

ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СИССЕ Бубакар

МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
С СИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ  
И СЛУЧАЙНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05. 09. 03. - " Электротехнические  
комплексы и системы, включая их управление  
и регулирование "

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк - 1995

АВ 33.095

1,3-1

Работа выполнена в Донецком государственном техническом

университете

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761254 (P)

Научный руководитель - доктор

Э.Г. Куренный

Консультант

- кандидат технических наук, доцент

Ю.И. Чепкасов

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор

В.В. Зорин

- кандидат технических наук, доцент

В.К. Лебедев

Ведущая организация - Открытое Акционерное Общество "Дон ТЭП"

(г. Донецк).

Защита диссертации состоится "19" "Октября" 1995 г.  
в 14<sup>30</sup> час. в аудитории 1201 на заседании специализированного  
совета К.06.04.04 при Донецком государственном техническом  
университете: 340000, г. Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого  
государственного технического университета

Автореферат разослан "18" "Сентября" 1995 г.

Ученый секретарь

специализированного совета,

канд. техн. наук., доцент

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Ларин А.М.

**Актуальность работы.** Вопросы уменьшения потерь электроэнергии и улучшения качества напряжения весьма важны для реализации программ энергосбережения в Украине и Республике Мали. По экспертным оценкам, в СНГ от нарушения качества электроэнергии ежегодный ущерб превышает 2 млрд. руб. в год (в ценах 1985г.).

На режим систем электроснабжения большое влияние оказывают мощные электроприемники, в частности, электроприводы с синхронными электродвигателями (СД), которые широко применяются в промышленности в силу своих преимуществ: большого к.п.д., возможности компенсации реактивной мощности в сети, меньшей чувствительности к изменениям напряжения.

Параметры режимов электротехнического комплекса "сеть электроснабжения - внешняя нагрузка - электропривод с СД" (СДС) существенно зависят от напряжения питающей сети. В связи с этим для практики актуальной является задача расчета параметров режима электроприводов с синхронными двигателями при отклонениях и колебаниях напряжения, которые изменяют технико-экономические показатели СДС.

В этом направлении имеется большое количество работ. Вопросами анализа режимов занимались Веников В.А., Кузнецов В.Г., Зорин В.В., Сивокобыленко В.Ф., Рогозин Г.Г., Anderson P.M., Сыромятников И.А., Казовский Е.А. и многие другие. Однако исследования влияния напряжения проводились в рамках статических моделей, корректных лишь при медленных изменениях напряжения. Более того, в действующих Указаниях по компенсации реактивной мощности задача выбора рациональных режимов возбуждения СД решается в предположении неизменности напряжения в питающей сети. Между тем в реальных системах электроснабжения напряжение изменяется случайным образом. Кроме того, заводские источники питания имеют конечную мощность, особенно в Республике Мали.

Из сказанного следует, что для получения достоверных оценок эффективности использования СД в качестве устройств, компенсирующих реактивную мощность, необходимо учитывать изменения напряжения в сети и ее сопротивление. Однако решение этой задачи сдерживалось тем, что математическое описание (моделирование) системы электроснабжения промышленного предприятия и ее основных потребителей - СД затруднено из-за громоздкости и нелинейности системы соответствующих дифференциальных уравнений, особенно при случай-

ном изменении напряжения.

Таким образом, основное научное противоречие состоит в том, что при выборе режимов возбуждения СД практика требует учета влияния изменений напряжения на параметры режимов СДС, а соответствующие методы расчета отсутствовали.

**Цель работы и задачи исследований.** В диссертации решается научная задача разработки математических моделей электротехнических комплексов СДС, адекватно отражающих изменение параметров режимов СД и системы электроснабжения при изменениях напряжения источника питания.

Решение этой задачи позволит повысить эффективность использования СД для электросбережения путем уменьшения потерь электроэнергии и улучшения качества напряжения, что является целью работы.

Применительно к практике расчетов в электроснабжении промышленных предприятий необходимо рассчитывать: потери активной мощности в СД; характеристики тока статора, активной и реактивной мощностей СД, по которым определяют потери мощности в сети; отключения и колебания напряжения на шинах.

Для достижения этой цели в диссертации решены следующие основные задачи:

1. Установлены зависимости от напряжения параметров режимов СДС при медленных изменениях напряжения источника питания и выполнена их аппроксимация.
2. Обоснована возможность линеаризации математической модели СДС при быстрых изменениях напряжения.
3. По полной модели СДС найдены переходные функции одного и группы СД и выполнена их аппроксимация.
4. По переходным функциям предложены линейные модели СДС раздельно для каждого параметра.
5. Разработаны методы расчета параметров режимов СДС при периодических и случайных изменениях напряжения - медленных и быстрых.

**Методы исследования.** Работа выполнена в рамках вероятностного моделирования случайных процессов в электрических сетях и статистической динамики систем электроснабжения, основанных на общих методах теории автоматического регулирования. Использовано описание синхронной машины уравнениями Парка-Горева и численные методы их решения.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использо-

ванием методов теории автоматического управления и апробированной на кафедре ЭС ДОНТУ полной математической модели электропривода с СД, хорошей сходимостью рассчитанных переходных функций с выбранными аналитическими выражениями, проверкой результатов аналитических расчетов моделированием (различие в экстремумах не превышает 7,2%).

### **Защищаемые положения и результаты. Их новизна.**

1. Модель СДС при медленных изменениях напряжения, отличающаяся представлением параметров режимов в виде параболических зависимостей от напряжения источника питания.

2. Метод расчета параметров режимов СДС по статическим характеристикам, новизна и которого обусловлены использованием упорядоченных диаграмм (УД), а не графиков или плотностей вероятностного распределения напряжения источника питания - при детерминированных и случайных процессах.

3. Метод линеаризации моделей СДС ("метод идентификации"), отличающийся тем, что при быстрых изменениях напряжения модели принимаются по виду переходных функций отдельно для каждого параметра режима без воспроизведения сложной структуры исходной нелинейной модели СДС.

4. Новые аналитические выражения переходных функций параметров режимов СДС и соответствующие им линеаризованные математические модели СДС при быстрых изменениях напряжения.

5. Метод расчета параметров режимов СДС при быстрых изменениях напряжения любого вида, отличающийся использованием новых математических моделей СДС, а также представлением случайного процесса изменения напряжения в виде "белый шум - линейная система".

**Научная ценность** заключается в развитии теории электрических нагрузок электротехнических комплексов СДС путем разработки математических моделей СДС, которые позволяют достоверно оценивать последствия изменения напряжения для СД, а также других силовых и осветительных электроприемников.

**Практическая ценность** состоит в том, что предложенные методы расчета параметров режимов позволяют определить потери мощности в СД и сети, а также отклонения и колебания напряжения для комплексного ТЭО систем регулирования возбуждения СД на стадии проектирования и в действующих системах электроснабжения. Полученные результаты могут быть использованы в Указаниях по компенсации реактивной мощности, а также в лекциях по электроснабжению промышленных предприятий.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Предлагаемые методы расчета электроэнергетических показателей СДС могут быть использованы в Республике Мали и ведущими проектными организациями: "ВНИИПИ Тяжпромэлектропроект" (г.г. Киев, Харьков, Москва, Ростов-на-Дону) - при оценке энергосбережения и качества напряжения в проектируемых системах электроснабжения; Минэнерго Украины и ВНИИЭ (г.Москва) - для дополнения Указаний по компенсации реактивной мощности; Донецким государственным техническим университетом - при чтении лекций по электроснабжению промышленных предприятий.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались на семинаре АН Украины по вероятностным процессам в электрических системах (г. Донецк, 1992г, 1994г.), на семинаре "Кибернетика электрических систем" по тематике "Электроснабжение промышленных предприятий" (г.Новочеркасск, 1993г). Доклад по теме работы был принят оргкомитетом Международного симпозиума "International Wrocław Symposium and Exhibition on electromagnetic compatibility" (Польша 1994).

**Публикация.** По результатам выполненных исследований опубликовано 4 научные работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, изложенных на 266 страницах машинописного текста, 44 рисунков, 38 таблиц. Библиография состоит из 55 наименований источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы исследований, сформулированы цель и идея работы, излагаются решаемые задачи, а также основные результаты и положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе дан анализ существующих методов расчетов режимов СДС. Полная математическая модель с учетом нелинейности позволяет рассчитывать переходные режимы СДС при изменении напряжения. Однако громоздкость данной модели делает ее мало приспособленной для практических расчетов, особенно при случайных изменениях напряжения, когда необходимо задавать графики напряжения или имитировать их методами Монте-Карло на больших интервалах времени. Прямая линеаризация модели путем замены нелинейных функций линейными не устраняет этого недостатка.

Целью расчетов является определение потерь активной мощности

в СД и сети, а также отклонений и колебаний напряжения в сети, которые необходимы для технико-экономического выбора рациональных режимов СД.

Во второй главе анализируются режимы СДС при медленных изменениях напряжения. Для комплексного подхода полная модель СД дополнена подмоделями внешней нагрузки  $Q_{вн}$  и регуляторов возбуждения, которые осуществляют обратную отрицательную связь по напряжению и по производной активной составляющей тока статора СД.

Для обеспечения достоверности зависимости параметров режима от напряжения  $U_n$  источника питания (статистические были рассчитаны на ЭВМ по полной нелинейной модели. Показано, что в диапазоне изменений  $U_n \pm 10\%$  статистические характеристики могут быть аппроксимированы параболой вида  $aU_n^2 + bU_n$  аппроксимации не превысили значений: 3,8 % по  $Q$  СД, 6,2 % по току  $I$  СД, 4 % по потерям  $\Delta P_{сд}$  мощности в СД.

Статистические характеристики по напряжению  $U$  мированы прямыми  $a_l U_n + b_l$  с наибольшей погрешностью 0,54 %. Вместе с тем, в диапазоне  $\pm 5\%$  возможна линеаризация остальных параметров, за исключением тока СД.

Получены числовые значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $a_l$ ,  $b_l$  для различных режимов возбуждения и сопротивлений сети при наличии одного или нескольких СД, с регуляторами возбуждения и без них, при возрастающей, убывающей и неизменной  $Q_{вн}$ . Это позволяет рассчитывать параметры режимов аналитически минуя полной модели.

При детерминированных изменениях напряжения параметры режима получаются подстановкой  $U_n(t)$  в выражения для статистических характеристик. При случайных изменениях напряжения решена задача нахождения вероятностного распределения параметров режима при параболической статической характеристике. В отличие от в диссертации использованы УД  $U_{ну}(E_{ууи})$  напряжения, сцисса УД в о.е. Кроме того, решение дано в компактной форме через координаты  $U_{не}$ ,  $Q_e$  вершины параболы с учетом ограниченности диапазона ( $U_{им}$ ,  $U_{им}$ ) изменения напряжения.

Если этот диапазон попадает на убывающую часть параболы, то реактивная мощность изменяется в пределах:

$$Q_{m,m} = Q_e + a_a (U_{не} - U_{им,m})^2. \quad (1)$$

Для абсциссы УД мощности получена общая формула

$$E_{yQ} = 1 - E_{ууи} \left\{ \arccos \left\{ Q_y(U_n) \right\} \right\}, \quad (2)$$

в которую входит обратная функция  $\arccos$  от статической характери-

ки. Для параболы

$$E_{y\alpha} = 1 - E_{y\text{ум}} \left\{ U_{ие} - \sqrt{(Q_y - Q_e)/a_\alpha} \right\}. \quad (3)$$

При попадании диапазона на возрастающую часть УД пределы определяются по аналогичной (1) формуле, только вместо  $U_{им,м}$  необходимо записать  $U_{им,м}$ . Абсцисса УД мощности в общем случае равна  $E_{y\text{ум}} \{ \text{arc}(Q_y(U_{и})) \}$ , а для параболы

$$E_{y\alpha} = E_{y\text{ум}} \left\{ U_{ие} + \sqrt{(Q_y - Q_e)/a_\alpha} \right\}. \quad (4)$$

Получены выражения для УД для случаев, когда вершина параболы попадает в диапазон изменения напряжения. Во всех случаях среднее и эффективное значения мощности

$$\bar{Q} = a_\alpha \bar{U}_и^2 + b_\alpha \bar{U}_и + c_\alpha, \quad (5)$$

$$Q_\alpha^2 = \bar{Q}^2 = a_\alpha^2 \bar{U}_и^4 + 2a_\alpha b_\alpha \bar{U}_и^3 + (b_\alpha^2 + 2a_\alpha c_\alpha) \bar{U}_и^2 + 2b_\alpha c_\alpha \bar{U}_и + c_\alpha^2, \quad (6)$$

выражаются через средние значения  $\bar{U}_и^4, \dots, \bar{U}_и$  четвертой, ..., первой степеней напряжения. Дисперсия  $DQ = Q_\alpha^2 - \bar{Q}^2$ .

Расчетные значения  $Q_{\max}, Q_{\min}$  находятся по УД мощности с заданной вероятностью  $E_x$ . Плотность распределения  $f(Q)$  получается дифференцированием (3) или (4) по  $Q_y$ , причем берутся абсолютные значения производной.

Рассмотрены частные случаи нормального распределения и прямолинейной УД. При заданных средних значениях и стандарте  $\sigma_{ум}$  напряжения для нормального закона удобно использовать выражение

$$P_\alpha = \frac{1}{\sigma_{ум}} \left[ U_{ие} - \sqrt{(Q_y - Q_e)/a_\alpha} - \bar{U}_и \right].$$

Прямолинейной УД напряжения отвечает равномерная плотность с параметром  $x_\alpha = U_{им} - U_{им}$ . Плотность распределения мощности

$$f(Q) = \frac{1}{2\sqrt{a_\alpha} x_\alpha \sqrt{Q - Q_e}}$$

не постоянна. Получены выражения для УД реактивной мощности: при убывающей параболе

$$Q_y = Q_e + a_\alpha \left[ U_{ие} - U_{им} - x_\alpha E_{y\alpha} \right]^2, \quad (7)$$

при возрастающей

$$Q_y = Q_e + a_\alpha \left[ U_{им} - U_{ие} - x_\alpha E_{y\alpha} \right]^2. \quad (8)$$

Расчетное максимальное значение мощности получается подста-

новой в (7) или (8) величины  $E_x$ , а минимальное -  $(1 - E_x)$ . Показано, что с некоторым запасом можно определять расчетные значения для  $E_x = 0$ , когда  $Q_{\min, \max} \approx Q_{m, M}$  с применением формул вида (1).

В случае линейных статических характеристик вероятностное распределение мощности имеет тот же вид, что и распределение напряжения. Это позволяет сразу находить параметры распределений:

$$\bar{Q} = a_{\alpha} \bar{U}_n + b_{\alpha}, \quad DQ = a_{\alpha}^2 \sigma_{U_n}^2, \quad (\sigma_{\alpha} = 2a_{\alpha} \sigma_{U_n}). \quad (9)$$

Установлена область изменений напряжения, в которой параметры реактивной мощности допустимо определять подстановкой соответствующих параметров напряжения в выражения статических характеристик: например,  $\bar{Q} \approx a_{\alpha} \bar{U}_n^2 + b_{\alpha} \bar{U}_n + c_{\alpha}$ . В этих случаях расчеты существенно упрощаются, так как отпадает необходимость в нахождении УД реактивной мощности. Это возможно, если при заданной допустимой погрешности  $\delta_d$  и  $a_{\alpha} > 0$  коэффициент формы напряжения

$$k_{\Phi_{U_n}} \leq \sqrt{\frac{a_{\alpha} \pm (b_{\alpha} \bar{U}_n + c_{\alpha} \bar{U}_n^2) \delta_d}{a_{\alpha} (1 \mp \delta_d)}},$$

где верхний знак берется при положительных, а нижний - при отрицательных средних значениях реактивной мощности.

Метод расчета по УД применим и для детерминированных графиков напряжения, что делает его универсальным.

Хотя параметры режима рассчитываются отдельно, между ними существует связь, которая исследована на примере связи между  $P$  и  $Q$ . Для параболических статических характеристик получено выражение

$$Q = Q_e + a_{\alpha} \left[ \sqrt{(P - P_e)/a_p} + U_{и\epsilon P} - U_{и\epsilon Q} \right]^2 = \varphi_{\alpha}(P), \quad (10)$$

которое при детерминированных изменениях напряжения по процессу изменения активной мощности позволяет найти процесс изменения реактивной мощности, и наоборот. При случайных медленных изменениях напряжения исчерпывающей характеристикой связи является двумерная плотность распределения, для которой получено выражение

$$f(P, Q) = f(P)f(Q/P) = f(P)\delta [Q - \varphi_{\alpha}(P)], \quad (11)$$

где  $\delta(t)$  - дельта-функция.

В третьей главе исследуются параметры режима при быстрых изменениях напряжения, когда необходимо учитывать переходные процессы в СДС. В отличие от прямой линеаризации, предложен метод "параметрической идентификации", сущность которого заключается в следующем.

Для обеспечения достоверности по полной нелинейной модели (знак  $\sim$ ) находят реакции  $\tilde{y}(t)$  параметров на скачкообразные изменения напряжения разной величины  $\delta U_n$  и знака. Переходя к отклонениям  $\delta U$  реакции от начального значения  $y_0$ , устанавливают диапазон изменений напряжения, в пределах которого возможна линеаризация: из условия близости переходной функции  $h_{\delta y}(t) = \delta \tilde{y}(t) / \delta U_n$ . По  $\tilde{h}_{\delta y}(t)$  подбирают простую линейную модель СДС. Корректность метода оценивается по степени расхождения между переходной функцией  $h_{\delta y}(t)$  модели и фактической  $\tilde{h}_{\delta y}(t)$ .

Количество моделей равно количеству изучаемых параметров режима. Несмотря на это, предлагаемый метод существенно упрощает расчеты, так как одномерные модели просты и не имеют взаимных структурных связей. Это позволяет отказаться от решения дифференциальных уравнений, а все выкладки свести к использованию таблиц обратного преобразования  $L^{-1}$  Лапласа. При этом связи между выходными процессами остаются такими же, как и при прямой линеаризации.

При расчетах в о.е. аппроксимацию переходной функции рекомендуется осуществлять выражением:

$$h_{\delta y}(t) = H_{\delta y} \left[ e^{-a_y t} \sin(\omega_n t + \varphi_y) - \sin \varphi_y \right] - B_{\delta y} \left[ 1 - e^{-b_y t} \right] + G_{\delta y} 1(t), \quad (12)$$

в котором параметры режима подбираются по  $\tilde{h}_{\delta y}(t)$ . Угловая частота  $\omega_n$  одинакова для всех параметров режима.

Показано, что выражению (12) отвечает передаточная функция

$$W_{\delta y}(p) = C_{\delta y} \frac{T_1 p + 1}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1} - \frac{B_{\delta y}}{T_5 p + 1} + G_{\delta y}, \quad (13)$$

в которой постоянные времени определяются через  $a_y$ ,  $b_y$ ,  $\omega_n$ , и  $\varphi_y$ .

Для отклонений  $\delta P = P - P_0$  активной мощности (рис.1,а) можно принять  $\varphi$ ,  $G$ ,  $B$  равными нулю, поэтому вместо (12) переходная функция аппроксимирована более простым выражением:

$$h_{\delta P}(t) \approx H_{\delta P} e^{-a_p t} \sin \omega_n t. \quad (14)$$

Упрощается также и передаточная функция:

$$W_{\delta P}(p) = H_{\delta P} \frac{T_6 p}{T_7^2 p^2 + T_8 p + 1}. \quad (15)$$

Погрешность аппроксимации и линеаризации не превысила 7,2%. Из (15) следует, что предложенная линейная система по активной мощности (рис.2,а) состоит из двух последовательно включенных эле-

ментарных звеньев: идеального дифференцирующего звена с постоянной времени  $T_{\sigma}$  и колебательного с постоянными  $T_7$ ,  $T_8$  и коэффициентом передачи  $H_{\partial P}$ .

Для отклонения  $\delta Q = Q - Q_0$  реактивной мощности (рис.1,б) использовано выражение (12). Из (13) следует, что линейная модель может быть принята в виде трех параллельно включенных подсистем (рис.2,б). Первая состоит из форсирующего звена с постоянной  $T_1$  и колебательного - с постоянными  $T_2$ ,  $T_4$  и коэффициентом передачи  $G_{\partial \alpha}$ ; вторая - из инерционного звена с постоянной  $T_3$  и коэффициентом передачи  $-B_{\partial \alpha}$ ; третья - из пропорционального звена с коэффициентом передачи  $G_{\partial \alpha}$ . Погрешность линеаризации и аппроксимации не превысила 6,01%.

Установлено, что во всех режимах возбуждения, без и с регулятором, разных сопротивлений сети, с одним или несколькими СД аппроксимирующие выражения (12) имеют одинаковый вид - меняются лишь числовые значения параметров. Это делает метод идентификации достаточно универсальными.

Средние значения определяются выражениями:

$$\overline{\partial P} = 0, \quad \overline{P} = P_0, \quad \overline{\delta Q} = \overline{U}_n N_{\partial \alpha}, \quad \overline{Q} = Q_0 + \overline{U}_n N_{\partial \alpha}. \quad (16)$$

Для периодических процессов изменения напряжения вместо рядов Фурье для расчетов применен метод "коэффициентов разложения", предложенный ранее научным руководителем и к.т.н. Абу Сиамом Сами для других целей.

В соответствии с этим методом линейная модель с передаточной функцией (15) представлена в виде двух параллельно включенных инерционных звеньев с постоянными времени  $T_{p1} = -1/p_1$ ,  $T_{p2} = -1/p_2$  и коэффициентами усиления  $k_1 = j a_1$ ,  $k_2 = -j a_1$ , где при  $j = \sqrt{-1}$  обозначено:

$$\alpha_1 = T_8 / 2T_7^2, \quad \lambda_1 = \sqrt{4T_7^2 - T_8^2} / (2T_7^2),$$

$$p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j \lambda_1, \quad a_1 = \frac{H_{\partial P} T_{\sigma}}{2\lambda_1 T_7^2}.$$

Упрощение расчетов состоит в том, что нахождение реакций каждого из инерционных звеньев на входной процесс не встречает затруднений. Полученные реакции суммируются и вычисляется эффективное значение. Аналогичным образом найдены реакции и для реактивной мощности, где метод коэффициентов разложения достаточно применить только для первой подсистемы, поскольку для остальных подсистем

тем решение известно.

Принципиальным преимуществом такого подхода является то, что решение является точным. Конечные выражения содержат лишь показательные и тригонометрические функции, вычисление которых не встречает затруднений.

При случайных изменениях напряжения исходными для расчета являются среднее значение  $U_{\text{и}}$  и корреляционная функция  $K_{\text{и}}(\tau)$  или спектральная плотность  $S_{U_{\text{и}}}(\omega)$ . Средние значения вычисляются согласно (16), поэтому целью расчетов является только определение дисперсий DP и DQ, которые равны дисперсиям  $D(\partial P)$  и  $D(\partial Q)$ .

Обычно дисперсии вычисляются по одной из формул:

$$D_y = \iint_{-\infty}^{\infty} g_y(\xi) g_y(\eta) K_{U_{\text{и}}}(\eta - \xi) d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{\infty} S_{U_{\text{и}}}(\omega) A_y^2(\omega) d\omega,$$

где  $g_y(t)$  - весовая функция системы,  $\xi$  и  $\eta$  - вспомогательные переменные интегрирования. Однако даже при использовании теоремы о вычетах интегрирование оказывается весьма громоздким.

Для упрощения расчетов предложено свести задачу к рассмотрению входных процессов только в виде белого шума. Такая возможность обусловлена тем, что любой стационарный процесс  $U_{\text{и}}(t)$  может быть представлен как результат прохождения белого шума через некоторую гипотетическую систему. Например, если  $K_{U_{\text{и}}}(\tau) = DU_{\text{и}} e^{-\alpha|\tau|}$ , то передаточная функция гипотетической системы  $W_{\Gamma}(p) = \alpha / (p + \alpha)$ , а параметр белого шума равен  $2DU_{\text{и}} / (\alpha\pi)$ .

В результате вместо систем с передаточной функцией  $W_y(p)$  рассматривается приведенная система с передаточной функцией  $W_{\text{п}}(p) = W_y(p)W_{\Gamma}(p)$ . Несмотря на усложнение системы, задача упрощается по двум причинам. Во-первых, весовая функция  $g_{\text{п}}(t)$  такой системы находится по таблицам преобразования Лапласа без интегрирования. Во-вторых, в случае белого шума дисперсия вычисляется по простой формуле

$$Dy = \frac{2DU_{\text{и}}}{\alpha} \int_0^{\infty} g_{\text{п}}^2(t) dt. \quad (17)$$

Для активной мощности и случая экспоненциальной корреляционной функцией конечное выражение получено в виде

$$DP = B_p DU_{\text{и}} \left\{ T_{1p}^2 \left[ \gamma_p - 2a_p \sin(2\gamma_p - \arccos \frac{\omega_{\text{п}}}{2\gamma_p}) \right] + \right.$$

$$+ T_{2P} + T_{3P} \cos(\varphi_{1P} + \arccos \frac{\omega}{\gamma_P}) \},$$

где все величины выражаются через  $H_{\partial P}$ ,  $T_{\alpha}$ ,  $T_{\gamma}$  и  $T_{\beta}$ .

Для реактивной мощности также получено конечное выражение для  $DQ$ , но оно громоздкое, хотя и содержит только показательные и тригонометрические функции.

Эффективные значения мощностей вычисляются по средним значениям и дисперсиям. Расчетные значения определяются по формулам:

$$P_{\max, \min} = \bar{P} \pm \beta \sqrt{DP}, \quad Q_{\max, \min} = \bar{Q} \pm \beta \sqrt{DQ},$$

в которых статистический коэффициент  $\beta = \sqrt{3}$ , либо принимается по заданной вероятности выхода случайных величин  $P$  или  $Q$  за пределы расчетных диапазонов.

Связь между активной и реактивной мощностями оценивается взаимнокорреляционным моментом  $k_{PQ}$ , для определения которого применен тот же прием сведения задачи к рассмотрению белого шума. При  $T_{\alpha} = 1/\alpha$  получена формула

$$k_{PQ} = 2T_{\alpha} \sigma_{U_{и}}^2 \int_0^{\infty} g_{п\partial P}(t) g_{п\partial Q}(t) dt, \quad (18)$$

в которую входят весовые функции приведенных систем для активной и реактивной мощностей.

Линейные системы нормализуют выходные процессы, что позволяет считать  $P(t)$  и  $Q(t)$  нормальными случайными процессами. В этом случае средние значения, дисперсии и взаимнокорреляционный момент полностью характеризуют систему  $P$  и  $Q$ , так как однозначно определяют двухмерную плотность  $f(P, Q)$ .

В четвертой главе определяются необходимые для технико-экономического обоснования режимов возбуждения СД потери активной мощности в СД и элементах сети, показатели качества напряжения, а также оценивается эффективность предлагаемых методов.

Для сравнительного анализа потерь  $\Delta P$  мощности при неизменном (индекс "0") и изменяющемся напряжении введен коэффициент потерь мощности

$$\varepsilon_{\Delta P} = \frac{\overline{\Delta P}}{\Delta P_0} - 1 = \frac{I_3^2}{I_0^2} - 1, \quad (19)$$

где  $\overline{\Delta P}$  - среднее значение потерь,  $I_3$  - эффективный ток. Для сопоставления разных вариантов принят коэффициент эффективности по энергосбережению

$$\rho = 1 - \frac{\overline{\Delta P}}{\overline{\Delta P}_M} = 1 - I_3^2 / I_{3M}^2, \quad (20)$$

который берется по отношению к варианту с наибольшими потерями (индекс "М"). Эффективность регулирования возбуждения по некоторому параметру Z оценивается коэффициентом

$$\xi_Z = 1 - Z_B / Z_\emptyset, \quad (21)$$

где  $Z_B$  и  $Z_\emptyset$  - значения параметра при наличии и отсутствии регулятора возбуждения.

Аналогичные коэффициенты введены и для показателей качества напряжения.

При медленных изменениях напряжения с использованием статических характеристик получены формулы для потерь мощности в СД

$$\overline{\Delta P}_{сд} = a_{\Delta P} \overline{U}_M^2 + b_{\Delta P} \overline{U}_M + c_{\Delta P}, \quad (22)$$

квадрата эффективного тока в питающей СД линии

$$I_{лэ}^2 = a_1^2 \overline{U}_M^4 + 2a_1 b_1 \overline{U}_M^3 + (b_1^2 + 2a_1 c_1) \overline{U}_M^2 + 2b_1 c_1 \overline{U}_M + c_1^2 \quad (23)$$

и в питающей заводскую подстанцию линии

$$I_{гэ}^2 = \left[ P_0^2 + (Q + Q_{вн})^2 \right] / 3U^2, \quad (24)$$

а также соответствующие коэффициенты.

При детерминированных процессах  $U_M(t)$  определение входящих в эти выражения средних значений по графикам напряжения U, мощностей и тока не встречает затруднений. При случайных процессах трудности возникают лишь при определении потерь в линии, так как согласно (24) необходимо найти среднее значение нелинейной функции четырех параметров. Получено решение в общем виде, но оно требует задания четырехмерной плотности распределения этих параметров. Для практических целей принято обычное для теории электрических нагрузок допущение о замене в (24) величины U на  $\overline{U}_M = \text{const}$ , что позволило получить простую формулу

$$\overline{\Delta P}_r = \frac{\Gamma}{-2} \left( P_0^2 + Q_0^2 + Q_{внэ}^2 + \overline{Q} \overline{Q}_{вн} + k_\alpha \right), \quad (25)$$

в которой  $k_\alpha$  - коэффициент корреляции между Q и  $Q_{вн}$ .

При быстрых изменениях напряжения потери выражены через параметры переходных функций:

$$\overline{\Delta P}_{сд} = \overline{\Delta P}_{осд} + \overline{U} h \text{ и } \partial(\overline{\Delta P}) (\infty), \quad (26)$$

$$\overline{\Delta P}_л = \frac{\Gamma}{-2} \frac{\Gamma}{U_M} \left[ P_0^2 + DP + (Q_0 + N_{\partial Q} \overline{U}_M)^2 + DQ \right], \quad (27)$$

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{\Gamma}{-2} (P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2 + Q_{\text{вн}}^2 + \overline{QQ}_{\text{вн}}), \quad (28)$$

где  $\Gamma_{\text{л}}$  и  $\Gamma$  - сопротивления линии с СД и сети.

Качество напряжения по отклонениям напряжения  $V$  оценивается зависимостям инерционных  $V_{\text{Тmax, min}}$  экстремумов от постоянной времени  $T$  инерции электроприемников или кумулятивных  $V_{\theta\text{max, min}}$  экстремумов от длительности  $\theta$  кумуляции, что позволяет избежать занижения требований.

Инерционные или кумулятивные экстремумы могут быть найдены последовательно: вначале находятся реакции системы с передаточной функцией вида (13), а затем производится их инерционное или кумулятивное сглаживание. Для упрощения расчетов предложено определять экстремумы сразу: с использованием функции (13), умноженной на передаточную функцию инерционного или кумулятивного звена. Передаточная функция усложняется, но методом коэффициентов разложения соответствующая модель представляется в виде трех параллельно включенных инерционных звеньев, решение для которых известно. Инерционные или кумулятивные процессы от этих звеньев суммируются.

Допустимость быстрых изменений напряжения оценивается по дозе колебаний. Диапазон размахов колебаний небольшой, поэтому статическая характеристика  $U(U_{\text{н}})$  линеаризована с угловым коэффициентом  $a_{\text{лн}}$ . Получено соотношение между дозами колебаний напряжений  $\Phi_{\text{н}}$  у источника питания и  $\Phi$  на шинах ГПП:

$$\Phi = a_{\text{лн}}^2 \Phi_{\text{н}}. \quad (29)$$

При линеаризации параболической характеристики в точке  $\overline{U_{\text{н}}}$  выражение (29) принимает вид

$$\Phi = \left( 2a_{\text{лн}} \overline{U_{\text{н}}} + b_{\text{лн}} \right)^2 \Phi_{\text{н}}. \quad (30)$$

При  $a_{\text{лн}} < 1$  СД уменьшает колебания напряжения на шинах вне зависимости от знака углового коэффициента. Доза зависит от среднего уровня: на убывающем участке параболы с увеличением  $\overline{U_{\text{н}}}$  доза уменьшается.

Показано, что во всех режимах регулятор возбуждения уменьшает дозы колебаний напряжения. Например, на рис.3 приведены значения введенного в работе коэффициента колебаний напряжения

$$k_{\Phi} = \sqrt{\Phi/\Phi_{\text{н}}} - 1 = |a_{\text{лн}}| - 1 \quad (31)$$

для режима перевозбуждения при  $x = 0,03$  и трех режимов внешней нагрузки: I - возрастающей, II - неизменной, III - убывающей с регуля-

тором возбуждения (сплошная линия) и без него (штрихи). Без регулятора возможно даже увеличение колебаний:  $K_{\text{Ф}} > 0$  в режимах II и III.

Количественные соотношения между параметрами режима определяются условиями конкретной задачи. Выполненные расчеты для е-режима показали, что регулятор возбуждения улучшает качество напряжения как по отклонениям, так и по дозам колебаний. Вместе с тем, при этом увеличиваются потери мощности в СД и сети. При повышенном среднем значении  $\bar{U}_n$  напряжения потери активной мощности в СД меньше, а в питающей линии зависят от вида внешней нагрузки: при ее возрастании потери увеличиваются. Диапазоны изменения напряжения на шинах почти не зависят от  $\bar{U}_n$ , а дозы колебаний — существенно зависят от  $\bar{U}_n$ .

Повышение качества напряжения улучшает технико-экономические показатели работы других электроприемников, подключенных к шинам. Эффект оценивается по известным техническим или экономическим характеристикам каждого приемника по напряжению с использованием найденной в работе характеристики  $U(U_n)$ . В качестве примеров проанализировано увеличение срока службы ламп накаливания и люминесцентных ламп, а также уменьшения температуры перегрева асинхронных электродвигателей при периодических и случайных изменениях напряжения источника питания.

В заключение отмечается, что в диссертации решена научная задача разработки математических моделей электротехнического комплекса "сеть электроснабжения — внешняя нагрузка — синхронные электродвигатели — электропривод" с целью повышения эффективности использования СД для электросбережения и улучшения качества напряжения. Сделаны следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель позволяет реализовать комплексный подход к расчету параметров режимов СДС для любых случаев изменения напряжения в системе электросбережения и нагрузок СД.

2. Небольшая величина диапазона изменения напряжения в системах электроснабжения позволила разработать упрощенные математические модели СДС, достоинством которых является аналитическая разрешимость относительно параметров режимов и минимальный объем исходной информации.

3. При медленных изменениях напряжения источника питания целесообразно использовать упрощенную модель СДС в виде параболических статических характеристик, которая позволяет аналити-

ческим путем рассчитывать параметры режимов без численного интегрирования дифференциальных уравнений.

4. При случайных процессах изменения напряжения (или периодически сложной формы) и использовании статических характеристик вероятностные распределения и расчетные диапазоны изменения параметров режима СДС целесообразно определять по УД напряжения источника питания.

5. В пределах быстрых изменений напряжения  $\pm 5\%$  допустима линеаризация модели СДС, которую целесообразно осуществлять разработанным методом параметрической идентификации, позволяющим представить сложную исходную модель в виде простых моделей раздельно по каждому параметру режима.

6. Аппроксимация рассчитанных по исходной модели переходных функций параметров при единичных скачках напряжения выражениями вида (12) позволяет принять для каждого параметра режима простую динамическую модель в виде трех параллельно включенных систем с передаточной функцией (13).

7. Представление линейных моделей СДС в виде параллельно включенных инерционных звеньев позволяет существенно упростить расчет параметров режимов СДС при периодических изменениях напряжения, сведя его к суммированию реакций звеньев без применения интеграла Дюамеля.

8. Расчет дисперсий параметров режимов СДС целесообразно осуществлять путем предоставления случайного процесса изменения напряжения как результат прохождения белого шума через линейную систему, что позволяет получить точное аналитическое решение и избежать принципиально неточного численного интегрирования в бесконечных пределах.

9. Упрощенные математические модели позволяют рассчитывать каждый параметр режима СДС по отдельности и в то же время учитывать связь между ними: величинами параметров статических характеристик и переходных функций, а также в виде аналитических зависимостей – при детерминированных и в виде многомерных вероятностных распределений или взаимнокорреляционных моментов – при случайных изменениях напряжения.

10. Предложенные методики расчета потерь активной мощности, отклонений и колебаний напряжения позволяют получить данные, необходимые для комплексного технико-экономического обоснования рациональных режимов возбуждения СД.

В приложении приведены:

- таблица идентификации переменных модели синхронного двигателя и сети;

- распечатка программы расчетов переходных характеристик параметров режима синхронного двигателя при изменениях напряжения.

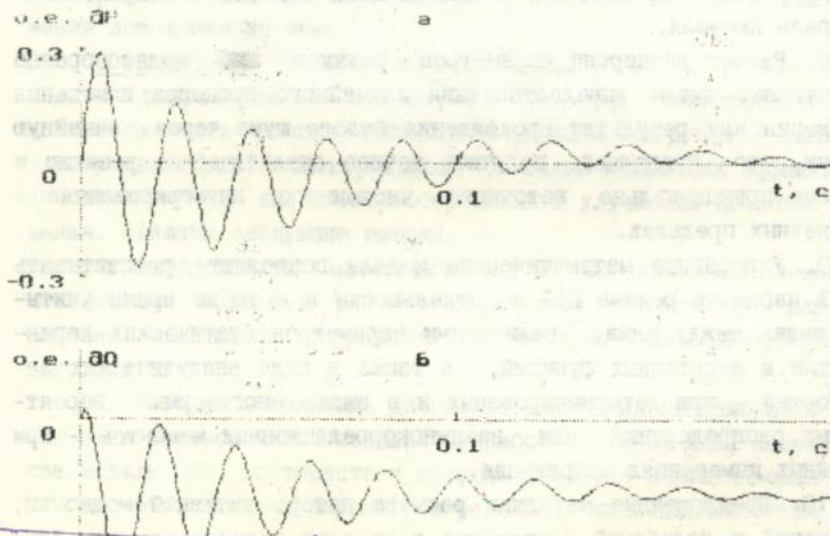
Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Куренный Э.Г., Сивокобыленко В.Ф., Чепкасов Ю.И., Сиссе Бубакар. Влияние случайных изменений напряжения на синхронные электродвигатели. - Донецк, 1992. - 9 с. Рук. деп. в УкрНИИТИ 17.10.92, № 1685-Ук92.

2. Чепкасов Ю.И., Шумаева Е.А., Сиссе Бубакар. Оценка воздействия случайных изменений напряжения на характеристики параллельно работающих синхронных двигателей. - 8 с. Рук. деп. в ГНТБ Украины 31.03.93, № 754-Ук93.

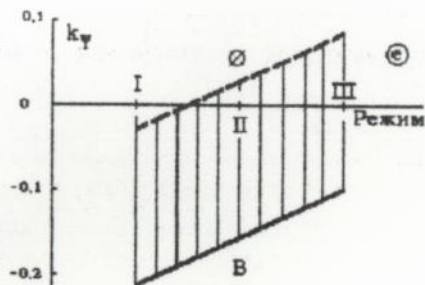
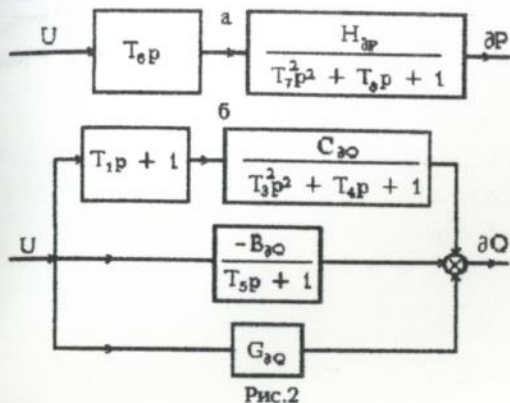
3. Чепкасов Ю.И., Шумаева Е.А., Сиссе Бубакар. Моделирование динамики воздействия случайных изменений напряжения на синхронные электродвигатели. - 6с. Рук. деп. в ГНТБ Украины 31.03.93, № 740-Ук93.

4. Куренный Э.Г., Чепкасов Ю.И., Сиссе Бубакар. Линеаризация моделей ЭМС путем параметрической идентификации. - 9с. Рук. деп. в ГНТБ Украины 10.01.95, № 94-Ук95.



ЛНБ ім. В. Стефаника  
-0.4 АН України

Рис.1



### АНОТАЦІЯ

Сиссе Бубакар. Методи розрахунку режимів систем електропостачання з синхронними електроприводами при детермінованих та випадкових змінах напруги.

Дисертація на одержання наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи, включаючи їх керування та регулювання, Донецький державний технічний університет, Донецьк, 1995.

Запропоновані математичні моделі, які дозволяють реалізувати комплексний підхід до розрахунку параметрів режимів електротехнічного комплексу "система електропостачання – електропривід з синхронними приводами" для будь-яких випадків зміни напруги в системі електропостачання.

Cisse Boubacar. Computation Methods of the regimes of power supply systems with synchronous electric drives under the conditions of determinate and random voltage changes.

The dissertation is presented for a PHD degree in the speciality 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems, including their control and regulations, in Donetsk State Technical University, Donetsk 1995.

Mathematical models, which enable the realization of complex approach to computation of regime parameters of the electrotechnical complex "Power supply system – electric drive with synchronous motors" for any case of voltage changes in the Power supply system have been suggested.

Ключові слова: Електротехнічний комплекс, параметри режиму, детерміновані та випадкові зміни напруги, статичні характеристики комплексу, упорядковані діаграми, перехідні функції комплексу, параметрична ідентифікація, лінійні моделі, дисперсія навантажень, методи розрахунку параметрів режиму.

АВ 33.095

---

Подп. в печать 8.09.95 г. формат 60X84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага тип. Ризо-принт.  
Усл печ.л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 90 экз. Зак.5-1.

Донецкий государственный технический университет, 340000,  
Донецк. ул. Артема, 58.

---

000 ИНФО 340000, Донецк, ул. Артема, 58