

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Кусакін Юрій Олександрович

УДК 621.316.729

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ ПІДТРИМАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
ЕНЕРГІЇ І СТІЙКОСТІ ПРИ СИНХРОНІЗАЦІЇ І ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ
СУМІЩЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

Спеціальність 05.09.01 - електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському військовому університеті
Міністерство оборони України, м. Харків.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор,
Кононов Борис Тимофійович,
Харківський військовий університет, м. Харків,
професор кафедри електропостачання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
Зозулін Юрій Васильович,
ЗАТ „Електроважмаш”, м. Харків,
заступник головного конструктора;

доктор технічних наук, професор,
Лущик В’ячеслав Данилович,
Українська інженерно-педагогічна академія, гірничий
факультет, м. Стаханов,
професор кафедри гірничої електромеханіки.

Провідна установа Донецький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України, м. Донецьк

Захист відбудеться “25” вересня 2003 р. о 14 год. 30хв. на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному
університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного
університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 21 серпня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Режим синхронізації, не зважаючи на його короткочасність, є найбільш складним і відповідальним режимом роботи електричних машин і у випадку помилки оператора чи неправильних дій пристроїв синхронізації, пов'язаних з низькою точністю вибору і виміру початкових умов синхронізації, може викликати непоправні для електричних машин наслідки, навіть небезпечний за короткі замикання на їхніх затисках.

Паралельна робота суміщених електричних машин з мережею порівнянної потужності, у якій можливі відхилення напруги і частоти, супроводжується збуреннями, що приводять до порушення стійкості, виникненню асинхронного ходу і ресинхронізації. При цьому, як наслідок, не забезпечується ощадлива витрата палива і знижується коефіцієнт корисної дії процесу перетворення енергії. Усе це знижує надійність роботи суміщених електричних машин і може привести до їх пошкодження.

Умови приведення суміщених електричних машин до стану, при якому можлива їхня синхронізація, вивчені недостатньо, а питання забезпечення при цьому вимог електроприймачів до якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти, в літературі не розглядалися.

Дійсне дослідження присвячене розв'язанню науково-технічної задачі обґрунтування умов забезпечення якості електричної енергії і стійкості при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин, у зв'язку з чим тема дослідження і розглянуті в ньому питання є актуальними і мають важливе практичне значення, тому що спрямовані на створення удосконалених пристроїв синхронізації і розподілу навантажень, що забезпечують ощадливу, надійну і безпечну експлуатацію суміщених електричних машин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до державної науково-технічної програми 5.1.6. „Ресурсозберігаючі електричні системи” і державної науково-технічної програми 04.11.05. „Високоєфективні ресурсозберігаючі електромеханічні і енерготехнологічні системи”, а також відповідно до планів науково-дослідних робіт Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” і Харківського військового університету за замовленими науково-дослідними роботами „Безпека”, звіт № 26/1/279, 2001р. (виконавець) і „Керівництво”, звіт № 26/1/295, 2001р. (виконавець), виконаних в інтересах Міністерства оборони України і госпдоговірною науково-дослідною роботою з п/я Р-6362, звіт № 2839, 1989 р., інв. № 139611(виконавець).

Мета і задачі дослідження. Метою дійсного дослідження є забезпечення стійкості і підвищення якості електричної енергії за такими показниками як відхилення напруги і відхилення частоти при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі задачі:

- вивчити стан питання що досліджується;

- розробити математичну модель процесу синхронізації суміщених електричних машин;
- одержати розрахункові співвідношення для визначення умов забезпечення стійкості і якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин;
- обґрунтувати умови забезпечення стійкості і якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин з мережею обмеженої потужності;
- запропонувати технічні рішення, реалізація яких забезпечить здійснення процесу синхронізації з дотриманням необхідних умов і дозволить розподілити активні навантаження при паралельній роботі суміщених електричних машин.

Об'єкт дослідження – електромагнітні й електромеханічні перехідні процеси при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин.

Предмет дослідження – умови забезпечення стійкості і якості електричної енергії при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машинах за такими показниками як відхилення напруги і відхилення частоти.

Методи дослідження. Дослідження електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у суміщених електричних машин при синхронізації і паралельній роботі проводилося з використанням математичного моделювання досліджуваних процесів і експериментальної перевірки коректності основних результатів на натурних об'єктах. У процесі теоретичних досліджень використовувалися основні закони теоретичної електротехніки, розрахункові співвідношення отримані з використанням методів диференціального й інтегрального обчислення, а також методів рішення диференціальних і інтегральних рівнянь. Для упорядкування запису математичних співвідношень використовувалися методи векторної алгебри і теорії матриць.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблена математична модель процесу синхронізації суміщених електричних машин відрізняється від відомих моделей тим, що в ній зовнішня мережа представлена у вигляді електричної машини, потужність якої порівнянна з потужністю генератора, що включається, а в диференціальних рівняннях досліджуваного процесу, складених для зміни потокозчеплень, враховане загасання енергії на активних опорах контурів електричних машин (одержала подальший розвиток);
- розрахункові співвідношення для визначення умов забезпечення стійкості і необхідної якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти в процесі синхронізації, встановлюють залежність провалів напруги і кидків струму від параметрів установок, що включаються, режимів роботи їхніх ланцюгів збудження, величини і характеру навантаження і початкових параметрів синхронізації: неоднаковості амплітуд

напруг які синхронізуються, кутової частоти ковзання і кута між синхронізуючими напругами (отримане вперше);

- умови забезпечення стійкості і необхідних показників якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти при паралельній роботі суміщених електричних машин отримані, виходячи з того, що зовнішня мережа має потужність, порівнянну з потужністю власних джерел енергії, і дозволяють встановити припустимі значення напруги і частоти зовнішньої мережі і напруги збудження, при яких зберігається працездатність системи електропостачання (отримане вперше).

Практичне значення одержаних результатів:

- використання результатів дослідження дозволяє здійснювати проектування суміщених електричних машин і пристроїв синхронізації, що забезпечують якість електричної енергії і стійкість у процесах синхронізації та паралельної роботи суміщених електричних машин у системах автономного електропостачання;

- результати дослідження можуть бути також використані при розробці пристроїв синхронізації синхронних генераторів.

Результати дослідження впроваджені ОКБ Комплектних апаратів ХЕМЗ у технічному проекті за темою „Розробка системи контролю та автоматичного керування газовим двигуном – генератором ДВГ2А-500”, у розділі „Розробка, виготовлення і доставка генераторів із щитами керування газовими двигунами-генераторами багатодвигунової електростанції” (Акт від 04.02.2003 р.) і Державним науково-виробничим підприємством „МЕТЕНЕРГОМАШ” у розробках схем автоматичних синхронізаторів для автономних дизельних і газодвигунових електростанцій (Акт №28 від 03.02.2003 р.).

Результати дисертаційної роботи впроваджені Харківським військовим університетом при створенні лабораторної установки „Дослідження пристрою автоматичної точної синхронізації” і проведенні лекційних і практичних занять з дисципліни „Автоматизація і релейних захист у системах електропостачання”.

Особистий внесок здобувача. У роботах, виконаних у співавторстві: здобувачем запропоновано розглядати зовнішню мережу в процесі синхронізації в якості джерела обмеженої потужності, а також запропоновано перейти до системи диференціальних рівнянь, які складені відносно потокозчеплень; запропонована схема включення статорної обмотки суміщеної машини в мережі 50 Гц, та обґрунтована методика вибору реактивного опору цієї обмотки; отримані закономірності розподілу навантажень в системі електропостачання та знайдені критичні із умов забезпечення стійкості режими; отримані співвідношення для критерію стійкості паралельної роботи в умовах зміни частоти; запропонована схема системи електропостачання і варіант використання суміщеної електричної машини у якості установки гарантованого електропостачання резервного перетворювача частоти.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень доповідалися й обговорювалися на Другій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики і моделювання» в Національному

технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, 2002); на науково-технічних семінарах кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» і кафедри «Електропостачання» Харківського військового університету.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 7 наукових праць, з них 6 у статтях і 1 у тезах доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку та двох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 188 сторінок, 18 ілюстрацій до тексту та 15 ілюстрацій на 15 сторінках, 5 таблиць до тексту та 5 таблиць на 4 сторінках, 2 додатків на 6 сторінках, 117 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі роботи, викладено наукову новизну, практичну значимість одержаних результатів.

У першому розділі проведено аналіз стану питання і сформульовано задачі досліджень.

Показано, що при централізованому електропостачанні електроприймачів трифазним перемінним струмом промислової частоти 50 Гц одержання струмів підвищених частот є економічно виправданим шляхом перетворення струмів промислової частоти. Відомі схеми організації електропостачання з використанням електромашинних перетворювачів частоти не в змозі забезпечити вимоги електроприймачів категорії IA й I до якості і безперебійності електропостачання. Запропоновано об'єднати в одному агрегаті (резервному джерелі електричної енергії) функції власне джерела, установки гарантованого живлення і перетворювача частоти. Для цього система двигун-генератор оснащується роз'ємною муфтою і маховиком, а генератор цієї системи пропонується виконати у вигляді суміщеної електричної машини, що має дві статорні обмотки з числом пар полюсів $2P_1$ і $2P_2$ і дві роторні обмотки. Об'єднання в одному агрегаті резервного джерела електричної енергії, перетворювача частоти й установки гарантованого живлення дозволяє істотно поліпшити техніко-економічні характеристики системи електропостачання.

Аналіз літератури з теми досліджень показав, що процеси синхронізації і паралельної роботи суміщених електричних машин в установках гарантованого живлення вивчені недостатньо, особливо в плані забезпечення в цих процесах необхідних показників якості електричної енергії. У відомих роботах не наводяться методики проектування пристроїв синхронізації, початкові параметри синхронізації обираються за результатами натурних досліджень цього процесу, у зв'язку з чим діапазон припустимих значень неоднаковості амплітуд напруг, які синхронізуються, кутової частоти ковзання і кута вмикання є істотно менше можливого. Це приводить до невиправданого затягування процесу синхронізації через необхідність виконання операцій приведення початкових параметрів до

умов синхронізації. Щоб уникнути серйозних наслідків, пов'язаних з можливими помилковими діями обслуговуючого персоналу чи пристроїв автоматики, процес точної синхронізації замінюють процесом самосинхронізації чи грубої синхронізації, що неминуче приводить до появи небезпечних для роботи електроприймачів провалів напруги та до істотного ускладнення схемних рішень і збільшення вартості обладнання системи електропостачання. При паралельній роботі власних джерел електроенергії з зовнішньою мережею не використовуються їхні можливості з компенсації збурень, властивих для системи електропостачання обмеженої потужності. Ряд особливостей суміщених електричних машин, які використовуються у системі автономного електропостачання, зокрема особливостей, пов'язаних з генераторним режимом у мережах 50 Гц і 400 Гц та генераторним режимом у мережі 400 Гц і режимом синхронного компенсатора у мережі 50 Гц, у літературі не розглядався.

В другому розділі показано, що складність і трудомісткість натурних досліджень процесу синхронізації, висока вартість таких досліджень обумовлюють необхідність розробки математичних моделей, за допомогою яких є можливість вивчати цей процес і запропонувати обґрунтоване рішення щодо вибору умов його здійснення.

При розробці математичної моделі в якості вихідних використані рівняння рівноваги напруг, записані в системі відносних одиниць у координатних осях «d» і «q», що обертаються із синхронною швидкістю. Суміщена електрична машина уявляється такою, що складається ніби з двох «окремих» електричних машин. При цьому вважається, що конструкція суміщеної електричної машини виконана таким чином, що взаємно індуктивні зв'язки між «окремими» машинами відсутні і, що в машині є дві статорні обмотки на різне число пар полюсів, дві обмотки збудження і дві демпферні короткозамкнуті обмотки. Зовнішня мережа, що працює з частотою 50 Гц, уявляється у вигляді неявнополюсного генератора, що має одну статорну обмотку, одну обмотку збудження і дві заспокійливі обмотки, при цьому його потужність порівнянна з потужністю суміщеної електричної машини. Автономна мережа, що працює з частотою 400 Гц, уявляється електричною машиною, що має одну статорну обмотку, обмотку збудження і дві демпферні обмотки. З урахуванням зроблених зауважень рівняння рівноваги напруг для мережі 50 Гц і мережі 400 Гц представимо в такий спосіб:

$$\tilde{U}_i = \tilde{r}_i \tilde{I}_i + \frac{d\tilde{\psi}_i}{dt} + \tilde{\omega}_i \tilde{\psi}_i, \quad (1)$$

де матриці напруг \tilde{U}_i , опорів \tilde{r}_i , струмів \tilde{I}_i , потокозчеплень $\tilde{\psi}_i$ і кутових частот обертання $\tilde{\omega}_i$ мають вигляд:

(2)

де $U_{di}, U_{qi}, I_{di}, I_{qi}, \psi_{di}, \psi_{qi}$ - напруги, струми і потокозчеплення статорних обмоток в проекціях на вісі d і q; $U_{fi}, I_{fi}, \psi_{fi}$ - напруга, струм і потокозчеплення обмотки збудження; $I_{rdi}, I_{rqi}, \psi_{rdi}, \psi_{rqi}$ - струми і потокозчеплення демпферних

обмоток; r_{ci}, r_{fi}, r_{ri} - активні опори статорних і роторних обмоток, $i=1,2$, причому $i=1$ відповідає колам, що відносяться до частоти, дорівнюваної 50 Гц, $i=2$ відповідає ланцюгам, що відносяться до частоти, дорівнюваної 400 Гц.

Рівняння рівноваги напруг суміщеної електричної машини представлені у вигляді рівняння (1), однак матриці напруг \check{U}_M , опорів \check{r}_M , струмів I_M і потокозчеплень $\check{\psi}_M$ відрізняються від відповідних матриць (2) і мають такий вигляд:

(3)

Система рівнянь (1) доповнена рівняннями зв'язку між потокозчепленнями і струмами:

$$\check{\psi}_i = \check{x}_i \check{I}_i, \quad (4)$$

де \check{x}_i - матриці реактивних опорів статорних і роторних контурів мереж 50 Гц і 400 Гц мають вигляд:

$$\check{x}_i = \begin{pmatrix} x_{di} & 0 & x_{adi} & x_{adi} & 0 \\ 0 & x_{qi} & 0 & 0 & x_{aqi} \\ x_{adi} & 0 & x_{fi} & x_{adi} & 0 \\ x_{adi} & 0 & x_{adi} & x_{rdi} & 0 \\ 0 & x_{aqi} & 0 & 0 & x_{rqi} \end{pmatrix}, \quad i=1,2. \quad (5)$$

Матриця реактивних опорів суміщеної електричної машини має вигляд:

(6)

Спільна робота мережі 50 Гц, мережі 400 Гц і суміщеної електричної машини описується рівняннями першого і другого законів Кирхгофа для електричних кіл, утворених електричними машинами і навантаженням.

Для запису рівнянь рівноваги напруг генератора, який включається, у координатних осях працюючого генератора використані формули прямого і зворотного переходу $\check{\Pi}(j)_{11(22)} = \check{C}\check{\Pi}(j)_{1(2)}$; $\check{\Pi}(j)_{1(2)} = \check{C}_t \check{\Pi}(j)_{11(22)}$, де $j=1,2,3$; $\check{\Pi}(1) = \check{U}$; $\check{\Pi}(2) = \check{I}$; $\check{\Pi}(3) = \check{\psi}$;

$$\check{C} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}; \quad (7)$$

\check{C}_t транспонована матриця матриці \check{C} .

Поточне значення кута δ_i між координатними осями дорівнює $\delta_i = \int_0^t \omega_{si} dt + \delta_{0i}$, де ω_{si} - кутова швидкість ковзання, δ_{0i} - початковий кут між роторами.

Переходячи в рівнянні (1) від струмів до потокозчеплень, тобто виконуючи перетворення $\tilde{x}_i^{-1} \tilde{\psi}_i = \tilde{x}_i^{-1} \tilde{x}_i \tilde{I}_i = \tilde{f}_i \tilde{\psi}_i = \tilde{I}_i$ і використовуючи правила переходу (7), систему рівнянь (1) можна подати у вигляді:

(8)

де $\tilde{f}_i = \tilde{x}_i^{-1}$ - матриця реактивних провідностей статорних і роторних контурів.

Для обліку зміни ковзання ω_s рівняння (1-8) доповнені рівняннями відносного руху роторів електричних машин

(9)

де M_{qi} - рушійні моменти приводних двигунів; T_{ji} - інерційні постійні.

Диференціальні рівняння, що описують досліджуваний процес, є нелінійними і нестационарними, а власне суміщена електрична машина являє собою багатозв'язний об'єкт автоматичного регулювання. Математична модель досліджуваного процесу дозволяє одержати не тільки конкретні результати розрахунку, але й провести обчислювальний експеримент. У ході обчислювального експерименту було встановлено, що на початковому етапі процесу синхронізації нелінійна модель процесу, який розглядаємо, може бути замінена лінійною моделлю. При цьому виявилось, що зазначене твердження справедливе для широкого діапазону зміни інерційної постійної системи гарантованого живлення (від $T_j = 950$ рад, до $T_j = 9514$ рад) і для наступного діапазону зміни початкових значень кутових частот ковзання (від $\omega_s = 0$ до $\omega_s = 6\%$ $\omega_{ном}$). З огляду на те, що для дизель-інерційних систем гарантованого живлення, потужність яких дорівнює 500 - 750 кВт, розглянутий діапазон зміни інерційної постійної практично перекриває всі можливі варіанти побудови таких систем, і виходячи з того, що робота суміщених електричних машин в умовах, коли частота ковзання перевищує величину, дорівнювану 3 Гц, неприпустима за технічними вимогами, можна стверджувати, що початковий етап процесу синхронізації суміщених електричних машин припустимо описувати системою лінійних диференціальних рівнянь.

Особливістю цієї системи є наявність коефіцієнтів, що періодично змінюються. Для таких систем у роботі А.М. Ляпунова доведена можливість їхнього приведення до систем диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Оскільки в розглянутій системі диференціальних рівнянь виконуються такі умови:

$$\int_0^t G(t) dt = at + \xi(t); G(t) = a + x(t), \quad (10)$$

де $G(t)$ – сума діагональних елементів матриці, складеної з коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь з перемінними коефіцієнтами; $\xi(t)$, $\int_0^t x(t) dt$ - обмежені функції; a – постійний коефіцієнт, то можливий перехід до системи рівнянь з постійними коефіцієнтами.

У даному дослідженні використано наближений метод приведення, за яким перемінні коефіцієнти замінюються постійної складовою результату їхнього розкладання в ряд Фур'є. При цьому розв'язання лінійної системи диференціальних рівнянь спочатку виконано, виходячи з допустимості зневаги впливом активних опорів контурів машин. У подальшому проведена оцінка коректності припущення про можливість подання у обмоток ідеальними провідниками, результати розв'язання уточнені і зроблений висновок про те, що за ідеальні провідники припустимо приймати ті обмотки, що індуктивно пов'язані з розглянутою обмоткою.

У результаті розв'язання отримані аналітичні співвідношення для визначення проекцій напруги на координатні осі d і q у початкові моменти часу після синхронізації:

(11)

Значення величин U_{d1oi} , U_{d2oi} , U_{q1oi} , U_{q2oi} визначається для режиму, що передує синхронізації. У роботі отримані також аналітичні співвідношення для визначення початкового кидка струму. Провал напруги максимальний у випадку, коли потужність генератора, який включається, дорівнює потужності працюючого генератора. Розрахунковим режимом для визначення значення початкових параметрів синхронізації варто вважати режим несиметрії попередніх навантажень, коли $S_{H1} = 1$, а $S_{H2} = 0$.

Забезпечення динамічної стійкості процесу синхронізації зводиться до визначення припустимої кутової частоти ковзання при заданій величині кута вмикання. Для оцінки величини струмів, що протікають у системі в процесі синхронізації, варто знайти кут, на який відхиляється генератор при вмиканні, і проаналізувати вплив зміни надлишкового моменту і частоти обертання. Рівняння фазової траєкторії, що обмежує зону початкових значень частоти ковзання ω_s і кута вмикання $\delta_{про}$, при який здійснюється синхронізація, має вигляд:

(12)

де $\omega_s_{доп}$ – частота ковзання, у %; $M_{ji} = \frac{f_{cji}}{f_{cli} + f_{c2i}} (I_{djo} \psi_{qjo} - I_{qjo} \psi_{djo})$ – власні складові електромагнітного моменту; $M_{mi} = \frac{f_{cli} \cdot f_{c2i}}{f_{cli} + f_{c2i}} (\psi_{d1oi} \psi_{d2oi} + \psi_{q1oi} \psi_{q2oi})$ – взаємні чи синхронізуючі складові електромагнітного моменту.

Принциповою особливістю запропонованого в дійсній роботі підходу є введення більш жорсткої, ніж стійкість, умови вибору припустимого значення кутової частоти ковзання при синхронізації. Такою умовою є умова забезпечення в процесі синхронізації якості напруги. Виходячи з того, що якість напруги буде забезпечено у випадку, коли граничне значення кута вмикання $\delta_{пред}$ не перевищує значення $\delta_{доп}$, обумовленого для провалу напруги, що допускається, фазова траєкторія, що обмежує зону успішної синхронізації з необхідною якістю напруги, повинна визначатися з (12) із заміною величини $\delta_{пред}$ величиною $\delta_{доп}$.

Зниження провалів напруги і кидків струму при синхронізації може бути досягнуто не тільки відповідним вибором значень початкових параметрів синхронізації. Істотний результат може бути досягнутий і шляхом зниження еквівалентної провідності суміщеної електричної машини, тобто шляхом зниження величини f_c , дорівнюваної $\frac{f_{dd} + f_{qq}}{2}$. Дійсно, обчислюючи матрицю, зворотну матриці опорів \check{x} електричної машини (6), одержимо:

(13)

З (13) випливає, що величини f_{dd} і f_{qq} визначаються реактивними опорами електричної машини по осях x_d та x_q . Для збільшення значень величин x_d і x_q і тим самим для зниження провідності f_{dd} і f_{qq} пропонується розмістити на спинці статора суміщеної електричної машини обмотку підмагнічування, яку варто відключати на час синхронізації. При відключенні обмотки підмагнічування статора збільшується подовжня і поперечна реактивності машин, що обмежує провал напруги і кидок струму при синхронізації. Величина провалу напруги на шинах залежить від кута вмикання генераторів, які синхронізуються, і кутової частоти ковзання. Для генераторів потужністю 500-750 кВт у випадку, коли припустимий провал напруг складає 15 % $U_{ном}$, кут вмикання не повинен перевищувати 60° , а частота ковзання f_s не повинна перевищувати величину, дорівнювану 0,166 Гц. Зміна величини неоднаковості амплітуд напруг, які синхронізуються, ΔU у діапазоні $\pm 5\%U_{ном}$ практично не впливає на величину провалу напруги на шинах.

У третьому розділі визначені умови, при яких мають місце мимовільні зміни сталого режиму роботи систем електропостачання. При оцінці стійкості паралельної роботи визначено вплив зміни активного P_H і реактивного Q_H навантаження на такі параметри, як величини кутів навантаження Θ , напруга U на шинах гарантованого живлення і частота f системи електропостачання. З цією метою складено рівняння балансу активного і реактивного навантаження при паралельній роботі суміщених електричних машин у випадку, коли зміна активного навантаження дорівнює ΔP_H , а зміна реактивного навантаження дорівнює ΔQ_H :

(14)

де P_i - активне навантаження на валу i -го приводного двигуна.

З (14) випливає, що нестійким буде такий режим, при якому будь-яка, навіть дуже мала зміна відхилення навантаження може викликати необмежено великі зміни параметрів Θ_i , U , ω . У відповідності зі зробленим визначенням, хитким буде такий режим роботи системи, коли визначник D , складений для системи рівнянь (14), буде дорівнювати нулю:

(15)

При зміні реактивного навантаження і при сталості частоти в системі, сталості активного навантаження і сталості рушійних моментів приводних двигунів критичний за стійкістю режим наступить при

(16)

Співвідношення (16) буде мати місце, якщо реактивні навантаження в системі розподіляються за астатичною характеристикою, тобто $S_{U_i} = 0$. Для визначення умов виникнення критичних до зміни напруги машини і напруги мережі режимів знайдені екстремуми функцій P_i і Q_i , за допомогою яких виведено співвідношення для оцінки стійкості розглянутої системи при $E_i = \text{var}$ і $U = \text{var}$. Тенденція системи до нестійкості виявляється при

(17)

Мінімально припустимі значення E_i хв і $U_{\text{мин}}$, при яких ще зберігається незмінна потужність працюючої установки, визначаються за наступними формулами:

(18)

Величина перевантаження роторних ланцюгів суміщеної електричної машини визначається різницею $E_i - U$ і величиною статизма її зовнішньої характеристики. Чим менше статизм, тим більше перевантаження кола ротора. Цілком природно тому прагнення збільшити статизм установки при її роботі в режимі двигуна.

У роботі проаналізовані збурення, викликані змінами частоти, і знайдений критерій стійкості системи при зміні частоти. Тенденція системи до нестійкості виявляється при таких значеннях кутів навантаження:

(19)

У четвертому розділі проаналізовані принципи роботи логічних блоків синхронізаторів, що реалізують способи одержання постійного кута випередження $\delta_{on} = \text{const}$ і постійного часу випередження $\delta_{on} = \omega_s \cdot t_{\text{вкл}}$, і запропонований спосіб зонної синхронізації, що дозволяє істотно прискорити процес синхронізації. З результатів розрахунку області успішної синхронізації, наведених у розділі 2, впливає, що у фазових координатах δ, ω_s ця область являє собою зону, обмежену фазовими траєкторіями $\pm \delta(\omega_s)$, тобто зону, позначену чотирикутником 1 на мал. 1.

Гранична фазова траєкторія 1 (сепаратриса $\pm \delta(\omega_s)$) обмежує область успішної синхронізації. Пряма 2, що проходить через початок координат, являє собою лінію включення, що відповідає виразу $\delta_{\text{расч}} = \omega_s \cdot t_{\text{вкл}}$. Абсциси зони включення 3 (на мал. 1 зона заштрихована) для будь якого значення ординати ω_s знаходять шляхом складання абсцис сепаратриси і лінії вмикання, що відповідають цьому ж значенню ординат. Стрілками позначені напрямки фазових траєкторій у верхній ($\omega_s > 0$) і нижній ($\omega_s < 0$) напівплощинах. Для фазової траєкторії, що відповідає кутовій частоті ковзання ω_{s1} , успішна синхронізація здійснюється у всьому діапазоні поточних значень кута δ від δ_1 до δ_2 .

Для усунення непередбачених наслідків нерівномірності розподілу навантажень у даному дослідженні пропонується розподілити навантаження при паралельній роботі, використовуючи примусову статичну характеристику

$$\overline{f_{oi}} - \overline{f_i} = S_i \overline{P_i}, \quad (20)$$

де $\overline{f_{oi}}, \overline{f_i}, \overline{P_i}$ - величини настроювання, параметра який регулюємо і навантаження агрегату, виражені у відносних одиницях. Ілюстрація способу примусових статичних характеристик наведена на мал. 2.

За цим способом реальне навантаження і-го агрегату співставляється з необхідним, обумовленим заздалегідь заданою примусовою статичною характеристикою, представленою в координатах відносних величин \overline{f} і \overline{P} . В підсилювачі-суматорі відбувається порівняння цих сигналів відповідно до закону регулювання (20), що стосовно до розглянутого пристрою має вигляд:

$$(U_{fi} - U_{fio})K_f + S_i K_p U_{pi} = \Delta = 0. \quad (21)$$

У випадку, коли для розрахункового значення частоти $\overline{f_i}$ навантаження і-го агрегату $\overline{P_i}$ більше за необхідне, що обумовлене примусовою статичною характеристикою, на виході підсилювача-суматору з'являється сигнал $\Delta > 0$, відповідно до якого регулятором швидкості РШ відпрацьовується команда на зсув статичної характеристики і-го агрегату ліворуч, до перетинання її з заданою характеристикою в точці А (мал. 2).

Запропоновано схему суміщеної електричної машини, з послідовно включеною статорною обмоткою. Такий варіант виконання суміщеної електричної машини дозволяє зменшити негативні наслідки коротких замикань у колах мережного вводу. Визначено умови стабілізації напруги в режимі двигуна

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{ш} + \dot{I}_q \dot{x}_q + \dot{I}_d \dot{x}_d - \dot{E}_m \quad (22)$$

та генераторному режимі роботи суміщеної електричної машини

$$\dot{E}_m = \dot{U}_{ш} + \dot{I}_q \dot{x}_q + \dot{I}_d \dot{x}_d, \quad (23)$$

де $\dot{U}_{ш}$ – напруга на шинах, \dot{E}_m - противоерс електричної машини.

Для забезпечення необхідної якості напруги на шинах гарантованого живлення в момент зникнення напруги повинна виконуватися така рівність:

$$\left| \dot{U}_c + \dot{E}_m \right| = \left| \dot{E}_m \right|. \quad (24)$$

З (24) при відомій величині \dot{U}_c легко знайти як величину, так і напрямок вектора \dot{E}_m , а значить визначити необхідні подовжню x_d і поперечну x_q реактивності генератора.

У розділі, крім того, викладена методика проектування синхронізатора, що включає вибір вихідних даних, вибір базисних величин S_δ и U_δ , визначення припустимої величини кута вмикання $\delta_{вкл}$ шляхом побудови за знайденими формулами графічної залежності величини провалу напруги δU від величини початкового кута зсуву фаз δ_0 . Далі визначається допустиме значення кутової

частини ковзання $\omega_{s \text{ пред доп}}$ і будується фазова траєкторія, що обмежує зону початкових значень частоти ковзання ω_s і кута включення δ_o , при яких синхронізація вважається успішною. Для систем електропостачання, електроприймачі яких не критичні до якості електричної енергії, що виробляється максимальне значення кутової частоти ковзання $\omega_{s \text{ пред доп}}$ знаходиться при значенні $\delta_{\text{пред}} = \pi$ і $\delta_o = 0$. Для систем електропостачання, критичних до якості електроенергії, що виробляється максимальне значення $\omega_{s \text{ доп}}$ знаходиться при $\delta_{\text{пред}} = \delta_{\text{доп}}$.

Викладена також методика проектування суміщених електричних машин, що мають статорну обмотку підмагнічування. У методиці висвітлені особливості вибору електромагнітних навантажень суміщених електричних машин. Показано, що при виборі лінійних навантажень необхідно виходити з наступної умови

$$\frac{P'_{\text{дв}}}{K_{\text{обдв}} \cdot A_{\text{дв}} \cdot B_{\text{дв}}} = \frac{P'_{\text{Г}}}{K_{\text{обГ}} \cdot A_{\text{Г}} \cdot B_{\text{Г}}} = \text{const}, \quad (25)$$

де $P'_{\text{дв}} = \frac{K_E \cdot P_{\text{двном}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}$; $P'_{\text{Г}} = \frac{K_E \cdot P_{\text{Гном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}}$ - розрахункові потужності двигуна і

генератора; $K_E = \frac{E}{U_{\text{ном}}} \approx 1,08$; $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності; $\eta_{\text{ном}}$ - коефіцієнт

корисної дії; $K_{\text{обдв}}$, $K_{\text{обГ}}$ - обмотувальні коефіцієнти двигуна і генератора; $A_{\text{дв}}$, $A_{\text{Г}}$ - лінійні навантаження двигуна і генератора, А/м; $B_{\text{дв}}$, $B_{\text{Г}}$ - індукція в зазорі, Тл; $n_1 = \frac{60f_1}{P_1}$, $n_2 = \frac{60f_2}{P_2}$ - частоти обертання полів двигуна і генератора, про/хв;

P_1, P_2 - число полюсів двигуна і генератора.

Встановлено, що при проектуванні суміщених електричних машин довільно повинно вибиратися тільки одне з лінійних навантажень, допустимо $A_{\text{дв}}$, величина ж $A_{\text{Г}}$ повинна обраховуватися відповідно до співвідношення (25). Таким чином, вибираючи відповідно до типових розв'язань значення величин $A_{\text{дв}}$ і $B_{\text{дв}}$, обраховується добуток D^2 ?. У ході розрахунку магнітного кола необхідно враховувати ефект, створюваний обмоткою підмагнічування, виходячи при цьому з забезпечення зниження величини провалу напруги при синхронізації до бажаного значення.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень у дисертації вирішена науково-технічна задача обґрунтування умов забезпечення якості електричної енергії і стійкості при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин.

1. Режими синхронізації і наступної паралельної роботи суміщених електричних машин, що працюють у системах електропостачання як джерела електричної енергії, у літературі практично не розглядалися, рекомендацій зі здійснення процесу синхронізації таких електричних машин немає, як немає і рекомендацій з їхнього використання для компенсації відхилень напруги і частоти, що мають місце в мережі обмеженої потужності. Застосовувані при

синхронізації технічні пристрої належним чином не обґрунтовані, процес синхронізації невиправдано затягується, методики проектування пристроїв синхронізації базуються на результатах експериментальних досліджень, а знайдені за їх результатами значення початкових параметрів синхронізації не відбивають весь діапазон припустимих початкових умов синхронізації, немає рекомендацій з використання тих чи інших методів виміру кутової частоти ковзання і кута між напругами, які синхронізуються, при створенні пристроїв синхронізації.

2. Розроблена математична модель процесу синхронізації і запропоновані розрахункові співвідношення для визначення кидків струму і провалів напруги враховують відхилення напруги і частоти в мережі обмеженої потужності, а також згасання електромагнітної енергії в обмотках електричних машин, і тим самим адекватно відбивають фізичні явища, що мають місце в процесі синхронізації.

3. Вибір початкових параметрів синхронізації повинен здійснюватися виходячи з вимог забезпечення в цьому процесі якості електричної енергії, що є більш жорсткою вимогою, ніж вимога забезпечення стійкості процесу синхронізації. Розрахунковим режимом при визначенні початкових параметрів синхронізації варто вважати режим несиметрії попередніх навантажень, коли працююча машина має номінальне навантаження, а машина, що включається, працює в режимі холостого ходу. Зміни величини неоднаковості амплітуд напруг, які синхронізуємо, у діапазоні $\pm 5\% U_{\text{ном}}$ практично не позначаються на величині провалу напруги на шинах, що певним чином залежить від кута включення і кутової частоти ковзання. Так, наприклад, для суміщених маховичних електричних машин потужністю 500-750 кВт у випадку, коли припустимий провал напруги складає $15\% U_{\text{ном}}$, кут вмикання не повинен перевищувати 60° , а частота ковзання не повинна перевищувати величину, дорівнювану 0,166 Гц.

4. Отримані математичні співвідношення для визначення зміни параметрів електричної енергії, викликаних зміною величини напруги живильної мережі, дозволили встановити, що навіть при зміні величини напруги зовнішньої мережі в межах діапазону припустимих значень можливе перевантаження роторних і статорних кіл суміщеної електричної машини, наслідки якого можуть привести до втрати статичної стійкості системи електропостачання. Для запобігання небезпечних наслідків зміни величини напруги зовнішньої мережі доцільно в режимі двигуна статорної обмотки, підключеної до мережі частотою 50 Гц, збільшувати статизм регульовальної характеристики до 5%, знижуючи його в генераторному режимі до 1%. Встановлено, що при роботі зі статизмом $S_c = 5\%$, відхилення напруги мережного введення будуть знаходитися в межах $(+4,25 - 5,5)\% U_{\text{ном}}$.

5. При паралельній роботі суміщених електричних машин з мережею обмеженої потужності найкращим режимом її роботи є режим синхронного компенсатора, коли статорна обмотка цієї машини, підключена до мережі частотою 50 Гц, використовується для виробництва реактивної енергії, що дозволяє збільшити в 1,25 рази величину активної потужності, переданої по

лініях електропередачі, чи зменшити в 1,5 рази їхній перетин і знизити приблизно удвічі відхилення напруги на шинах системи. Використання наведених рекомендацій, що визначають варіанти компенсації впливу зміни навантаження на зміну напруги і частоти на шинах гарантованого живлення, дозволить знизити величину відхилення напруги до $\pm 5\text{В}$, знизити величину відхилення частоти до $\pm 1\% f_{\text{ном}}$ і забезпечити пропорційний розподіл навантажень при паралельній роботі агрегатів у системі, при якому максимальна неузгодженість активних навантажень не перевищить 3,2%, а максимальна неузгодженість реактивних навантажень не перевищить 9,5%.

6. Для прискорення процесу синхронізації команду на вмикання вимикача генератора необхідно подавати в зоні, яка обмежена граничною фазовою траєкторією, використовуючи для побудови цієї зони сепаратрису синхронізації з необхідною якістю напруги і лінію вмикання, що реалізує постійний час випередження. При цьому, при вимірі параметрів синхронізації перевагу варто надавати імпульсному способу виміру кутів і кутових частот, а для розширення можливого діапазону кутів подачі команди до значень більших 360° на вході синхронізатора необхідно мати дільник частоти з кратністю розподілу n .

7. Для зниження провалів напруги й обмеження кидків струму в процесі синхронізації на статорі суміщеної електричної машини необхідно мати обмотку підмагнічування, що відключається під час синхронізації.

8. При проектуванні суміщених електричних машин необхідно враховувати, що вони обов'язково повинні оснащуватися синхронізаторами, а також виходити зі специфічних особливостей вибору електромагнітних навантажень і особливостей розрахунку магнітних кіл, пов'язаних з використанням обмотки підмагнічування статора.

9. Для забезпечення стійкості при паралельній роботі суміщених електричних машин і з метою економії витрати палива необхідно використовувати метод примусових статичних характеристик для розподілу навантажень між агрегатами.

10. Теоретична значимість виконаних досліджень і отриманих наукових результатів полягає в тому, що вони розвивають теорію електричних машин стосовно суміщених електричних машин, їх електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у режимах синхронізації та подальшої паралельної роботи.

11. Практична значимість виконаних досліджень полягає в тому, що їхнє використання дозволяє здійснити проектування суміщених електричних машин і розробку пристроїв синхронізації, що дозволяють забезпечити стійкість процесу синхронізації і якість електричної енергії в цьому процесі за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти.

12. Достовірність результатів дослідження підтверджується коректністю використання основних положень теорії електричних машин і збігом результатів, отриманих розрахунковим шляхом, з результатами натурних досліджень процесу синхронізації.

13. Результати роботи використані в ОКБ НВО «ХЕМЗ» (м. Харків) і ДНПП «МЕТЕНЕРГОМАШ» (м. Харків), що підтверджено актами впровадження результатів дисертаційної роботи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кононов Б.Т., Кусакін Ю.А., Малиш А.Н. Математическая модель процесса синхронизации в системе электроснабжения с дизель-инерционными установками гарантированного питания с совмещенными электрическими машинами // Системи обробки інформації. - Харків: ХВУ. – 2002. - Вип. 1(17). - С. 219 – 224. *Здобувачем запропоновано розглядати зовнішню мережу в процесі синхронізації в якості джерела обмеженої потужності та запропоновано перейти до системи диференціальних рівнянь, складених для зміни поточкозчеплень.*
2. Кононов Б.Т., Кусакін Ю.А. Обеспечение качества электрической энергии в системах гарантированного электроснабжения при коротких замыканиях в цепях сетевого ввода // Системи обробки інформації. - Харків: ХВУ. – 2001. - Вип. 2. - С. 127 – 132. *Здобувачем запропоновано статорну обмотку електричної машини в мережі 50 Гц включати послідовно та запропоновані умови вибору реактивностей цієї обмотки.*
3. Кононов Б.Т., Кусакін Ю.А. Статическая устойчивость параллельной работы дизель-инерционных установок гарантированного питания // Збірник наукових праць Харківського військового університету. - Харків: – 2001. - Вип. 2 (32). - С. 71 – 74. *Здобувачем отримано закономірності розподілу навантажень в системі електропостачання и знайдені критичні із умов забезпечення стійкості режиму.*
4. Кононов Б.Т., Кусакін Ю.А. Параллельная работа установок гарантированного питания в условиях изменения частоты // Збірник наукових праць Харківського військового університету. - Харків: – 2001. - Вип. 4(34). - С. 119 – 120. *Здобувачем отримано співвідношення для критерію стійкості паралельній роботі в умовах зміни частоти.*
5. Ручка А.Е., Кусакін Ю.А. Дизель-инерционная установка гарантированного питания с совмещенной электрической машиной // Системи обробки інформації. - Харків: ХВУ. – 2001. - № 5 (15). - С. 208 – 210. *Здобувачем запропонована схема системи електропостачання і варіант використання сумісної електричної машини, у якості установки гарантованого постачання, резервного джерела енергії частоти.*
6. Кусакін Ю.А. Параллельная работа установок гарантированного питания при изменении режима возбуждения и переменном напряжении сети // Системи обробки інформації. - Харків: ХВУ. – 2002. - №4 (20). - С. 262 – 270.
7. Кононов Б.Т., Кусакин Ю.А. Параллельная работа установок гарантированного питания при изменении режима возбуждения // Материалы Второй междунар. конф. «Проблемы информатики и моделирования». - Харків: - НТУ «ХПИ». - 2002. - С. 38-39.

АНОТАЦІЇ

Кусакин Ю.О. Забезпечення умов підтримання якості електричної енергії і стійкості при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.09.01 - електричні машини і апарати. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2003.

Дисертація присвячена дослідженню забезпечення умов підтримання стійкості і якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення напруги і відхилення частоти при синхронізації і паралельній роботі суміщених електричних машин. У результаті проведених автором теоретичних і експериментальних досліджень розроблено математичну модель процесу синхронізації суміщених електричних машин в мережі, яка представлена у вигляді електричної машини, потужність якої порівнянна з потужністю генератора. Встановлено зв'язок між провалами напруги та кидками струми і параметрами суміщених електричних машин, режимом їх попередньої роботи та значеннями початкових параметрів синхронізації. Отримані розрахункові співвідношення для визначення умов забезпечення стійкості і необхідної якості електричної енергії за такими показниками, як відхилення частоти і напруги в процесі синхронізації суміщених електричних машин. Розроблені методики проектування суміщених електричних машин і пристроїв синхронізації використані в ОКБ НВО «ХЕМЗ» і ДНПП «МЕТЕНЕРГОМАШ» (м. Харків), що підтверджено актами впровадження результатів дисертаційної роботи. Результати експериментальних досліджень підтвердили коректність запропонованих методик розрахунку.

Ключові слова: суміщена електрична машина, синхронізація суміщених електричних машин, паралельна робота суміщених електричних машин.

Кусакин Ю.А. Обеспечение условия поддержания качества электрической энергии и устойчивости при синхронизации и параллельной работе совмещенных электрических машин. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01- электрические машины и аппараты. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2003.

Диссертация посвящена исследованию условий обеспечения устойчивости и качества электрической энергии по таким показателям, как отклонение напряжения и отклонение частоты при синхронизации и параллельной работе совмещенных электрических машин.

В результате проведенных автором теоретических и экспериментальных исследований

- разработана математическая модель процесса синхронизации совмещенных электрических машин, отличающаяся от известных моделей тем,

что в ней внешняя сеть представлена в виде электрической машины, мощность которой соизмерима с мощностью включаемого генератора, а в дифференциальных уравнениях исследуемого процесса, составленных для изменения потокосцеплений, учтено затухание энергии на активных сопротивлениях контуров электрических машин;

- получены расчетные соотношения для определения условий обеспечения устойчивости и требуемого качества электрической энергии по таким показателям, как отклонение напряжения и отклонение частоты в процессе синхронизации, устанавливающие зависимость провалов напряжения и бросков тока от параметров включаемых установок, режимов работы их цепей возбуждения, величины и характера нагрузки и начальных параметров синхронизации: неодинаковости амплитуд синхронизируемых напряжений, угловой частоты скольжения и угла между синхронизируемыми напряжениями;

- показано, что начальный бросок тока и провал напряжения при синхронизации определяются величинами угла включения и угловой частоты скольжения синхронизируемых совмещенных электрических машин и зависят от параметров электрических машин и их режимов нагрузки;

- найдены критические из условий обеспечения устойчивости режимы и приведены рекомендации, выполнение которых позволит обеспечить стабилизацию напряжения и частоты при параллельной работе совмещенных электрических машин;

- изложены рекомендации по выбору способа измерения начальных параметров синхронизации, предложен способ зонной синхронизации, расширяющий диапазон начальных значений углов включения и угловой частоты скольжения, в котором возможно осуществить процесс синхронизации;

- предложено распределение нагрузок при параллельной работе совмещенных электрических машин осуществлять по способу принудительных статистических характеристик, обеспечивая при этом пропорциональное распределение нагрузок без использования каналов связи между электрическими машинами;

- предложена последовательная схема включения статорной обмотки совмещенной электрической машиной в сети 50 Гц, обеспечивающая снижение негативного влияния коротких замыканий в цепях сетевого ввода, и изложены рекомендации по выбору реактивных сопротивлений электрической машины, включенной последовательно;

- предложено использовать в совмещенной электрической машине обмотку подмагничивания, размещенную на спинке статора и позволяющую снизить провал напряжения и бросок тока при синхронизации;

- разработаны методики проектирования совмещенной электрической машины и устройств синхронизации.

Проведенные натурные исследования процесса синхронизации подтвердили результаты экспериментальных исследований.

Разработанные методики внедрены в ОКБ НПО «ХЭМЗ» и ГНПП «МЕТЭНЕРГОМАШ», что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

Ключевые слова: совмещенная электрическая машина, синхронизация совмещенных электрических машин, броски тока и провалы напряжения, параллельная работа совмещенных электрических машин.

Kusakin Y.A. Maintenance a condition of maintenance of required quality of electrical energy both stability at synchronization and parallel work of the combined electrical machines. - Manuscript.

The dissertation for scientific degree of candidate of science, specialty 05.09.01 - electrical machines and apparatus. - National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, 2003.

The present research is devoted to the decision of a scientific and technical task of a substantiation of conditions of maintenance of required quality of electrical energy both stability at synchronization and parallel job of the combined electrical machines, in this connection a theme of research and the questions, considered in him, are represented urgent and having the important practical importance, as are directed on creation of the advanced devices of synchronization and distribution of the loadings ensuring economical, reliable and safe operation of combined electrical machines, meeting the requirements energy- and recourse-preservation.

The developed mathematical model of process of synchronization of the combined electrical machines differs from known models by that in her the external network is submitted as the electrical machine, which capacity is commensurable with capacity of the included generator.

The developed techniques are introduced in ОКБ НПО "ХЭМЗ" and ГНПП "МЕТЭНЕРГОМАШ", that confirmed by dissertation introduction acts.

Key words: the combined electrical machine, synchronization of the combined electrical machines, throws of a current and failures of a voltage, parallel job of the combined electrical machines.