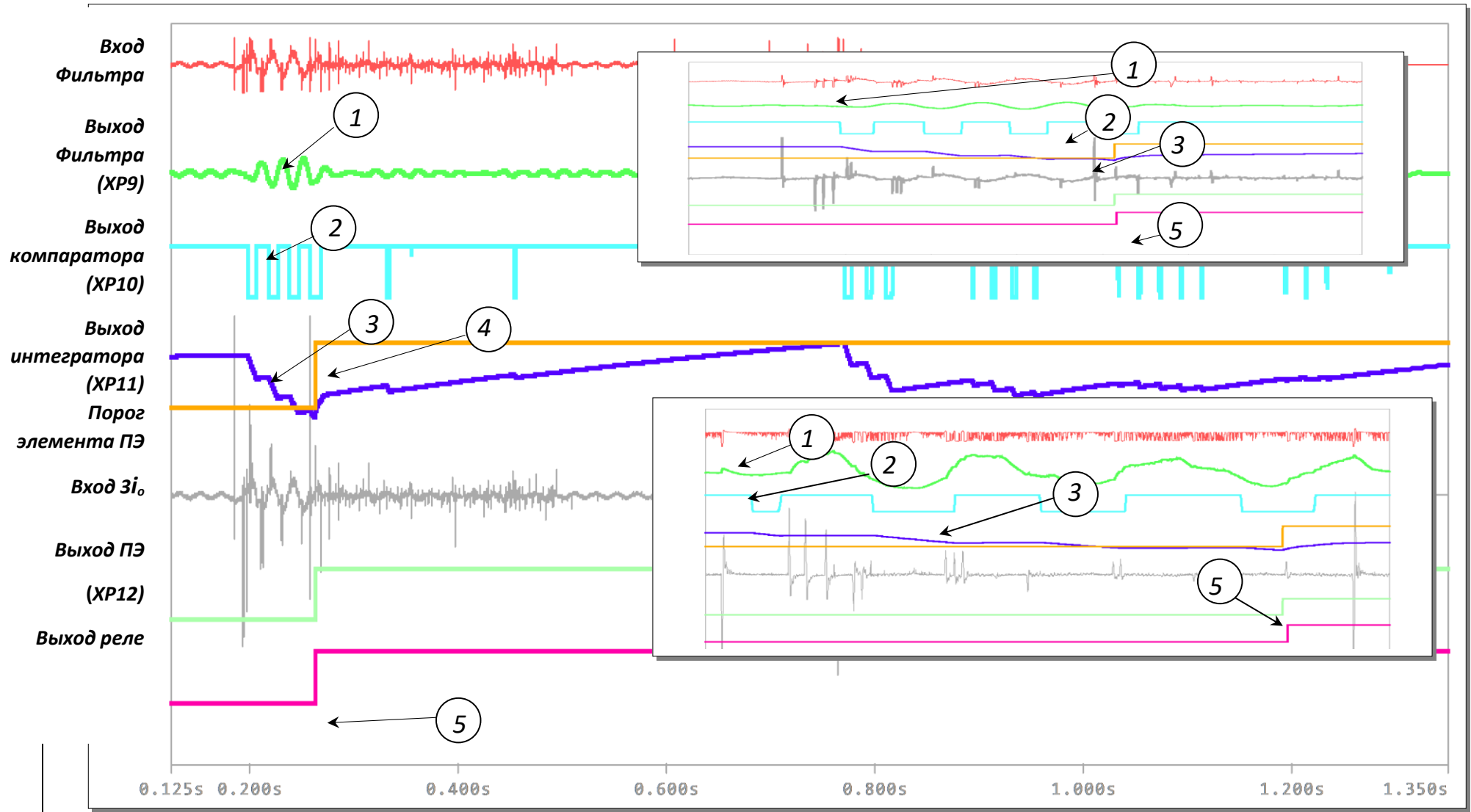


Рисунок 2.3 – Кар'єрна мережа, $I_c=4A$. «Короткочасне металеве ОЗЗ». Моделювання роботи датчика для J-структури TS з реле РТЗ-51. Для реального сигналу смислової SN «Короткочасне металеве ОЗЗ». Сигнали для пошкодженої ділянки мережі. Моделювання роботи реле з новими параметрами для промислової частоти. Сигнали пошкодженого ($K_u = 0.000127$) і неушкодженого приєднань ($K_u = 0.005$) мережі. Ефективна фільтрація ВЧС $3i_0$ (див. Т1). Селективне Зведення реле (див. Т2). Час контролю часо-імпульсного критерію роботи реле (див. Т3). Селективне спрацювання порога pN (див. Т4). Правильна видача сигналу про спрацювання реле (див. Т5)

Застосування. Теоретичні результати роботи, що отримані можливо використати для задач реалізації аутсорсингових робочих місць, впроваджувальних підприємств, підвищення ефективності роботи експертів, вдосконалення та розвиток електротехнологій, застосування у навчальному процесі університетів. Практичні результати можна використати для модернізації існуючих реле та вдосконалення і розробки нових алгоритмів мікропроцесорних терміналів. Вдосконалення пристроїв для задач розпізнавання перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю на єдиному інформаційному полі системи SCADA. Для побудови смарт-датчиків, вдосконалюємих пристроїв «П-ВЦР-СП» або «P-VCR-SP» захисту від однофазних замикань на землю з функціями височастотного реєстратора і селективного пошуку пошкодженої ділянки мережі 6–35 кВ, обрані найбільш ефективна J2-структура TS із Z-структурою RPA. Графічне представлення інформації може бути реалізовано на основі віджета «B-KHPC» або «W-LZSC» — віконного уявлення роботи терміналу «T-KHPC-APK» або «T-LZSC-ARC» та системи ASNOM «KHPC» на дисплеї комп'ютера АСУ ТП «ГЩУ» [1.1–1.4].

Висновки по частині 2

1. Моделювання в САПР показує, що «прості» пристрої RPA не обробляють увесь обсяг інформації, що є на їх входах. Це одна з причин нестійкості роботи пристроїв RPA. Усунути малу ефективність можна на основі аналізу отриманих таблиць Ψ -структур TS і RPA. Аналіз виявив, що структури RPA, які знаходяться на початку таблиці повинні бути доповнені логічними правилами обробки інформації, але при їх перенесенні в таблицю Ψ -структур TS вони стають найбільш ефективними смарт-датчиками TS. Логічні правила при цьому будуть реалізовані всією схемою GES_{RPA} . Показано, що найбільш якісними Ψ -структурами TS є смарт-датчики відносної (синхронної) дії. Структурні схеми таких датчиків наближаються до «простих» пристроїв RPA. У цій роботі таблиця Ψ -структур TS використовується для аналізу і синтезу смарт-датчиків TS.

2. На основі моделювання роботи схем GES_{TS} і аналізу таблиці Ψ -структур TS показано, що TS, в тому числі і смарт-TS, часто виявляються не основними, а додатковими селективними датчиками TS. Це відбувається через обмеженість числа правил PS , PB в їх структурі, отже, недостатності вихідної інформації для стійкої роботи TS і пристроїв RPA. Запропоновані схема GES_{TS} і таблиця Ψ -структур TS стають доказовою базою одного з висновків SI-методу. Цей висновок показує необхідність застосування якомога більшого числа TS різної дії і способів отримання вихідної інформації про роботу розподільчої мережі.

3. Наведено приклад опису структур ряду TS, а також результатів їх математичного моделювання роботи в мережі, що отримані в САПР «OrCAD», «Matlab». Призначені для селективних пристроїв RPA захисту від ОЗЗ в розподільній мережі 6–35 кВ. Найбільш ефективна структура отримана на основі аналізу сигналів реальних ПП в мережі. Показані сигнали ПП з коментарями до їх змін в контрольних точках TS. Вказані переваги і недоліки. Складено «Вікна селективності» роботи таких смарт-TS.

4. Виконано синтез структури алгоритму TS і RPA для подальшої реалізації на мікроконтролерній основі. Вибір найбільш ефективних Ψ -структур виконувався згідно з таблицями для TS, RPA, SCADA. Для додаткових TS морфологічного автомата схеми GES_{RPA} обрана J2-структура TS. Ця структура ефективніше Z-структури TS. Для наскрізного порівняння рішень взято широко відоме реле РТЗ-51. Структура реле РТЗ-51 наведена в кожній таблиці Ψ -структур. J2-структура TS на 44% ефективніше реле РТЗ-51, а Z-структура RPA на 82% ефективніше РТЗ-51.

5. Практичні результати, отримані при моделюванні, можуть бути використані для усунення зазначених ефектів в пристроях RPA. Наприклад, для модернізації струмових реле з часо-імпульсним критерієм, що реалізований у статичних реле РТЗ-51, РТ-11–РТ-15, а також сучасних програмних алгоритмах терміналів RPA, в яких такий алгоритм роботи застосовується. Адже відомо, що алгоритми деяких терміналів RPA реалізують алгоритми відомих реле, отже, і успадковують недоліки їх роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ПО ЧАСТИНІ 2

- 2.1 Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtaci, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, Energies, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.
- 2.2 Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, Rural Electric Power Conference (REPC), IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.
- 2.3 Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power, Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.
- 2.4 Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.
- 2.5 El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

REFERENCES (PART 2)

- 2.1 Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtaci, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, Energies, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.
- 2.2 Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, Rural Electric Power Conference (REPC), IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.
- 2.3 Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.
- 2.4 Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.
- 2.5 El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

Надійшла до редколегії 30.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

В.Ф.СИВОКОБЫЛЕНКО¹, А.П. НИКИФОРОВ²,

¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Учебно-научный институт энергетики, автоматики и энергосбережения

Разработка обобщенной эквивалентной схемы морфологического уровня распознавания переходных процессов в распределительной электросети смарт-грид. В Части 1 разработана обобщенная эквивалентная схема информационных датчиков устройств релейной защиты и автоматики. Разработку удалось выполнить последовательно от верхнего иерархического уровня обработки информации в системе до нижнего в устройстве. Составлена иерархическая систематизация Ψ -структур известных и новых информационных датчиков, позволяет оценить относительную эффективность их структур. В Части 2 выполнено моделирование с помощью последовательности разработанных схем прохождения конкретной информационной сигнальной составляющей от точки формирования в распределительной электросети 6–35 кВ до выхода, например, в системе SCADA. Оценивается разница формирования селективности и блокировки схем на самом начальном уровне структуры устройства. Этот уровень реализуется совместно на одних и тех же структурных элементах. Обнаружено, что некоторые известные алгоритмы устройств и терминалов, следует отнести к начальному морфологическому уровню обработки информации. Тогда они становятся эффективными смарт-датчиками. Показана необходимость построения смарт-датчиков. Иллюстрируется разница в способах повышения селективности и качества блокировки между морфологическим и другими иерархическими уровнями.

Ключевые слова: *смарт-грид, релейная защита и автоматика, защита от однофазных замыканий на землю, структурно-информационный метод, смысловой сигнал, распознавание образов, моделирование.*

V.F. SYVOKOBYLENKO¹, A.P. NIKIFOROV²,

¹Donetsk National Technical University

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Educational and Scientific Institute of Power Engineering, Automation and Energy Saving

Development of generalized equivalent scheme of the morphological level of recognition of transient processes in the distribution smart-grid. Part 2. Modelling. In Part 1, a generalized equivalent circuit of information sensors of devices for relay protection and automation is developed. The development was able to be performed sequentially from the upper hierarchical level of information processing in the system to the lower in the device. A hierarchical systematization of the Ψ -structures of known and new information sensors has been compiled, which makes it possible to evaluate the relative effectiveness of their structures. In Part 2 modeling was performed using a sequence of developed schemes for passing a specific information signal component from the point of formation in a 6–35 kV distribution network to output, for example, in a SCADA system. Estimated difference in the formation of selectivity and blocking circuits at the very initial level of the structure of the device. This level is implemented jointly on the same structural elements. Found that some well-known algorithms of devices and terminals should be attributed to the initial morphological level of information processing. Then they become effective smart sensors. The necessity of building smart sensors is shown as well. The difference in ways of increasing the selectivity and quality of blocking between the morphological and other hierarchical levels is also illustrated.

Keywords: *smart grid, relay protection and automatics, earth fault protection, structure-tour-information method, cordial signal, pattern recognition, simulation.*

Д.О. ОСТРЕНКО, (аспірант)
О.Ю. КОЛЛАРОВ, (канд. техн. наук, доцент)
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
ostrenko-dmitry2013@yandex.ua

ВИБІР ТА РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ЗАДЛЯ ПОШУКУ ЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОКОЛЕСА

Як відомо в [1] нейронна мережа може слугувати в якості підтримки значення максимальної потужності. В роботі приведено приклад застосування нейронної мережі для пошуку значення точки максимальної потужності в системі електроживлення з альтернативним джерелом енергії (вітрогенератором). Основною особливістю побудованої нейронної мережі є її структура. Нейронна мережа–багатошарова (перші два шари мають функцію активацію - гіперболічний тангес, а третій – лінійну функцію). Для успішного інтегрування мережі в систему було розглянуто процес навчання НМ, побудову її виконано в прикладному пакеті Matlab.

Ключові слова: вітрогенератор, вде, точка максимальної потужності, matlab, вах, багатошарова нейронна мережа, зворотній зв'язок, моделювання, smart grid, оптимізація, вагомні коефіцієнти, біас, автономна система електроживлення, алгоритм.

Мета роботи – обрати архітектуру та розробити нейронну мережу, яка мала б структуру контролю за потужністю в автономній системі електроживлення, з метою забезпечення її максимальної ефективності.

В роботі [1] вже зазначалось, що через нестабільність та важкість в експлуатаванні сучасних централізованих систем електроживлення, все більше йде перехід до автономних або розподілених систем електричного живлення.

Сучасна система управління розподілом електроенергії допомагає забезпечити баланс, необхідний для надійної експлуатації різних джерел електроенергії, в умовах безперервної зміни рівня споживання та топології мережі розподілу електроенергії.

Вітроенергетика – галузь енергетики, що спеціалізується на перетворенні кінетичної енергії повітряних мас в атмосфері в електричну або інші види енергії зручні для використання.

Виходячи з Національного плану з розвитку відновлюваних джерел енергетики, до 2020 року Україна планує збільшити значення встановленої вітрової потужності до майже 2,3 ГВт. За даними на кінець 2017 року цей показник становив близько 600 МВт.

У той же час електроенергія в об'єднаній енергетичній системі України по «зеленому» тарифу була поставлена в розмірі 274 МВт вітроенергетичних потужностей. Також вітростанції поставили в мережу 970,5 млн. кВт*год електроенергії, за даними анкетування виробників вітрової електроенергії. В 2017 році обсяг виробленої за рахунок енергії вітру електроенергії було достатньо, щоб покрити енергетичні потреби понад 200 тисяч українських домогосподарств (при середньому споживанні 400 кВт*год/місяць).

В останні роки великими темпами розвивається концепція інтелектуальної єдиної енергосистеми (Smart Grid). Концепції такої системи являють собою ідею майбутніх енергосистем, в якій передавальна і розподільна електрична мережа використовується для двохсторонніх комунікацій між електричними станціями, споживачами та центром управління. Це робиться з метою оптимізації процесів електричного постачання та споживання електроенергії, для підвищення їх ефективності.

Концепція «Розумної» системи базується на принципах сумісності та реалізації з протоколом Internet. Концепція розумної енергосистеми має наступні цілі:

- надання споживачу можливості автоматизованого управління і використання, мінімізація витрат на оплату електроенергії;

- самовідновлення систем у разі аварії, використання високоякісних енергетичних ресурсів, включаючи поновлювані;

- підвищення якості електроенергії, надійність постачання;

Як зазначалось на початку, головне в роботі застосувати нейронну мережу для пошуку точки, що дорівнює значенню максимальної потужності.

Варто ще раз нагадати як вирішується будь-яка задача за допомогою ШНМ за етапами:

- 1) Формування задачі та прогнозування практичних дослідів;
- 2) Опис об'єкта;
- 3) Аналіз доцільності використання НН для поставлених цілей;

- 4) Розробка моделі, яка включає нейронну мережу;
 - 5) Вибір архітектури нейронної мережі, яка б відповідала поставленим цілям;
- Потужність вітроколеса можна розрахувати за наступною формулою [3]:

$$P_{\text{вітрокол}} = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

Структурна схема розробленої штучної нейронної мережі має вигляд показано на рисунку 1. На ній вхідні параметри позначені векторами V та λ . Ці позначення відповідають фізичним значенням рівню сонячної інсоляції та температурі, що надходить на фізичну сонячну панель. Вихідною змінною є значення, що відповідає напрузі при максимальній потужності.

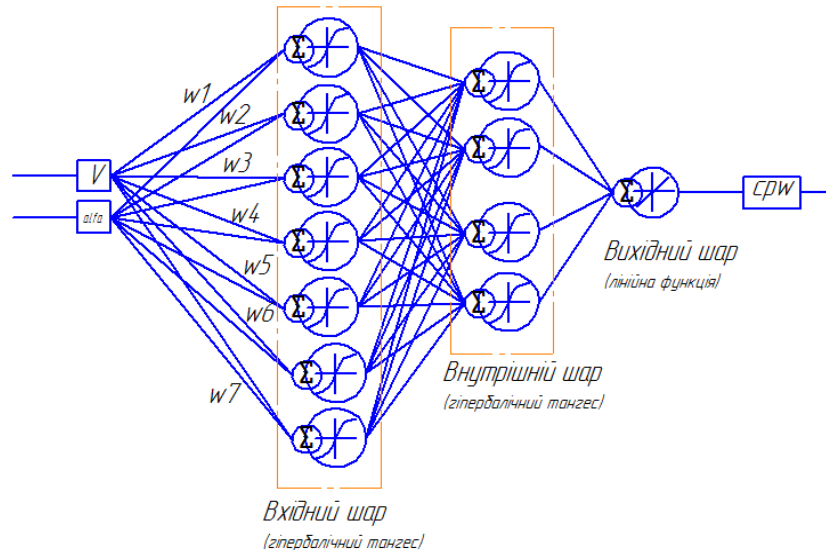


Рисунок 1 – Структурна схема нейронної мережі, деталізована схема функції активації

Для розуміння процесів, що проходять у вітроколесі побудуємо функціональну схему зображену на рисунку 2.

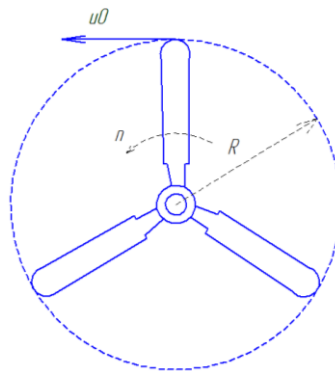


Рисунок 2 – Функціональна схема вітроколеса

В нейронній мережі велике значення має функція активації. Функція активації необхідна для нормалізації вхідних даних. Це означає що, якщо на вході буде велике число, пропустивши його через функцію активації, вихід нормалізується у потрібному діапазоні. В даній роботі побудована нейронна мережа з використанням сигмоїдної та лінійної функції[1].

$$y = \frac{1}{1 + e^{-c \cdot S}} \quad (1)$$

Саму ж нейронну мережу в загальному вигляді, можливо представити у вигляді формули:

$$y = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x + b_i$$

Під час навчання навчання була досягнена точність, яка відповідає початковим умовам. Зміна помилки при навчанні показана на рисунку 3.

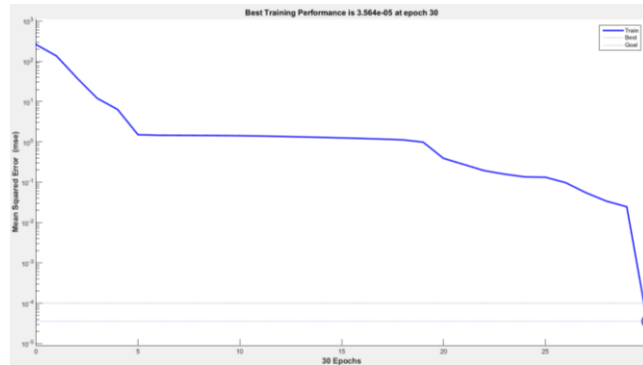


Рисунок 3 – Зміна помилки

Отримавши вагові коефіцієнти та значення біасу, була побудована нейронна мережа в системі Матлаб виглядає наступним чином:

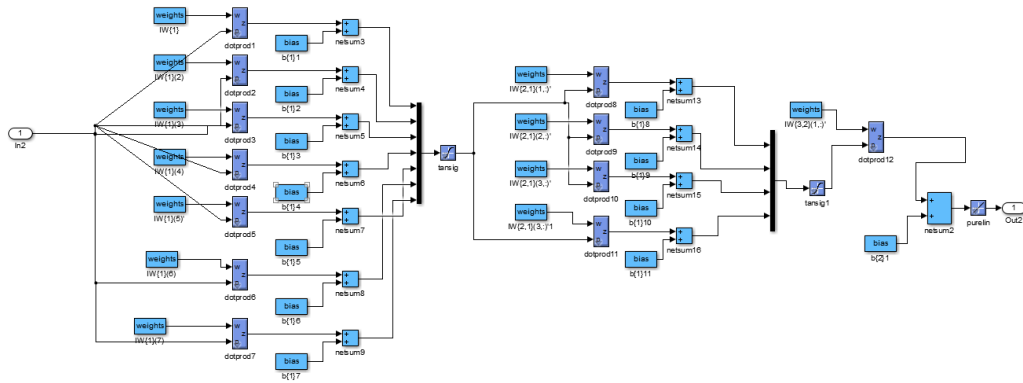


Рисунок 4 – Побудована нейрона мережа

Побудовану нейронну мережу необхідно інтегрувати в систему регулювання положення вітроколеса. На рисунку 5 саме представлена НМ впроваджена в систему підпорядкованого керування вітроколеса з ПІ-регулятором швидкості та ПІ-регулятором струму.

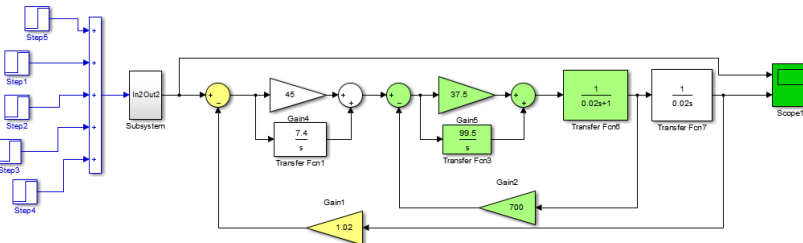


Рисунок 5 – Побудована система регулювання вітрогенераторам

Для навчання нейронної мережі (рисунк 4) використовувалась модель, що була розроблена в [5] та побудована шляхом написання скрипту і промодельована на рисунку 6.

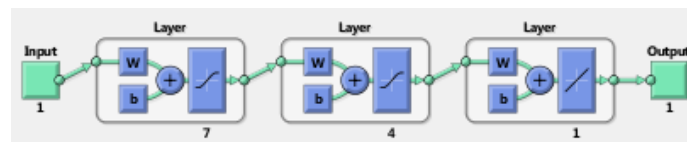


Рисунок 6 – Модель для знаходження вагових коефіцієнтів та біасу

Промодельовавши отримуємо результат, що представлено на рисунку 7

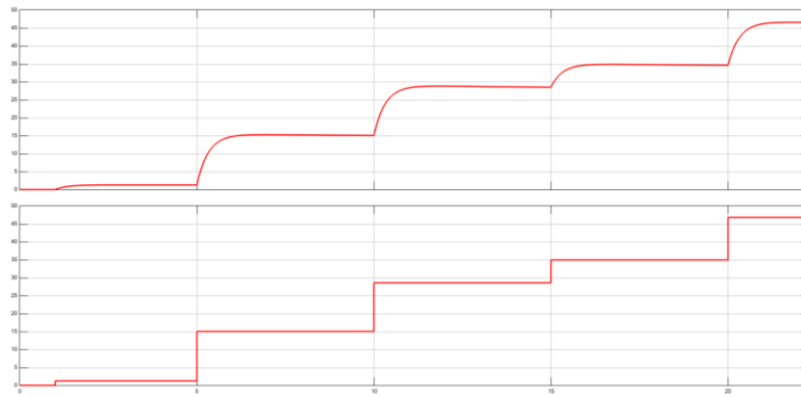


Рисунок 7 – Результати моделювання, нижній графік вихід з нейронної мережі, верхній – вихід в контури швидкості

Вхідними даними слугує поверхня побудована на рисунку 8.
(P, w, V)

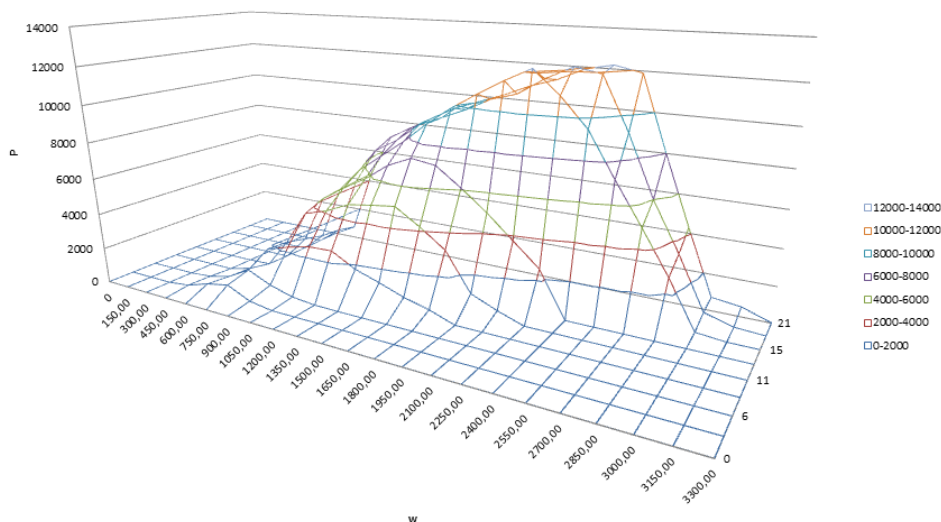


Рисунок 8 – Поверхня максимальної потужності

Висновки: В даній роботі була розроблена та промодельована нейронна мережа для пошуку максимального значення механічної потужності вітроколеса. Дана мережа багатошарова, для її побудови використовувалися коефіцієнти ваги та біаси отримані опитним шляхом.

Дана мережа враховує змінення коефіцієнтів, а значить вона може перенавчатися. Ця властивість дуже корисна, коли в реальному обладнанні з'явиться помилка, що виникла через старіння обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розробка нейронної мережі з характеристиками mppt контролера. Остренко Д.О.,
2. Електронний ресурс: <https://ecotechnica.com.ua/energy/veter/3219-moshchnost-vetroenergetiki-ukrainy-prevysila-500-mvt.html> (дата звернення 16.12.18)
3. Електронний ресурс: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/81-raschet-vetrogeneratora.html> (дата звернення 17.12.18)
4. Брюхомицький Ю. А. Нейромережеві моделі для систем інформаційної безпеки. Навчальний посібник. – Таганрог: Вид-во ТРТУ, 2005. –с. 61-90.
5. Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.І. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук-2001р. 374с.

REFERENCES

1. Development of the neural network with the characteristics of the mppt controller. Ostrenko D.O.,
2. Electronic resource: <https://ecotechnica.com.ua/energy/veter/3219-moshchnost-vetroenergetiki-ukrainy-prevysila-500-mvt.html> (date of submission 16.12.18)
3. Electronic resource: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/81-raschet-vetrogeneratora.html> (application date 17.12.18)

4. Bruhomitsky Yu A. Neural network models for information security systems. Tutorial. - Taganrog: View of the TRTU, 2005. 61-90
5. Chornyi O.P., Lugovyi AV, Rodkin D.I. Modeling of electromechanical systems. Kremenchuk-2001 374s.

Надійшла до редколегії 04.12.2018

Рецензент: д.т.н, професор Сивокобилєнко В.Ф.

D. OSTRENKO, O. KOLLAROV

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Selection and development of neural network architecture for finding the maximum mechanical power of the propeller. An example of using a neural network for finding the value of the point of maximum power in a power supply system with an alternative energy source (wind generator) is given in this work. The main feature of the built neural network is its structure. Neural network-multilayer (the first two layers have the activation function - hyperbolic tangens, and the third - a linear function). For the successful integration of the network into the system was considered the process of learning NM, construction of it is carried out in the application package Matlab.

In this paper, a neural network was developed and modeled to find the maximum value of the mechanical power of the wind wheel. This network is multi-layered; weight coefficients and bias obtained by experiment were used for construction.

This network takes into account the change in coefficients, which means it can be retrained. This property is very useful when an error occurs in the real equipped, caused by the aging of the equipment.

Key words: *wind turbines, renewable energy, the point of maximum power, matlab, volt-ampere characteristics, multilayer neural networks, feedback, design, smart grid, optimization significant coefficient, bias, autonomous power systems, algorithms.*

УДК 621.316

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (докт. техн.наук, проф.), **В.А. ЛИСЕНКО** (канд. техн. наук)

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
svf1934@gmail.com, viktor.lysenko@donntu.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Розроблено нові алгоритми селективного захисту від замикань фази на землю в компенсованих системах електропостачання напругою 6-35 кВ, в яких через вплив котушки Петерсена не забезпечується селективна дія традиційних пристроїв захисту. Математичне моделювання показало, що на частотах 200-400 Гц котушка Петерсена практично не зменшує ємнісний струм в пошкодженному приєднанні за замикань фази на землю, на відміну від того, як це має місце на частоті 50 Гц. Тому для захисту використано струми і напруги однієї з частот з указанного діапазону (наприклад 250 Гц), яку виділяють зі струмів і напруг нульової послідовності за допомогою алгоритму перетворення Фур'є. Також, для підвищення надійності захисту може бути використано кілька обраних частот. Наукова новизна полягає: у використанні алгоритму перетворення Фур'є для визначення складових напруги і струму нульової послідовності більш високої частоти ніж частота напруги живлення мережі, що дозволяє використати для селективного захисту від замикань фази на землю напрям реактивної потужності, який розраховується на вибраній частоті за допомогою виділених струмів і напруг. Наведено алгоритми роботи захисту і результати його досліджень за металевих і дугових замикань фази на землю. Ефективність розробленого захисту підтверджена результатами математичного моделювання.

Ключові слова: *система електропостачання, компенсована електромережа, мікропроцесорний захист, перетворення Фур'є, замикання фази на землю, котушка Петерсена, математична модель.*

Проблема і стан питання. Мережі 6-35 кВ складають приблизно 80% від сумарної довжини всіх ліній електропередавання в Україні. Переважна більшість таких мереж використовується для електропостачання трансформаторних підстанцій, електродвигунів великої потужності, іншого електротехнологічного обладнання і складається з кабельних ЛЕП, які експлуатуються в найбільш складних умовах через вплив вологи, різких перепадів температур і високих перенапруг, які виникають при комутаційних процесах, а також при однофазних замиканнях фази на землю (ОЗЗ). Ці перенапруги найбільше впливають на стан ізоляції кабелів, а також підключеного до них електрообладнання через те, що є найбільш поширеним видом пошкодження в мережах з ізольованою, компенсованою (із застосуванням котушки Петерсена) або резистивно-заземленою нейтраллю. Найбільш поширеним видом ОЗЗ є дугове. Довготривале існування дугових ОЗЗ трапляється при несвоєчасному відключенні пошкодженого фідера релейним захистом, і, в більшості випадків, стає причиною появи міжфазних замикань (за даними експлуатаційного досвіду близько 60-80% однофазних замикань розвиваються в міжфазні), що нерідко призводить до загоряння кабелів і супроводжується великими економічними збитками.

Прийнятний струм замикання на землю можливо отримати тільки у випадку резонансно заземленої нейтралі. Якраз цей режим передбачений нормативними документами [1, п.1.2.16]. Зменшення струму однофазних замикань на землю (ОЗЗ) знижує імовірність пошкоджень електроустановок, виникнення пожеж, травмування людей електричним струмом, тощо. Але зменшення струму однофазного замикання на землю надзвичайно ускладнює роботу селективного захисту від однофазних замикань на землю. Таким чином, удосконалення алгоритмів захисту від замикань фази на землю в умовах компенсації ємнісного струму замикання є актуальним завданням.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. В роботах [2,3 і ін.] показано, що в мережах 6-10 кВ за допомогою відомих струмових і струмово-спрямованих захистів важко, а іноді і неможливо, забезпечити захист від ОЗЗ з необхідною чутливістю і селективністю. Так, в компенсованих мережах при ОЗЗ в залежності від ступеня компенсації реактора напрям струму в пошкодженному приєднанні може бути таким же як в непошкодженному. Пропозиції по забезпеченню надійної роботи захисту шляхом шунтування реактора низькоомним опором [4] нівелюють переваги компенсованої мережі через збільшення струмів ОЗЗ та необхідність забезпечення пожежної безпеки достатньо потужного резистора. Запропоновані останнім часом мікропроцесорні захисти: ABB REF 541, 615 [5], ALSTOM і SIEMENS [6] тощо, не розкривають алгоритмів захисту, мають низку недоліків і проблема забезпечення селективності в компенсованих мережах залишається не вирішеною. Відомі також пристрої селективного захисту УСЗ-2/2 і УСЗ-3М, які реагують на порівняння суми вищих гармонік в струмах нульової послідовності фідерів [7]. Але ці захисти через їх взаємозв'язок не є автономними.

На нашу думку перспективним напрямком в розробці селективного захисту є подальший розвиток ідеї виділення, за допомогою цифрових засобів обробки сигналів, із струмів і напруг нульової послідовності, складових однієї з частот більш високих ніж 50 Гц. Для цього необхідні відповідні дослідження перехідних процесів при ОЗЗ та розробка нових ефективних алгоритмів на основі мікропроцесорної техніки. В цьому випадку потрібен системний підхід і одночасний аналіз перехідних процесів при ОЗЗ як в первинних колах мережі, так і в колах захисту[8]. Тому найбільш доцільною є розробка відповідних математичних моделей. Відомі публікації, в яких описані математичні моделі мереж 6-10 кВ [9] і моделі алгоритмів захисту [10]. Але відсутні моделі, в яких враховані відповідні рівняння як для первинної схеми, так і для алгоритмів реле. Тому вирішення означених завдань є актуальним.

Мета досліджень. Розробка нових алгоритмів селективного захисту від однофазних замикань на землю в компенсованих електричних мережах і їх дослідження за допомогою математичних моделей мереж і пристроїв захисту.

Результати досліджень. Для дослідження перехідних процесів в компенсованих електричних мережах прийемо за основу математичну модель, опис якої наведено в [11] і доповнимо її рівняннями алгоритмів захисту. Для заданої схеми довільної структури необхідно сформулювати: вектори-стовбці параметрів гілок-активних опорів R , індуктивностей L , ємностей C , опорів ізоляції на землю R_c , фазних ЕРС джерела живлення $e(t)$, струмів $i(t)$ і напруг $u(t)$ гілок, вузлів $U_{uz}(t)$, напруг на ємностях $uc(t)$ і еквівалентних противо-ЕРС гілок- $Eekv(t)$, а також матриці з'єднань гілок з вузлами P і загальних опорів гілок Z_p . Захист від ОЗЗ моделюється згідно розроблених алгоритмів і входить до складу моделі. Матрично-векторні рівняння математичної моделі при розрахунках процесів ОЗЗ методом вузлових напруг мають вигляд:

$$Z_p = \text{diag} \left[R + \frac{a_0}{h} L + \frac{h \cdot Rc}{a_0 \cdot C \cdot Rc + h} \right]; \quad (1)$$

$$U_{uz} = \left[(P \cdot Z_p^{-1} \cdot P^T)^{-1} \cdot P \cdot Z_p^{-1} \right] \cdot (e(t) - Eekv); \quad U_v = P^T \cdot U_{uz}; \quad (2)$$

$$i(t) = Z_p^{-1} (e(t) - Eekv - P^T \cdot U_{uz}); \quad (3)$$

$$uc(t) = \frac{h \cdot Rc \cdot i(t)}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} - \frac{Rc \cdot C}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot uc^{(n+1-s)} \quad (4)$$

$$Eekv = \frac{L}{h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot i^{(n+1-s)} - \frac{Rc \cdot C}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot uc^{(n+1-s)}. \quad (5)$$

Для підвищення чисельної стійкості математичної моделі рішення диференціальних рівнянь для струмів і напруг гілок тут виконується неявним методом другого порядку ($p = 2$) при значеннях коефіцієнтів поліномів, які апроксимують похідні, рівних, згідно [8], $a_0 = 1,5$; $a_1 = -2$; $a_2 = 0,5$.

В подальшому для прикладу розглянемо моделювання перехідних процесів і захисту при ОЗЗ для однієї з типових схем [10]. Вона містить трансформатор живлення, три фідери ($\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$) з фазними ємностями на землю відповідно рівними 3, 8 і 12 мкФ і сумарною міжфазною ємністю 10 мкФ всіх фідерів, а також котушку Петерсена з резонансною індуктивністю 0,146 Гн. Кожна фаза кабельної лінії і трансформатора представлена і-тою гілкою (рис 1) з поздовжньо включеними джерелом ЕРС, активним опором і індуктивністю, а також паралельно з'єднаними і підключеними до захисного заземлення ємністю і активним опором ізоляції. Опір ізоляції гілок фідерів в доаварійному режимі прийнято рівним 1 МОм, а при глухому ОЗЗ для пошкодженої гілки -0,1-2 Ом. Дугове замикання моделюється шляхом зміни напруги пробією ізоляційного проміжку і опору замикання на землю.

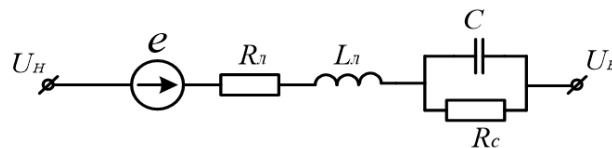


Рисунок 1 – Універсальна заступна схема гілки

Оскільки для запропонованого захисту планується використати струми і напруги більш високої частоти ніж 50 Гц, то за рівняннями (1-5) були виконані розрахунки ефективних значень реактивних складових струмів нульової послідовності в гілках мережі за ОЗЗ і для різного ступеня компенсації ємнісного струму з різною індуктивністю котушки Петерсена. Частота напруги живлення змінювалася від 50 до 300 Гц. Напруга мала

активну складову і її величина приймалася за номінальну. Знак струму для ємнісного “-” і для індуктивного “+” співпадає з напрямком реактивної потужності. Результати розрахунків наведені нижче в таблиці.

Таблиця

$I_{reak}, \text{ Гн}$	$2 \cdot L_{rez} = 0,292 \text{ Гн}$				$L_{rez} = 0,146 \text{ Гн}$				$0,5 \cdot L_{rez} = 0,073 \text{ Гн}$			
Частота, Гц	50	150	250	350	50	150	250	350	50	150	250	350
$I_{pv}, \text{ А}$	29,4	222	536	1654	-10,4	206	520	1610	-88,3	174	488	1522
$I_{pv1}, \text{ А}$	-27,6	-93,8	-212	-622	-27,5	-93,2	-210	-611	-27,1	-92	-206	-591
$I_{pv2}, \text{ А}$	-41,5	-143	-336	-1049	-41,3	-142	-333	-1031	-40,8	-141	-328	-998
$I_{reak}, \text{ А}$	39,84	14,9	11,9	17,5	79,1	29,6	23,7	34,4	156	58,4	46,5	66,5

Із наведених даних випливає, що у всіх режимах струми непошкоджених приєднань I_{pv1} (фідер 2) і I_{pv2} (фідер 3) мають ємнісний характер і спрямовані за ОЗЗ в сторону шин, тоді як напрями струмів пошкодженого приєднання I_{pv} (фідер 1) залежать від значення індуктивності реактора і частоти напруги. Так, при резонансному налаштуванні реактора ($L = L_{rez}$) і при перекомпенсації ($L < L_{rez}$) при частоті 50 Гц напрямок реактивної потужності такий, як і в непошкоджених фідерах. В той же час якщо прийняти для захисту визначення напрямку струму або реактивної потужності для складових частоти з діапазону 150-350 Гц, тоді селективність захисту забезпечується при будь яких значеннях індуктивності реактора. Як показало моделювання, на частотах більших за 400 Гц реактивна потужність після перетворення Фур’є (а також і чутливість захисту) зменшуються і тому оптимальним є вибір частоти 250 Гц, яка і прийнята нами за основу в подальших дослідженнях. Таким чином, з результатів розрахунків випливає, що селективний захист від ОЗЗ в компенсованих мережах можна реалізувати шляхом визначення напрямку реактивної потужності, розрахованої для струмів і напруг для частоти 250 Гц. Для отримання складових струмів і напруг вказаної частоти із струмів і напруг нульової послідовності скористаємось алгоритмом перетворення Фур’є.

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot W^{n \cdot k}; \quad W^{n \cdot k} = \exp(-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot n \cdot k); \quad (6)$$

де: $X[k]$ – комплексне значення k -ї гармонічної складової;

$x[n]$ – n -й відлік миттєвих (дискретних) значень напруги або струму нульової послідовності вибраного фідера;

N – загальна кількість відліків за період першої гармоніки ($n=1, 2, \dots, N$);

$W^{n \cdot k}$ – поворотний коефіцієнт.

Блок-схему розробленого мікропроцесорного селективного захисту наведено на рис.2.

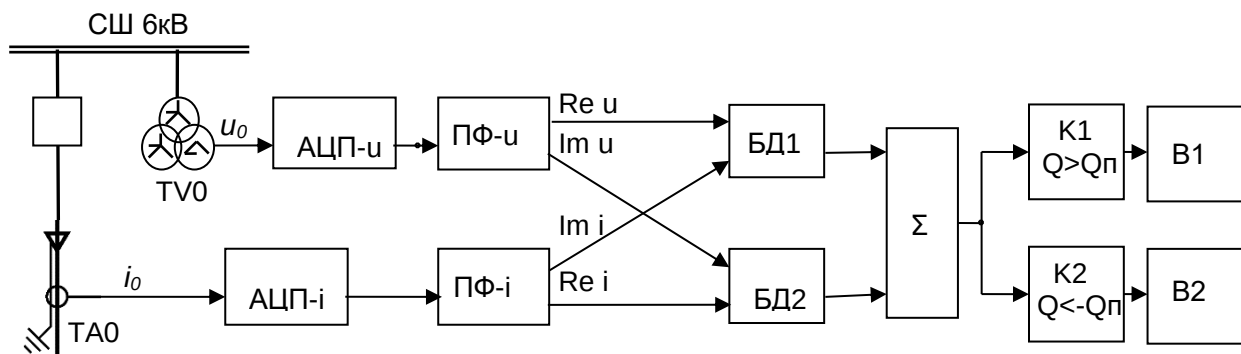


Рисунок 2 – Блок-схема мікропроцесорного захисту від ОЗЗ

Схема (рис.2) містить вимірювальні трансформатори напруги TV0 і струму ТА0, вихідні сигнали яких, пропорційні напругам і струмам нульової послідовності, надходять до аналого-цифрових перетворювачів АЦП-U і АЦП-I відповідно. До виходу кожного АЦП приєднано обчислювачі перетворення Фур’є. Вихідні сигнали обчислювачів, що містять дійсну і уявну складові надходять до блоків визначення реактивної потужності шляхом розрахунку добутків (БД).

$$Q_n = Q_{1n} - Q_{2n} = \text{Re}(U) \text{Im}(I) - \text{Im}(I) \text{Re}(U) \quad (7)$$

Вихідний сигнал після суматора надходить до компаратора К1 і якщо він фіксує перевищення позитивного порогового значення $Q_{порог}$ реактивної потужності, тоді спрацьовує вихідний орган В1 і фіксує роботу захисту даного приєднання. Другий вихідний орган В2 спрацьовує лише тоді, коли реактивна потужність

негативна і ОЗЗ має місце на іншому приєднанні. В2 служить для діагностики, щоб переконатись, що всі канали мікропроцесорного пристрою працюють вірно. За необхідності його можна вивести із роботи.

До запропонованого реле (на рис. 2 не показано) введено також пусковий орган захисту який використовує амплітуду напруги нульової послідовності, яка перевищує задане порогове значення. Амплітуду (модуль) напруги нульової послідовності розраховують за допомогою двох або трьох вибірок миттєвих значень:

$$Um = \sqrt{u_n^2 + \left[\frac{u_n - u_{n-1} \cdot \cos(w_0 T)}{\sin(w_0 T)} \right]^2}; \quad Um = \sqrt{u_n^2 + \left[\frac{3u_n - 4u_{n-1} + u_{n-2}}{2h \cdot w_0} \right]^2} \quad (8)$$

Якщо амплітуда перевищує порогову величину (уставку), то це є ознакою наявності ОЗЗ. Якщо амплітуда напруги нижче уставки, то робота захисту блокується, якщо вище - то робота захисту дозволяється. Уставка вибирається більшою за власну напругу небалансу мережі в нормальному режимі і становить близько 15% від номінальної напруги,

Підпрограма перетворення Фур'є (ПФ) для визначення за допомогою (6) гармонічних складових $X[k]$ для струму і напруги та реактивної потужності в програмному продукті Machcad наведено на рис.3:

$$\begin{aligned} \text{ПФ}(\text{FI}, \text{FU}, \text{K}, \text{t}) := & \begin{aligned} & \text{XI} \leftarrow \text{FI} \\ & \text{XU} \leftarrow \text{FU} \\ & \text{k} \leftarrow \text{K} \\ & \text{N} \leftarrow \text{rows}(\text{FI}) \\ & \text{Xi} \leftarrow \frac{2}{\text{N}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{N}} \text{XI}_i \cdot \cos \left[t - \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{k}}{\text{N}} \cdot (\text{N} - i) \right] \right] \\ & \text{Yi} \leftarrow \frac{2}{\text{N}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{N}} \text{XI}_i \cdot \sin \left[t - \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{k}}{\text{N}} \cdot (\text{N} - i) \right] \right] \\ & \text{Xu} \leftarrow \frac{2}{\text{N}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{N}} \text{XU}_i \cdot \cos \left[t - \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{k}}{\text{N}} \cdot (\text{N} - i) \right] \right] \\ & \text{Yu} \leftarrow \frac{2}{\text{N}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{N}} \text{XU}_i \cdot \sin \left[t - \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{k}}{\text{N}} \cdot (\text{N} - i) \right] \right] \\ & \text{Im} \leftarrow \sqrt{(\text{Xi})^2 + (\text{Yi})^2} \\ & \text{Um} \leftarrow \sqrt{(\text{Xu})^2 + (\text{Yu})^2} \\ & \text{Q} \leftarrow \text{Xu} \cdot \text{Yi} - \text{Xi} \cdot \text{Yu} \\ & \begin{pmatrix} \text{Xi} \\ \text{Yi} \\ \text{Xu} \\ \text{Yu} \\ \text{Q} \end{pmatrix} \end{aligned} \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Підпрограма перетворення Фур'є і розрахунку реактивної потужності

За допомогою математичної моделі виконані дослідження роботи реле за алгоритмом (рис.2) за замикань фази на землю в описаній електричній мережі. На рис.4 приведені цифрограми сигналів на входах і виходах окремих блоків. Моделювалось повторне трикратне дугове замикання фази на землю, кожне з яких продовжувалось десь біля 0,5 с. На рисунку показані сигнали в такій послідовності: вхідні сигнали нульової послідовності напруги U_3 , струмів приєднання з пошкодженням I_{3rv} і без пошкодження I_{3pr} , сигнали реактивної потужності для тих же приєднань Q_{rv} і Q_{pr} , які отримані після блоків перетворень Фур'є ПФ. Струми показані в Амперах, напруги в Вольтах, а потужності в ВА. Кількість дискретних вхідних сигналів для перетворення Фур'є було прийнято $N=32$. З наведених осцилограм видно, що вихідний імпульс реактивної потужності при спрацюванні реле продовжується приблизно 0,02с, а тому потрібно передбачити його розширення.

Для того щоб отримати більш потужний вихідний сигнал нами було досліджено удосконалений варіант блок-схеми реле (рис.5), який відрізняється тим, що в нього введені блоки диференціювання $p=d/dt$ струмів і напруг нульової послідовності перед їх подачею на блоки ПФ. За рахунок цього отримано значно більші сигнали реактивної потужності, як це видно з їх порівняння для обох блок-схем на рис.6. Для блок-схеми рис.5 сигнал біль ніж на порядок потужніший і має менші пульсації.

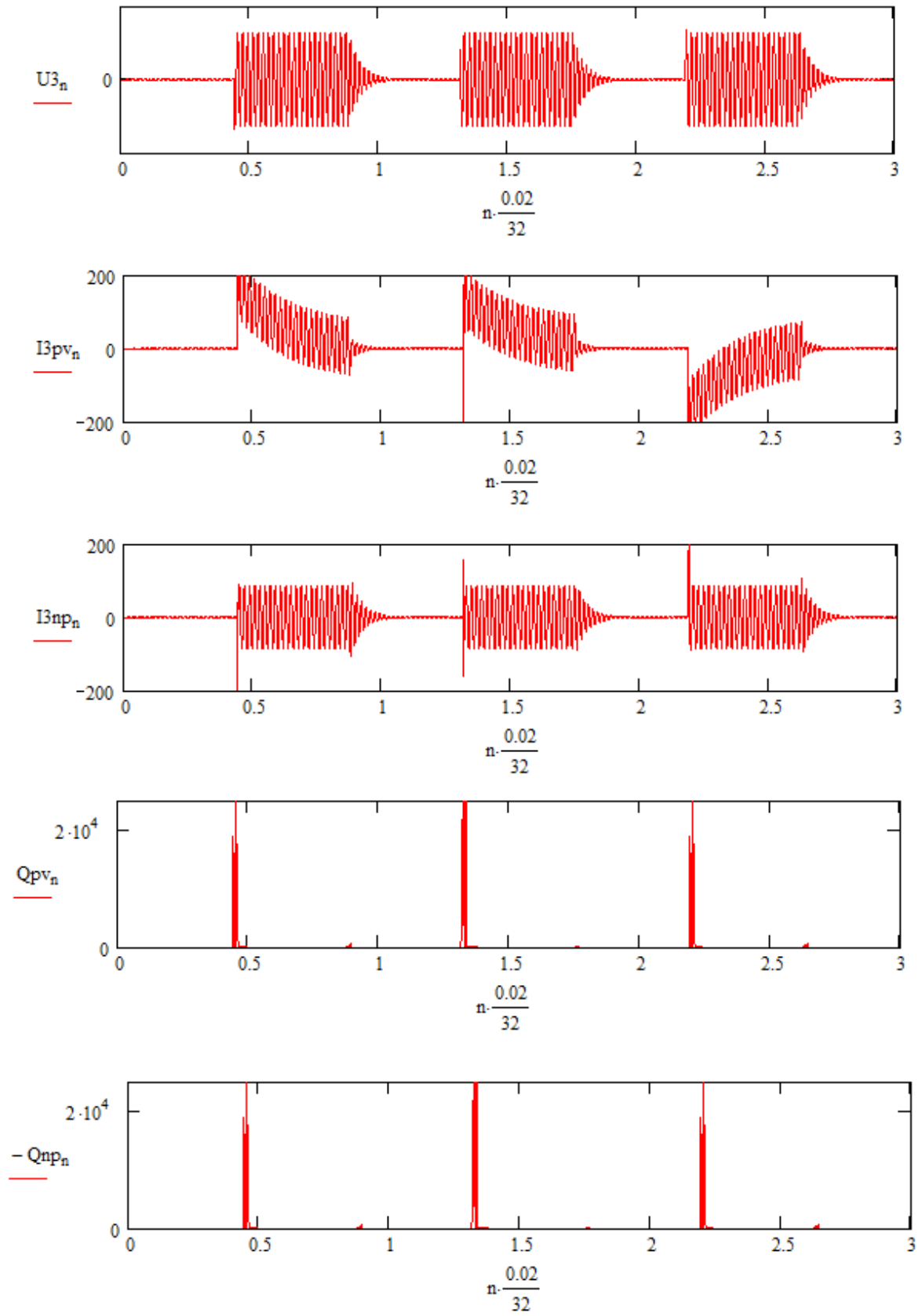


Рисунок 4 – Цифрограми роботи реле, отримані за допомогою математичної моделі

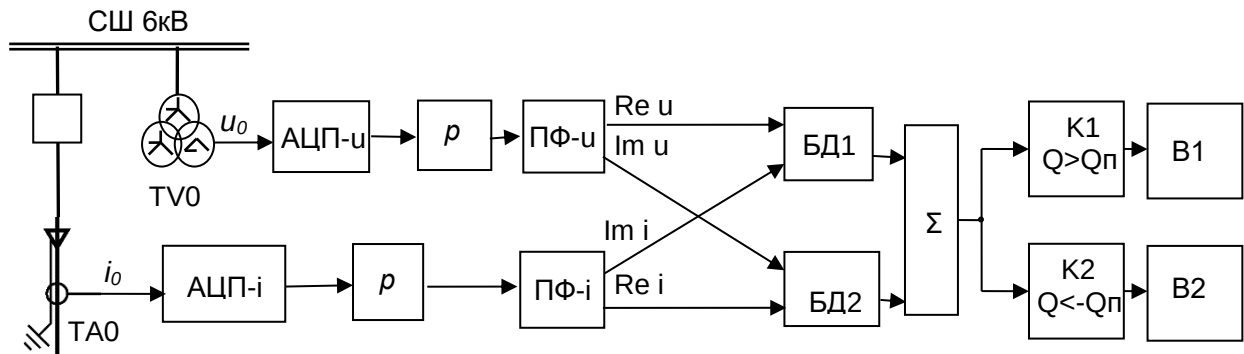


Рисунок 5 – Блок-схема удосконаленого мікропроцесорного захисту від ОЗЗ

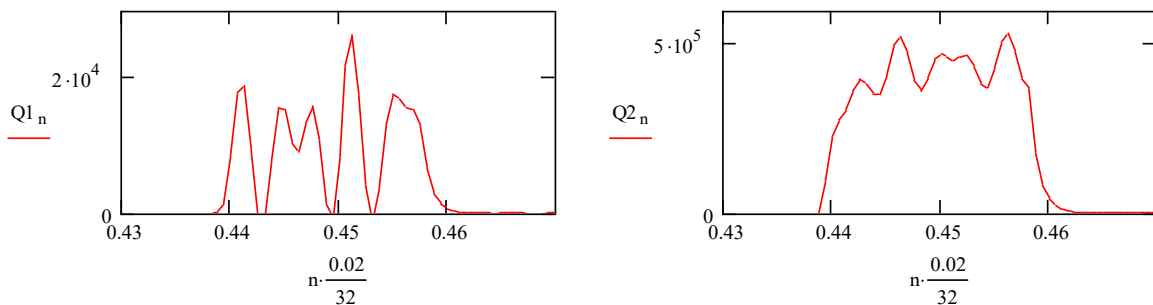


Рисунок 6 – Вихідні сигнали реактивної потужності Q1 і Q2 за блок-схемами 1 і 2.

Висновки.

1. Результатами математичного моделювання показана можливість виконання для компенсованих мереж селективного захисту від замикань на землю на основі контролю напрямку реактивної потужності, яка визначається за струмами і напругою частотою 200-300 Гц, виділених за допомогою алгоритму перетворення Фур'є із напруг і струмів нульової послідовності. За таких частот індуктивність реактора практично не компенсує в пошкодженому приєднанні ємнісні струми цієї частоти, що дозволяє використати їх для селективного захисту.

2. Розроблено принцип дії і алгоритми селективного мікропроцесорного захисту від ОЗЗ, в якому знак реактивної потужності при ОЗЗ визначають за струмами і напругою з частотою 250 Гц, отриманих за допомогою алгоритму перетворення Фур'є із струмів і напруг нульової послідовності.

3. Ефективність розробленого захисту підтверджена результатами математичного моделювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Правила улаштування електроустановок. Вид. 3-тє, перероб. і доп. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617с. — (Нормативний документ Міненерговугілля України).
- Титенков С.С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С.С. Титенков, А.А. Пугачев // Энергоэксперт. – 2010. – №2. – С. 36 – 43.
- Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С. Комбинированное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ. Мифы и реальность // Новости ЭлектроТехники 2016, № 3(99) [Электронный ресурс] - Режим доступа "http://news.elteh.ru/arh/2016/99/05.php"
- Кужиков С.Л. Предотвращение множественных повреждений кабельных линий 6 – 10 кВ с помощью кратковременного низкоомного индуктивного заземления нейтрали / С.Л. Кужиков, В.А. Хнычев // Новости электротехники. – 2010. – №3(63). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2010/63/13.php>
- Офіційне представництво ABB [електронний ресурс] - Режим доступа <https://new.abb.com/medium-voltage>.
- Офіційне представництво Siemens [електронний ресурс] - Режим доступа <https://w3.siemens.com>.
- Шуин В.А. Защита от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ / Шуин В.А., Гусенков А.В. / М.:НТФ «Энергопрогресс» 2001г. – 104 с.
- Nikiforov A.P. Application of The Theorem of ‘About the Unity of the Structural Description of RPA Devices’ for the Simulation of a Power Network Smart-Grid. 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017,
- Математичне моделювання в електроенергетиці Підручник / О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, Т. А. Мазур. Друге видання. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 608 с.

10. Hengxu Ha, Sankara Subramanian. Transient earth fault detection on compensated earthed system, CIRED-2013. 22th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13 June 2013, Paper No 0119.

11. Сивокобыленко В.Ф. Развитие математической модели для анализа переходных процессов в системе собственных нужд электростанций при замыкании фазы на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Наукові праці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». – випуск 10 (180). – Донецьк, 2011. – С.153 – 161.

REFERENCES

1. Rules of electrical installations. (2017) 3rd ed., processing and add Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, Kyiv (Regulatory document of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine).
2. Titenkov S.S. and Pugachev A.A. (2010) “Grounding modes of neutral in networks 6-35 kV and organization of relay protection against single-phase short circuits on the ground” // Jenergojekspt. –vol. 2. – p. 36 – 43.
3. Nazarychev A.N., Pugachev A.A., Titenkov S.S. (2016) “Combined Neutral Grounding in 6–35 kV Networks Myths and Reality” // Novosti JelektroTehniki. Vol. № 3(99). URL: <http://news.eltehr.ru/arh/2016/99/05.php>
4. Kuzhekov S.L and Hnychev V.A.(2010) “Prevention of multi-site damage to cable lines 6 - 10 kV using short-term low-resistance inductive grounding neutral” Novosti jelektrotehnik. Vol. №3(63) URL: <http://www.news.eltehr.ru/arh/2010/63/13.php>
5. ABB web site: <https://new.abb.com/medium-voltage>. (accessed December 20, 2018).
6. Siemens web site: <https://w3.siemens.com>. (accessed December 20, 2018).
7. Shuin V.A. and Gusenkov A.V. (2001) Zashchita ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyah 6 – 10 kV [Protection against earth faults in electric networks of 6–10 kV] NTF «Energoprogress» Moscow.
8. Nikiforov A.P. (2017) “Application of The Theorem of ‘About the Unity of the Structural Description of RPA Devices’ for the Simulation of a Power Network Smart-Grid”. 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48
9. Kirilenko O. V., Segeda M. S., Butkevich O. F. and Mazur T. A. (2013). Matematychni modeliuvannia v elektroenerhetytsi Pidruchnyk [Mathematical modeling in electric power industry Textbook] Second edition: Publishing House of Lviv Polytechnic, Lviv
10. Hengxu Ha, Sankara Subramanian. (2013) “Transient earth fault detection on compensated earthed system”, CIRED- 2013. 22th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13 June 2013, Paper No 0119.
11. Syvokobylenko V.F., Lebedev V.K. and Serdjukov R.P (2011) “Development of Mathematical Model for the Analysis of Transients in Power Stations Auxiliaries at Phase to Ground Faults” Naukovi pratsi DVNZ «Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet». Serii «Elektrotekhnika i enerhetyka» vol 10 (180) p.153 – 161.

Надійшла до редколегії 06.12.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобыленко В.Ф.

V.F. SYVOKOBYLENKO, V.A. LYSENKO

State Institution of Higher Education Donetsk National Technical University

Use of the Fourier transform algorithm for improving phase to the earth fault protection in distribution electric networks. New algorithms of selective protection against phase-to-earth faults in compensated power supply systems with a voltage of 6-35 kV are developed, in which, due to the influence of the Petersen coil, the selective action of traditional protective devices is not provided. The mathematical modeling showed that, at frequencies of 200-400 Hz, the Petersen coil practically does not reduce the capacitive current in the damaged connection due to phase-to-earth faults, as opposed to how it occurs at a frequency of 50 Hz. Therefore, the currents and voltage of one of the frequencies from the specified range (for example, 250 Hz), which are emitted from currents and voltages of zero sequence using the Fourier transform algorithm, are used for protection. Also, several selectable frequencies can be used to increase security reliability. The scientific novelty consists in using the Fourier transform algorithm to determine the components of the voltage and current of the zero sequence of a higher frequency than the power supply frequency of the network, which allows for the selective phase-to-earth protection of the reactive power, which is calculated on the selected frequency with the help of allocated currents and voltages. The algorithms of protection work and the results of its research on metal and arc phase faults on the ground are given. The effectiveness of the developed protection is confirmed by the results of mathematical modeling.

Key words: *power supply system, compensated electrical network, microprocessor protection, Fourier transform, phase closure to ground, Petersen coil, mathematical model.*

Е. М. НЕМЦЕВ
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
eduard.niemtsev@donntu.edu.ua

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATHCAD

У статті на конкретному прикладі розглядається модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі MATHCAD. При складанні моделі витіснення струму в роторі (скін-ефект) враховано шляхом представлення ротора з двома короткозамкненими клітками. Для моделювання використана повна система диференціальних рівнянь, яка записана для контурів статора, ротора і для рівняння руху ротора. Результатами моделювання стали графічні залежності, які відображають зміну основних параметрів роботи асинхронного двигуна, які, в свою чергу, дозволяють аналізувати ці параметри з плином часу. Отримані дані дають можливість продовжити роботу з моделювання машин асинхронного типу з точки зору діагностики та аналізу при зміні окремих величин, що напряму або опосередковано впливають на їх роботу.

Ключові слова: *модель, асинхронний двигун, MATHCAD, алгоритмізація роботи, статор, ротор, електромагнітна схема, струм, швидкість обертання, крутний момент.*

До теперішнього часу в науковій та дослідницькій сфері сформувалось певною мірою закінчена система (теорія) математичного моделювання електромеханічних пристроїв і систем. Ця теорія широко може використовуватися як на стадії проектування так і на стадії експлуатації зазначених пристроїв. Важливу роль моделювання також може відігравати і в плані підготовки фахівців (дослідників) або навчання персоналу засадам експлуатації обладнання.

При цьому моделюванню підлягають як електромеханічна система в цілому так і окремі її складові (датчики, виконавчі пристрої, приводи й інше). Широкі можливості моделювання полягають також у різноманітті вибору методів синтезу і аналізу систем і окремих елементів у залежності від поставлених завдань і бажаного результату.

Одним з напрямків розробки математичної моделі окремих об'єктів є розробка чисельної моделі на основі методу кінцевих елементів. При цьому враховуються реальні конструктивні розміри реального об'єкта дослідження, параметри зовнішнього середовища та внутрішніх процесів [1].

Другим напрямком моделювання є застосування до об'єкту досліджень загальновідомих фізичних законів (Ома, Кірхгофа, магнітної індукції й інш.). У результаті отримуємо більш детальну модель об'єкта у вигляді з'єднання окремих елементів (джерела струму та електрорушійної сили, активні опори, індуктивності, ємності), що дозволяє більш детально проаналізувати процеси, які відбуваються в електромеханічних пристроях і системах.

Для створення моделей електромеханічних пристроїв в теперішній час широкого застосування набули прикладні програми на основі символьних процесорів MathCad и MatLab, які дозволяють отримати моделі пристроїв із визначеною алгоритмізацією їх роботи.

У загальному випадку, сутність моделювання полягає у розробці адекватної моделі з програмною її реалізацією на електронно-обчислювальній машині для подальшого проведення обчислювальних експериментів можливих варіантів функціонування змодельованого пристрою (пуск, зупинка, аварійні режими тощо). Цікавим також є дослідження впливу окремих складових створеної моделі на поведінку моделі в цілому.

У зв'язку з широким застосуванням асинхронних машин актуальним є питання визначення параметрів їх роботи в залежності від технічних можливостей та фізичного стану цих апаратів в даний момент часу, що викликає необхідність розробки адекватної моделі з урахуванням всіх можливих збурюючих впливів [2]. У різні моменти часу ці впливи є досить різноманітними: ввімкнення і вимкнення окремих двигунів чи групи двигунів у загальній системі живлення, технологічні зміни режиму роботи виконавчих органів, аварійні режими й інше. Перехідні процеси, що при цьому виникають, хоча і мають короткочасний характер істотно впливають на надійність роботи та ефективність функціонування асинхронних двигунів. Створення моделі (математичної, комп'ютерної чи іншої) дозволить здійснити дослідження зазначених явищ, отримати цінну інформацію для визначення дій оператора щодо обслуговування чи виводу в ремонт конкретного апарату. Отримані дані можуть також слугувати для подальших розробок при проектуванні самих електродвигунів.

При складанні моделі асинхронного двигуна приймаємо такі припущення (рис. 1):

- у обмотках, розташованих в пазах статора і ротора магніторушійні сили відповідають першим гармонікам магніторушійних сил;

- магнітне поле кожної обмотки складається з двох складових: поля розсіювання і поля взаємної індукції;

- поле взаємної індукції розподіляється по гармонійному закону і силові лінії цього поля утворюють загальний потік взаємної індукції з контурами статора і ротора;
- втрати в конструкції двигуна відсутні.

Асинхронний двигун можна представити у вигляді системи магнітозв'язаних обмоток статора і ротора, що обертаються одна відносно одної з кутовою швидкістю ω_r (рис. 1).

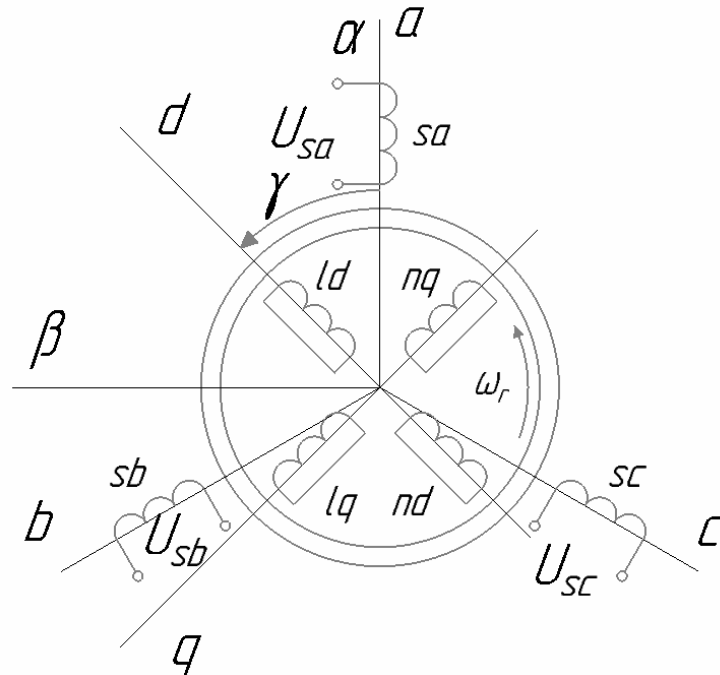


Рисунок 1 – Електромагнітна схема двигуна

Для створення структури моделі в середовищі MathCad, яка працює з визначеними значеннями для прикладу задаємось початковими даними, що характеризують параметри двигуна, що досліджується. Далі наведено послідовність моделювання в програмі MathCad.

А) Заступна схема асинхронного двигуна.

Для створення моделі асинхронного двигуна складемо заступну схему [2] (рис. 2).

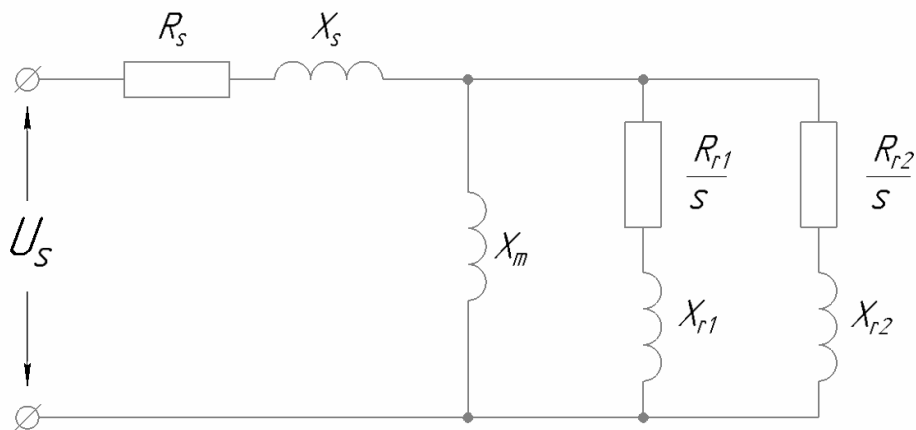


Рисунок 2 – Схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна потужністю 400 кВт з напругою живлення 6 кВ (у відносних одиницях) наступні:

$$R_s = 0,00933, X_s = 0,0524 + 0,03i, X_m = 2,34, \cos(\varphi) = 0,84, \eta = 0,92$$

$$R_{r1} = 0,0211, X_{r1} = 0,2149, R_{r2} = 0,275, X_{r2} = 0,351$$

Провідність за схемою заміщення розраховується за формулою:

$$Y_{ss} = \left[(R_s + i \cdot X_s) + \left(\frac{1}{\frac{R_{r1} \cdot 100}{SS} + i \cdot X_{r1}} + \frac{1}{\frac{R_{r2} \cdot 100}{SS} + i \cdot X_{r1}} + \frac{1}{i \cdot X_m} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

Статичний обертальний момент розраховуємо за формулою:

$$m_{ss} = \frac{\left(Re\left(\frac{1}{Y_{ss}}\right) - R_s \right) \cdot (|Y_{ss}|)^2}{\eta \cdot \cos(\varphi)}$$

Розрахункові формули для коефіцієнтів диференціальних рівнянь мають вигляд:

$$\alpha_s = X_s^{-1} \cdot R_s$$

$$\alpha_{r1} = X_{r1}^{-1} \cdot R_{r1}$$

$$\alpha_{r2} = X_{r2}^{-1} \cdot R_{r2}$$

$$X_{sr} = (X_m^{-1} + X_s^{-1} + X_{r1}^{-1} + X_{r2}^{-1})^{-1}$$

$$a_s = X_s^{-1} \cdot X_{sr}$$

$$a_{r1} = X_{r1}^{-1} \cdot X_{sr}$$

$$a_{r2} = X_{r2}^{-1} \cdot X_{sr}$$

Б) Диференціальне рівняння асинхронного двигуна у середовищі MathCad набуде вигляду:

$$\mathbf{D}(\mathbf{t}, \mathbf{x}) := \begin{bmatrix} (\mathbf{a}_s - 1) \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_3 + \mathbf{Um} \cdot \cos(\mathbf{t}) \\ \mathbf{a}_s \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_1 + (\mathbf{a}_{r1} - 1) \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_7 \cdot \mathbf{x}_5 \\ \mathbf{a}_s \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_2 + (\mathbf{a}_{r2} - 1) \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_7 \cdot \mathbf{x}_6 \\ (\mathbf{a}_s - 1) \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_5 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \alpha_s \cdot \mathbf{x}_6 + \mathbf{Um} \cdot \sin(\mathbf{t}) \\ \mathbf{a}_s \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_4 + (\mathbf{a}_{r1} - 1) \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_5 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \alpha_{r1} \cdot \mathbf{x}_6 + \mathbf{x}_7 \cdot \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{a}_s \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_5 + (\mathbf{a}_{r2} - 1) \cdot \alpha_{r2} \cdot \mathbf{x}_6 + \mathbf{x}_7 \cdot \mathbf{x}_3 \\ \frac{1}{\mathbf{G}} \cdot \left[\mathbf{Xs}^{-1} \cdot \left[-\mathbf{x}_1 \cdot (\mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_4 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_5 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_6) + \mathbf{x}_4 \cdot (\mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_3) \right] - \mathbf{mc}(\mathbf{t}) \right] \end{bmatrix}$$

В) Головна програма розрахунків режимів роботи асинхронного двигуна у середовищі MathCad має вигляд:

```

F := \vv t ← 0
      x1 ← x
      h ← 0.314
      for i ∈ 1.. 5500
        Z ← rkfixed(x1 , t, t + h, 1, D)
        for j ∈ 1.. 7
          x1j ←  $\left[ \left[ ((Z))^T \right]^{(2)} \right]_{-j+1}$ 
          Is1 ←  $(x1_1 - a_s \cdot x1_1 - a_{r1} \cdot x1_2 - a_{r2} \cdot x1_3) \cdot Xs^{-1}$ 
          Is2 ←  $(x1_4 - a_s \cdot x1_4 - a_{r1} \cdot x1_5 - a_{r2} \cdot x1_6) \cdot Xs^{-1}$ 
          Iai ← Is1
          Ibi ←  $-\frac{Is1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Is2$ 
          Ici ←  $-\frac{Is1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Is2$ 
          Isi ←  $\sqrt{(Is1)^2 + (Is2)^2}$ 
          Mi ←  $\frac{-x1_1 \cdot (a_s \cdot x1_4 + a_{r1} \cdot x1_5 + a_{r2} \cdot x1_6) + x1_4 \cdot (a_s \cdot x1_1 + a_{r1} \cdot x1_2 + a_{r2} \cdot x1_3)}{Xs}$ 
          Pi ← Is1 · Um · cos(t) + Is2 · Um · sin(t)
          Qi ← Is1 · Um · sin(t) - Is2 · Um · cos(t)
          ωi ← x17
          t ← t + h
          τi ← t
      ( Ia
        Ib
        Ic
        M
        ω
        Is
        Q
        P
        0
      )

```

Г) Результати розрахунку режиму пуску асинхронного двигуна представимо у вигляді графіків (розрахунки проводились з кроком 0,001 с) [3]. На графіках по осі абсцис час вказаний у секундах.

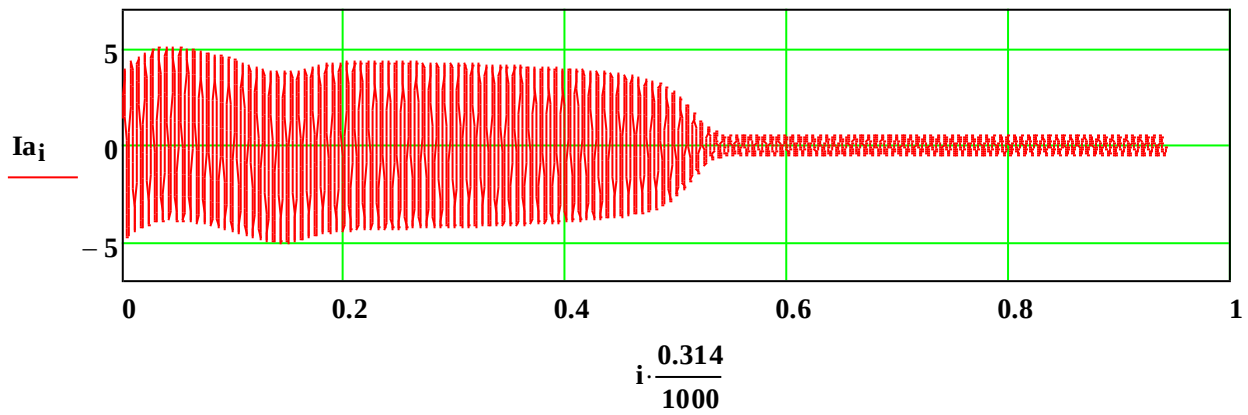


Рисунок 3 – Струм статора фази a

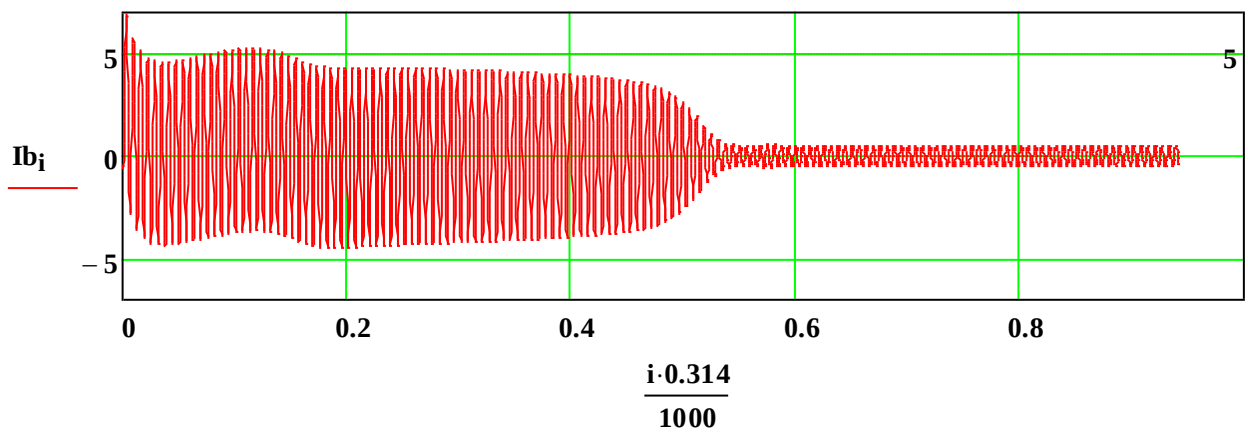


Рисунок 4 – Струм статора фази b

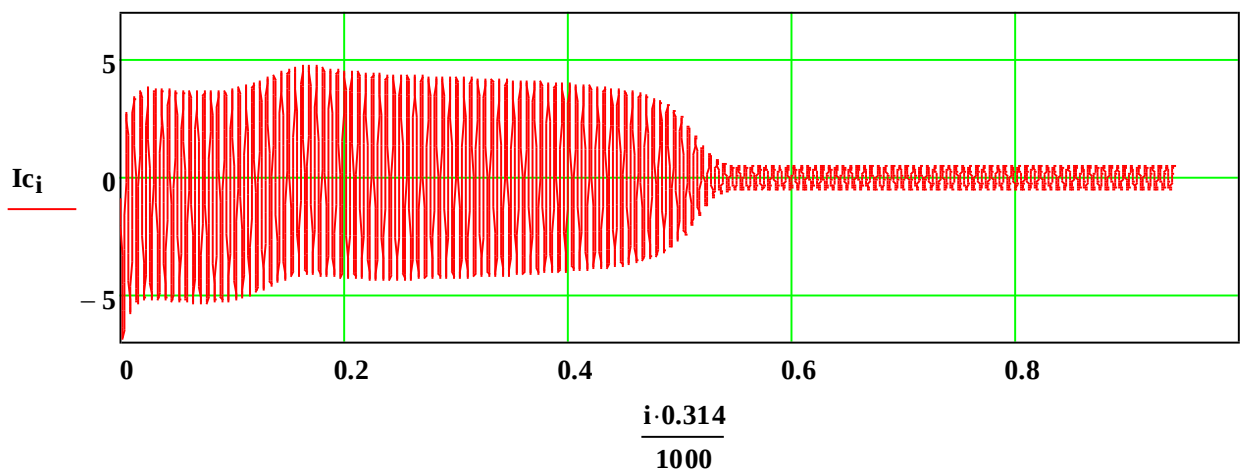


Рисунок 5 – Струм статора фази c

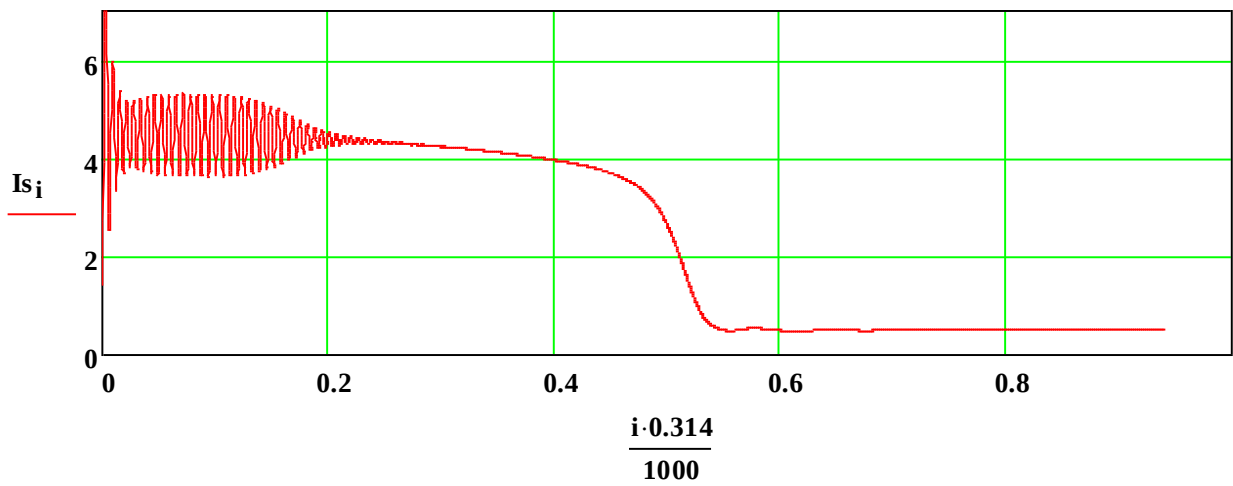


Рисунок 6 – Модуль узагальненого вектору струму статора

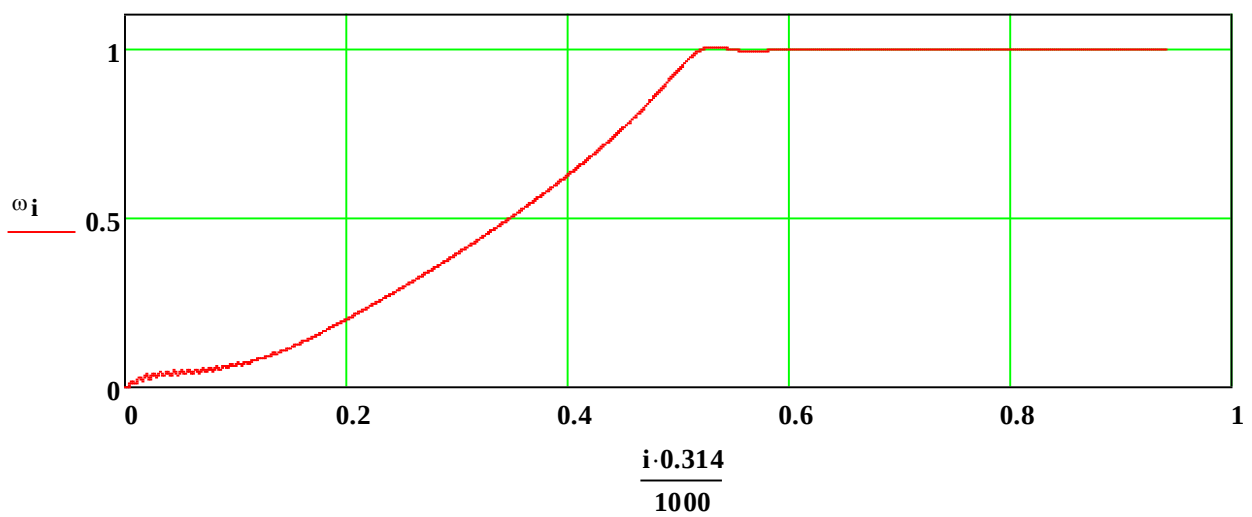


Рисунок 7 – Кутова швидкість обертання ротора

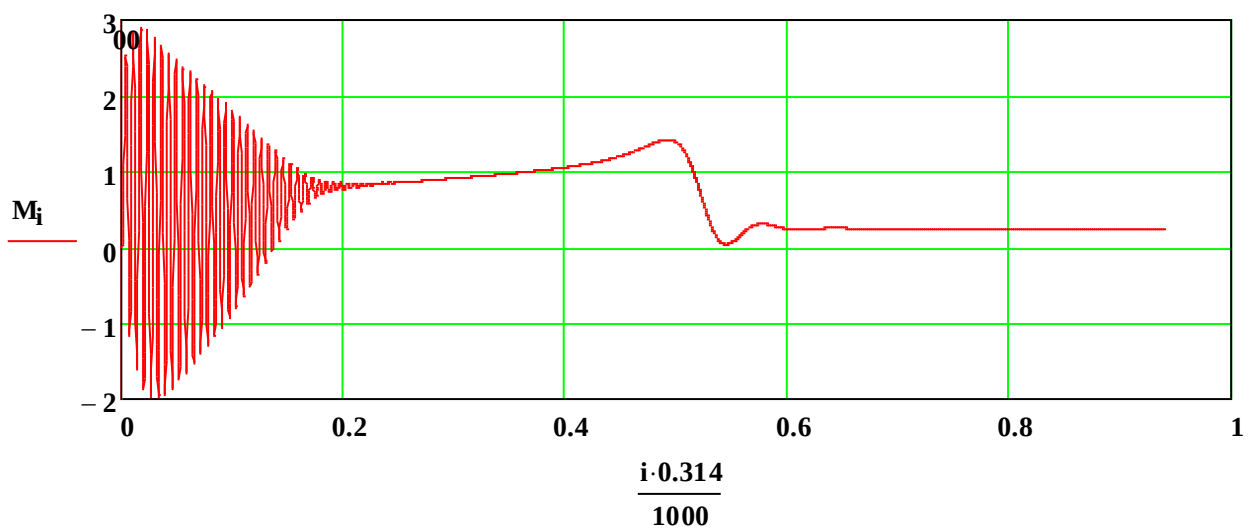


Рисунок 8 – Крутний момент двигуна

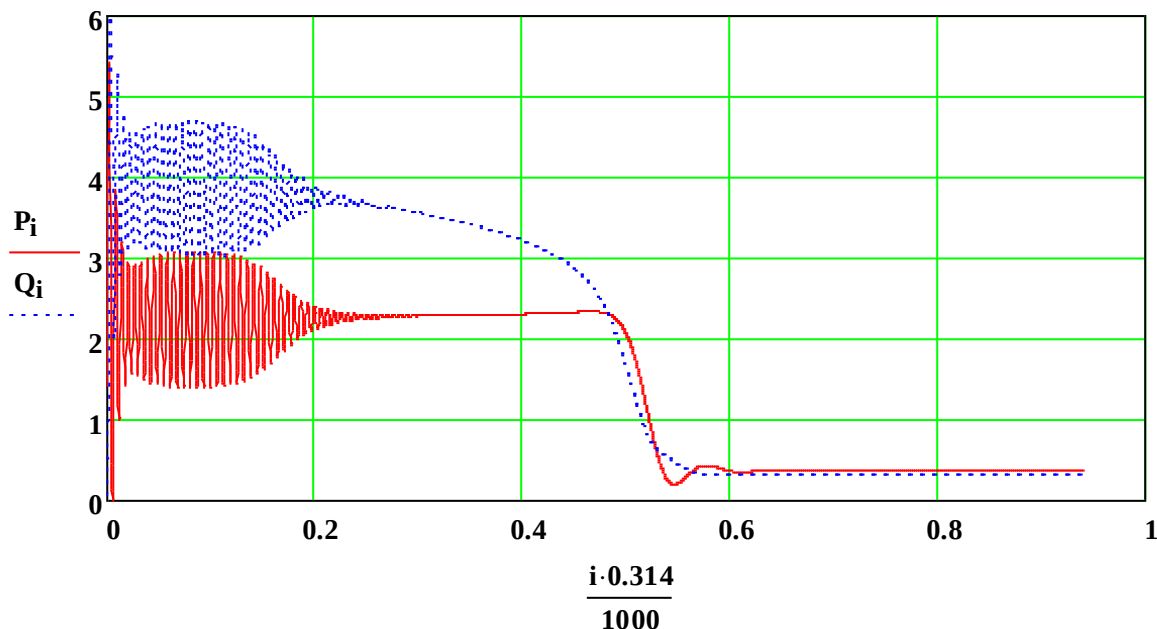


Рисунок 9 – Споживання активної (P) та реактивної (Q) потужності

Висновки

Була розроблена модель асинхронної машини і проведена її комп'ютерна реалізація в пакеті MathCad. Результати наведені у вигляді графіків.

Модель може бути застосована при дослідженні живлення від трифазного джерела з синусоїдною формою напруги. За допомогою створеної моделі можна здійснювати аналіз процесів у сталих режимах роботи асинхронного двигуна.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: Науч. пособие / Сивокобыленко В.Ф. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.
2. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование глубокопазных асинхронных машин. / Сивокобыленко В. Ф., Костенко В. И. // Электричество. – 1980. – № 4. – С. 32–36.
3. Дьяконов В. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: Солон-Пресс, 2004. 384 с.

REFERENCES

1. Sivokobylenko V.F. Mathematical modeling in electrical engineering and energy: Scientific. allowance / Sivokobylenko V.F. - Donetsk: PBA DonNTU, 2005. - 350 p.
2. Sivokobylenko V.F. Mathematical modeling of deep-phase asynchronous machines. / Sivokobylenko V.F., Kostenko V.I. // Electricity. - 1980. - № 4. - p. 32–36.
3. Dyakonov V. VisSim + Mathcad + MATLAB. Visual mathematical modeling. M.: Solon-Press, 2004. 384 p.

Надійшла до редколегії 11.12.2018

Рецензент: д.т.н. Семенченко А.К.

E. NIEMTSEV

State Institution of Higher Education “Donetsk National Technical University”

Model of asynchronous motors with a short-cooled rotor in Mathcad software. In the article, for a specific example, the model of the asynchronous motor with short-circuited rotor in the MATHCAD software environment is considered. In compiling the model, displacement of the current in the rotor (skin effect) is taken into account by representing the rotor with two short-circuited cells. For simulation a complete system of differential equations is used, written for stator circuits, rotor and for the rotor motion equation. The simulation results are graphical relationships that reflect the change in the basic parameters of the asynchronous motor, which, in turn, allow them to be analyzed over time. The obtained data give the opportunity to continue the work on modeling machines of asynchronous type from the point of view of diagnostics and analysis in case of changes in individual values that directly or indirectly influence their operation.

Key words: model, asynchronous motor, MATHCAD, algorithmization of work, stator, rotor, electromagnetic circuit, current, rotational speed, torque.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

***Наукові праці Донецького національного
технічного університету***

Серія: «*Електротехніка і енергетика*»

№1(19) – 2 (20) ' 2018

(українською, російською мовами)

Адреса редакції: 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, ДонНТУ, к. 2.110

Формат 60×84^{1/8} Ум. друк. арк. 9,5.
Тираж 100 прим.

Видавець та виготовлювач:

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»,
пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300.

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи: серія ДК №4911 від
09.06.2015