

ред другим освітленням, так як удешевляє нічне бачення і ввісприяття глубини пространства. К сожаленію, в нашом місті джерела випромінювання білого кольору практично відсутні, так як в зовнішньому освітленні використовують світильники з лампами ДНАТ, які мають найбільшу світлову віддачу і термін служби.

На сучасному етапі для підвищення якості освітлення міста набуває необхідності впровадження нового покоління світотехнічного обладнання, відповідаючого сучасним вимогам по дизайну, економічності, технологічності з використанням енергоекономічних джерел світла.

При освітленні магістралей і доріг з високою інтенсивністю руху з метою підвищення якості освітлення бажано використовувати джерела білого кольору лампи типу ДРИ.

Враховуючи, що світильники на світлодіодах удешевляють якість освітлення об'єкта і термін їх служби значно перевищує існуючі аналоги, а також відносно швидку окупаємість цих проектів, можна зробити висновок, що світлодіодні джерела світла на даному етапі розвитку міського освітлення необхідно використовувати для внутріквартирного і внутрішнього освітлення.

1. Федоріщев А.Ю. Стан і перспективи розвитку системи зовнішнього освітлення Росії // Світотехніка. – 2010. – №1. – С.32-35.

2. Айзенберг Ю.Б. Справочна книга по світотехніці. – 3-є вид., перероб. і доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

3. Ларсен П.Й. Порівняння якості вуличного і доріжного освітлення в Норвегії і Швеції // Світотехніка. – 2010. – №3. – С.11-15.

4. Сапрыка А.В. Сучасні технології в освітлювальних системах мегаполіса. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 260 с.

Получено 14.12.2010

УДК 621.311

В.Г. ЯГУП, д-р техн. наук

Харківська національна академія міського господарства

К.В. ЯГУП, канд. техн. наук

Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ МЕРЕЖІ В НЕОДНОРІДНОМУ КООРДИНАТНОМУ БАЗИСІ

Розглядаються питання формування рівнянь електричних мереж за методом змінних стану і їх вирішення з урахуванням властивості надмірності змінних стану, що проявляється в еквівалентних розрахункових схемах електричних мереж.

Рассматриваются вопросы формирования уравнений электрических сетей по методу переменных состояния и их решения с учетом свойства избыточности переменных состояния, проявляющегося в эквивалентных расчетных схемах электрических сетей.

The questions of forming of equalizations of electric networks are considered on the method of state variables and their decision taking into account property of topological surplus of state variables, showing up in the equivalent calculation charts of electric networks variables.

Ключові слова: змінні стану, електрична мережа.

Аналіз сталих режимів електроенергетичних мереж (ЕЕС) є неодмінним етапом проектування і дослідження систем електропостачання [1]. Зазвичай це завдання вирішується на основі лінеаризації системи і залученні матричних методів з орієнтацією на вживання засобів цифрової обчислювальної техніки [2-4]. При цьому основна увага приділяється формуванню рівнянь режиму ЕЕС за допомогою методів контурних струмів або вузлової напруги. У цих рівняннях як шукані невідомі виступають або струми незалежних контурів, або напруга вузлів відносно заземленого, таких, що також дають систему незалежних змінних [4-5]. Такі рівняння записуються в так званому однорідному базисі, коли розмірність всіх шуканих невідомих збігається. Це у свою чергу накладає певні вимоги на вигляд еквівалентної розрахункової схеми, які можуть спростити процедуру формування рівнянь режиму ЕЕС в набраного для аналізу вигляду. Так, напруга балансуєвих вузлів ЕЕС, в яких зосереджені генеруючі потужності, задається у вихідних розрахункових схемах джерелами напруги, а струми навантажень у вузлах відбору електричної енергії відображуються джерелами струму. Це вимушує удаватися до еквівалентних перетворень джерел до однорідного базису з метою здобуття еквівалентної розрахункової схеми ЕЕС в раціональній формі, що полегшує формування рівнянь.

Відомі взаємні еквівалентні перетворення джерел напруги і струму мають на увазі наявність додаткового пасивного елемента, включеного послідовно з джерелом напруги або паралельно джерелу струму [2]. В таких випадках перехід до дуального джерела здійснюється простим розрахунком параметрів, що замінює еквівалентне джерело [3, 4]. Проте, джерела напруги, розміщені в балансуєвих вузлах ЕЕС, відображується в більшості випадків джерелами напруги без додаткових послідовних пасивних елементів. Це ускладнює заміну їх еквівалентними джерелами струму. Приклад аналізу ЕЕС, що розглядається в [5], містить лише один балансуєвий вузол з джерелом напруги. Для здобуття еквівалентного джерела струму в даному прикладі довелося заздалегідь вдатися до перетворення переміщення джерела напруги за балансуєвий вузол, при цьому джерело напруги розмножується, оскільки він повинен враховуватися у всіх гілках, що інцидентні цьому балансуєвому вузлу. Далі при перетворенні цих джерел напруги з'являється відповідне число джерел струму. Все це ускладнює проведен-

ня аналізу попередніми перетвореннями.

В той же час при моделюванні електронних схем застосовується метод змінних стану (ЗС) [6, 7]. Метод ЗС передбачає формування системи рівнянь в неоднорідному координатному базисі. При цьому не потрібно здійснювати будь-які перетворення джерел електричної енергії в аналізованій системі. Крім того, в даний час методика вирішення рівнянь за методом ЗС добре відпрацьована і втілена в реальні програмні продукти у вигляді підпрограм, що добре відтестовані.

Мета статті – розробка методики аналізу сталого режиму ЕЕС за допомогою рівнянь, складених за методом ЗС, а також аналіз можливих проблем, пов'язаних з формуванням цих рівнянь і їх рішенням.

Розглянемо визначення параметрів сталого режиму на прикладі електричної системи [5], зображеної на рис.1. а, при наступних параметрах: $Z_{12} = 10 + j20$ Ом; $z_{13} = 15 + j 30$ Ом; $z_{23} = 10 + j 25$ Ом; $E = 115$ кВ; $J_2 = 0,2624 - j 0,1575$ кА; $J_3 = 0,4199 - j$ кА. Розвернемо схему з урахуванням складу елементів у кожній гілці і з'єднання джерел енергії через заземлений вузол, який на вихідній схемі мережі (рис.1, а) зазвичай не зображується.

Для формування рівняння стану зобразимо орієнтований граф електричної системи (рис.1, в), після чого виберемо дерево, під яким розуміється зв'язана сукупність ребер орграфа, що містить в собі всі вузли і не утворює жодного контуру [2, 3]. При формуванні дерева електричної системи слід дотримуватися ієрархії включення ребер в дерево в послідовності Е-С-R-L-J залежно від типу кожного ребра [6, 7]. У фундаментальному дереві містяться всі джерела напруги і конденсатори, а все індуктивності і джерела струму не входять в дерево і належать до зв'язків [6-8]. Для даного графа фундаментальне дерево сформувати неможливо, тому доводиться задовольнитися так званім нормальним деревом. Останнє повинне містити максимальну кількість джерел напруги і конденсаторів і мінімальну кількість джерел струму і індуктивностей. Нормальне дерево для даної електричної мережі наведено на рис.1. г. Як видно з орграфа мережі, вона містить $N^y = 7$ вузлів, отже, дерево повинне містити $N^b = 6$ гілок.

Включення в дерево елементів E, R1, R2, R3 дає лише чотири гілки, і ще залишилися дві гілки, їх доводиться утворювати за рахунок двох індуктивностей, в якості яких вибрано елементи L2 і L3. Таким чином, ці індуктивності представляють так звані надлишкові елементи, а відповідні ним струми є залежними змінними стану. Матриця «контур – гілка» складається так, щоб її рядки відповідали зв'язкам, а стовпці – гілкам. Кожен рядок цієї матриці відображає структуру особливих контурів, кожен з яких утворюється відповідним зв'язком, коли він

приєднується до дерева. Для даного випадку ця топологічна матриця має вигляд:

$$F = \begin{matrix} & \begin{matrix} E & R1 & R2 & R3 & L2 & L3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} L1 \\ J2 \\ J3 \end{matrix} & \begin{matrix} & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & & +1 & & +1 & \end{matrix} \end{matrix}$$

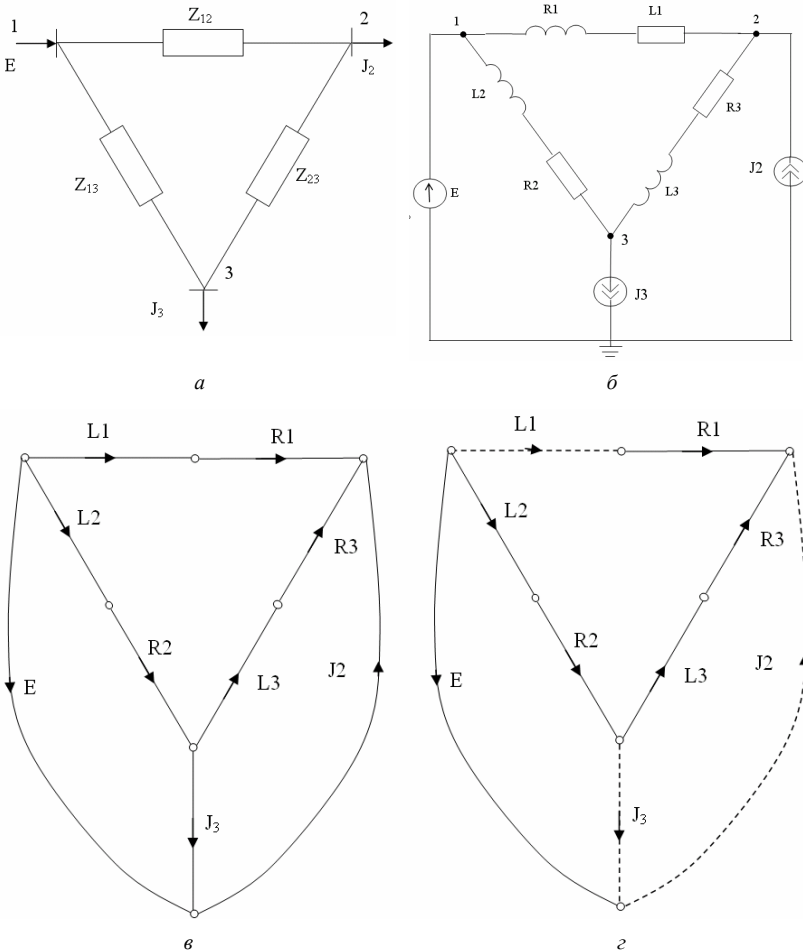


Рис.1

Система топологічних рівнянь у матричному вигляді виражається рівняннями:

$$\begin{aligned} V^C &= -FV^B; \\ I^B &= F^T I^C, \end{aligned}$$

де V^B, I^B – вектори напруг і струмів гілок; V^C, I^C – вектори напруг і струмів зв'язків.

Ці матричні рівняння приводять до наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} V_{L1} &= V_{R2} + V_{R3} - V_{R1} + V_{L2} + V_{L3}; \\ \dot{i}_{R1} &= \dot{i}_{L1}; \\ \dot{i}_{R2} &= \dot{i}_{J3} - \dot{i}_{J2} - \dot{i}_{L1}; \\ \dot{i}_{R3} &= -\dot{i}_{J2} - \dot{i}_{L1}; \\ \dot{i}_{L2} &= \dot{i}_{J3} - \dot{i}_{J2} - \dot{i}_{L1}; \\ \dot{i}_{L3} &= -\dot{i}_{J2} - \dot{i}_{L1}. \end{aligned}$$

Компонентні рівняння для системи

$$\begin{aligned} V_{R1} &= R_1 \dot{i}_{R1}; \\ V_{R2} &= R_2 \dot{i}_{R2}; \\ V_{R3} &= R_3 \dot{i}_{R3}; \\ V_{L1} &= L_1 \frac{di_{L1}}{dt}; \\ V_{L2} &= L_2 \frac{di_{L2}}{dt}; \\ V_{L3} &= L_3 \frac{di_{L3}}{dt}. \end{aligned}$$

З повної системи рівнянь, утвореної топологічними і компонентними рівняннями, отримаємо наступні рівняння:

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_1 \dot{i}_1 + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + L_3 \frac{di_{L3}}{dt}; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{dJ_3}{dt} - \frac{dJ_2}{dt} - \frac{d\dot{i}_1}{dt}; \\ \frac{di_3}{dt} &= \frac{dJ_2}{dt} - \frac{d\dot{i}_1}{dt}, \end{aligned}$$

де $\dot{i}_1 = i_{L1} = i_{R1}$; $i_2 = i_{L2} = i_{R2}$; $i_3 = i_{L3} = i_{R3}$; $J_2 = i_{J2}$; $J_3 = i_{J3}$.

Підставимо вирази для похідних залежних змінних стану i_2 і i_3 в перше рівняння:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_1 i_1 + L_1 \left(\frac{dJ_3}{dt} - \frac{dJ_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) + L_3 \left(-\frac{dJ_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right).$$

Перенесемо з правої частини в ліву доданки, що містять $\frac{di_1}{dt}$, а рівняння для залежних змінних стану залишимо в колишньому вигляді. Тоді кінець кінцем отримаємо наступну систему рівнянь за методом змінних стану для електричної мережі:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1 + L_2 + L_3} \left[L_2 \left(\frac{dJ_3}{dt} - \frac{dJ_2}{dt} \right) - L_3 \frac{dJ_2}{dt} - R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 \right];$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{dJ_3}{dt} - \frac{dJ_2}{dt} - \frac{di_1}{dt};$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{dJ_2}{dt} - \frac{di_1}{dt}.$$

Отримана система рівнянь містить в правих частинах похідні від джерел електричної енергії, а похідні залежних змінних стану виражаються через похідні незалежної змінної стану. Після знаходження струмів напруги вузлом можна визначити за наступними виразами:

$$V_2 = E - (R_1 + j\omega L_1) i_1;$$

$$V_3 = E - (R_2 + j\omega L_2) i_2.$$

Для розрахунків сталого режиму перетворимо систему диференціальних рівнянь до алгебраїчної форми [2, 3] шляхом заміни $\frac{d}{dt}$ на $j\omega$.

Вважаючи $\omega = \pi$, знайдемо величини індуктивностей гілок

$$L_1 = \frac{20}{\omega} \text{ Гн}, \quad L_2 = \frac{30}{\omega} \text{ Гн}, \quad L_3 = \frac{25}{\omega} \text{ Гн}.$$

На рис.2 наведено робочий аркуш MathCAD, який дозволяє отримати необхідне рішення.

Спочатку задаються вхідні дані: робоча частота, величини індуктивностей і опорів, а також задаючі величини джерел напруги і струму. Для дій з комплексними змінними визначена комплексна одиниця $j = \sqrt{-1}$.

Далі задаються довільні початкові значення шуканих змінних

стану i_1, i_2, i_3 . Шукані значення визначаються розрахунком за допомогою оператора.

$$\begin{aligned}
 j &:= \sqrt{-1} & w &:= \pi & p &:= j \cdot w & p &= 3.142i \\
 E &:= 115 & J_2 &:= 0.2624 - j \cdot 0.1575 & J_3 &:= 0.4199 - j \cdot 0.2099 & |J_2| &= 0.30603923 \\
 & & & & & & |J_3| &= 0.46944011 \\
 L_1 &:= \frac{20}{w} & L_2 &:= \frac{30}{w} & L_3 &:= \frac{25}{w} & R_1 &= 10 & R_2 &:= 15 & R_3 &:= 10 \\
 i_1 &:= 1 + j & i_2 &:= 0.1 - j & i_3 &:= 2 + j & \arg(J_2) &= -0.5405876 \\
 \text{Given} & & & & & & \arg(J_3) &= -0.4635523 \\
 p \cdot i_1 &= \left(\frac{1}{L_1 + L_2 + L_3} \right) [p \cdot L_2 \cdot (J_3 - J_2) + R_2 \cdot i_2 - p \cdot L_3 \cdot J_2 + R_3 \cdot i_3 - R_1 \cdot i_1] \\
 i_2 &= J_3 - J_2 - i_1 \\
 i_3 &= -J_2 - i_1 \\
 x &:= \text{Find}(i_1, i_2, i_3) & x &= \begin{pmatrix} -0.02487518 + 0.02341825i \\ 0.18237518 - 0.07581825i \\ -0.23752482 + 0.13408175i \end{pmatrix} \\
 iL_1 &:= x_0 & iL_1 &= -0.0248752 + 0.0234182i \\
 iL_2 &:= x_1 & iL_2 &= 0.1823752 - 0.0758182i \\
 iL_3 &:= x_2 & iL_3 &= -0.2375248 + 0.1340818i \\
 u_2 &:= E - R_1 \cdot iL_1 - p \cdot L_1 \cdot iL_1 & u_3 &:= E - R_2 \cdot iL_2 - p \cdot L_2 \cdot iL_2 \\
 u_2 &= 115.7171711679 + 0.26332117i & u_3 &= 109.989824818 - 4.333981752i
 \end{aligned}$$

Рис.2

Given-Find, в якому записано рівняння стану в комплексній формі з урахуванням заміни диференціювання множенням на $j\omega$, коли рівняння приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
 j\omega i_1 &= \frac{1}{L_1 + L_2 + L_3} [L_2(j\omega J_3 - j\omega J_2) - L_3 j\omega J_2 - R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3]; \\
 i_2 &= J_3 - J_2 - i_1; \\
 i_3 &= -J_2 - i_1.
 \end{aligned}$$

Результат рішення поступає у вектор x , який заповнюється після виклику функції Find. З вектора x значення струмів привласнюються змінним V2 і V3. За їх допомогою і визначаються потенціали небалансуючих вузлів мережі. Результати рішення збігаються з отриманими в [5] за допомогою традиційного методу вузлових напруг після проведе-

ння ряду вказаних перетворень електричної системи.

Таким чином, показана можливість застосування методу змінних стану для розв'язання мережевих задач електроенергетики. Як показано в процесі аналізу представленим методом, властивості надмірності змінних стану, що виявляються в електричних мережах, досить легко долаються. Це відкриває широкі можливості для використання розв'язання задач аналізу електричних мереж багаточисельних добре відлагоджених алгоритмів формування рівнянь стану і чисельних методів для їх інтегрування.

1. Герасименко А.А., Федін В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – Ростов -н/Д.: Феникс, 2006. – 720 с.
2. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем. – М.: Энергия, 1971. – 360 с.
3. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. – М.: Энергия, 1972. – 323 с.
4. Идельчик В.В. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
5. Чуа Л.О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электрических схем. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
6. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К.: Техніка, 1975. – 768 с.
7. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем. – М.: Мир, 1970. – 344 с.
8. Дьяконов В.П. MathCAD 8PRO в математике, физике и Internet. – М.: Нолидж, 2000. – 512 с.

Отримано 08.12.2010

УДК 629.113

В.Х.ДАЛЕКА, В.Ф.ХАРЧЕНКО, доктора техн. наук,
М.І.ШПІКА, канд. техн. наук, Н.О.ГРИЦЕНКО
Харківська національна академія міського господарства

ТЯГОВИЙ ПРИВОД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ГІБРИДНОЮ ЕНЕРГОУСТАНОВКОЮ

Показано шляхи вдосконалення існуючих транспортних засобів з двигунами внутрішнього згорання за рахунок впровадження гібридних енергоустановок і тягового електроприводу з асинхронними електродвигунами.

Показаны пути совершенствования существующих транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания за счет внедрения гибридных энергетических установок и тягового электрического привода с асинхронными электродвигателями.

The ways of perfection of existent transports vehicles are shown with combustion engines due to introduction of hybrid power plants and hauling electric drive with asynchronous electric motors.

Ключові слова: тяговий привод, гібридна енергоустановка, суперконденсатор, акумуляторна батарея, перетворювач частоти, тяговий електродвигун.