

6
A-9

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Объединенный Совет по присуждению ученых степеней
по электротехническим специальностям
при Новосибирском электротехническом институте

На правах рукописи

Ю. К. БРЕЗЕ

ДИНАМИКА ГЕНЕРАТОРА
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Новосибирск — 1963

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Объединенный Совет по присуждению ученых степеней
по электротехническим специальностям
при Новосибирском электротехническом институте

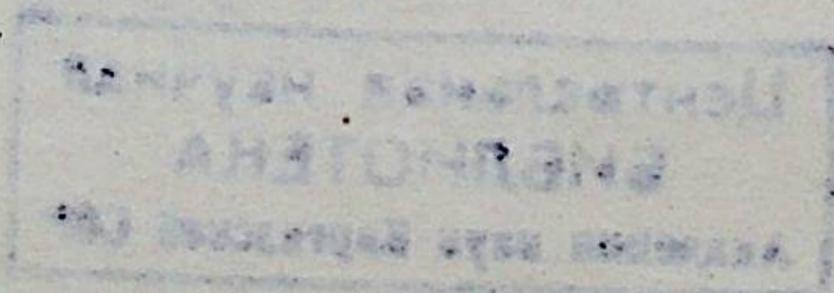
На правах рукописи

Ю. К. БРЕЗЕ

ДИНАМИКА ГЕНЕРАТОРА
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Автореферат
диссертации, на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
кандидат технических наук,
доцент Л. И. ГАНДЖА



г. Новосибирск — 1963

ВВЕДЕНИЕ

Программой Коммунистической партии Советского Союза принятой историческим XXII съездом, предусмотрено увеличение в ближайшем десятилетии электровооруженности труда в промышленности почти в три раза, создание на базе дешевой электроэнергии электроемких производств, осуществление массовой электрификации всего народного хозяйства.

Помимо увеличения количества выпускаемых машин и аппаратов, необходимо обеспечить и наиболее рациональный выбор параметров создаваемых машин, исходя из интересов народного хозяйства в целом. Большое значение приобретут также вопросы надежности и безотказности в работе выпускаемых машин и аппаратов; это должно быть одним из основных требований при создании новых типов оборудования.

Одним из основных и главных средств решения поставленных съездом задач в осуществлении технического прогресса, автоматизации рабочих машин и производственных процессов в различных сферах народного хозяйства является автоматизация электроприводов.

Как в системах «генератор—двигатель», так и в синхронных электроприводах широкое применение получили генераторы постоянного тока с параллельным возбуждением.

Синхронные генераторы, являющиеся главными источниками электрической энергии, также весьма часто имеют в качестве возбудителей или подвозбудителей генераторы с параллельным возбуждением.

Генераторы параллельного возбуждения находят широкое применение в качестве источников энергии постоянного тока в схемах электроснабжения транспортных устройств или в качестве возбудителей и подвозбудителей синхронных генераторов

в случае применения электроснабжения транспортных устройств на переменном токе.

Несмотря на большие достижения современной науки, часто ответственные и распространенные звенья систем автоматического регулирования и управления являются слабо изученными. К таким элементам можно отнести в полной мере и генератор постоянного тока с параллельным возбуждением, нашедшим, как показано выше, широкое распространение в электротехнической практике. Нормальное поведение этих ответственных устройств определяется главным образом характером работы этого вида генератора.

Цель настоящей работы и сводится к систематическому исследованию переходных процессов (динамики) и, в частности, автоколебаний в генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением как в главном звене перечисленных выше ответственных автоматизированных установок.

I. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Современные электромеханические системы представляют собой в большинстве случаев сложные, насыщенные электромашиной автоматикой устройства, действующие по замкнутому циклу. Даже отдельно взятая электрическая машина может рассматриваться как динамический объект, обладающий внутренними линейными и нелинейными связями. Поэтому при исследовании таких систем приходится пользоваться методами развитыми теорией автоматического регулирования.

В последние годы нелинейные системы приобретают все большее и большее значение в электротехнической практике. Развитие техники приводит к необходимости возможно большего использования мощностей электрических машин. В этом случае последние должны работать уже не на линейных участках своих характеристик, а во всей области их значений.

Повышение точности регулирования все чаще приводит к недопустимости пренебрежения другими видами нелинейностей, как-то: зависимости индуктивностей от соответствующих токов, люфты, потери на вихревые токи, гистерезис и т. д. Иначе говоря реальные системы все больше приближаются к классу нелинейных, но существенной особенностью последних является возможность возникновения в них, при определенных условиях, автоколебаний.

Автоколебательные режимы в рассматриваемой системе генератор — нагрузка в большинстве случаев нежелательны и

вредны. Это относится к системам электроснабжения транспортных устройств, где они могут привести к катастрофе, системам электроприводов как на постоянном, так и на переменном токе и цепи возбуждения синхронных генераторов.

Но эти режимы успешно используются для быстрого гашения поля синхронных генераторов.

Автоколебания могут найти широкое применение для создания электроприводов возвратно-поступательного и вибрационного движения, для создания вибрационных систем, а также в установках индукционного перемешивания металла в дуговых печах.

Перечисленные проблемы требуют систематического исследования переходных процессов и автоколебаний, и в первую очередь, в генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением, являющимся важным звеном перечисленных выше ответственных автоматизированных установок.

Исследованиями режимов генераторов постоянного тока занимался целый ряд советских ученых, среди которых особо следует отметить акад. М. В. Шулейкина, В. С. Кулебакина, М. П. Костенко, проф. А. А. Воронова, Н. П. Ермолина, канд. техн. наук Н. И. Соколова, Л. В. Красильникова, К. Д. Рунова, В. Д. Константинова и других, а из зарубежных ученых Р. Рюденберга. Но почти во всех этих работах система генератор — нагрузка рассматривалась как линейная и ее нелинейные свойства оказались нераскрытыми. Исключением являются работы проф. А. А. Воронова и Н. Н. Ермолина. В первой из этих работ автор впервые исследует поведение генераторов постоянного тока с точки зрения теории нелинейных колебаний, но в ней рассмотрено влияние только одной нелинейности — характеристики намагничивания. Исследования проведены только при подключенном регуляторе, все же случаи работы без него автором исключаются и, следовательно, задача сужается.

Работы Н. П. Ермолина, являющиеся капитальными в области расчета переходных процессов машин постоянного тока, с точки зрения исследования колебаний ограничиваются только малыми колебаниями.

Таким образом, можно сделать вывод, что сведения о переходных процессах в изучаемой существенно-нелинейной системе далеко не полны и не систематизированы.

Представляет определенный интерес и полезное использование автоколебательных режимов генератора для создания

автоколебательных систем, в связи с чем возникают вопросы получения автоколебаний определенного качества.

Естественно, что имеется некоторое отличие в работе генератора в каждом отдельном случае: так, например, работая в качестве генератора, он часто работает с регулятором напряжения, в других же случаях — без него.

Задача исследования сводится к тому, что данный вопрос решается в широком плане безотносительно к частным и узким случаям совместной работы генератора с регулятором, с аккумулятором и т. д. Результаты такого исследования должны дать общую теоретическую основу для всех частных конкретных случаев и приложений этих частных вопросов.

В реферируемой работе поставлен следующий объем работы:

1. Исследование системы в режимах статики и динамики с учетом нелинейностей характеристики холостого хода, индуктивностей цепей и т. д.

2. Изучение статических режимов и характеристик системы и методы их экспериментального получения.

3. Исследование количества и типов состояний равновесия, возможных в системе при различном характере нагрузки и влияния отдельных параметров на характер состояний равновесия.

4. Исследование границ устойчивости и определение их положения на различных характеристиках.

5. Рассмотрение механизма возникновения автоколебаний.

6. Исследование режимов возбуждения колебаний и автоколебаний и выявление факторов, определяющих их.

7. Изучение влияния отдельных параметров и начальных условий на характер автоколебаний и переходных процессов.

Поскольку учет всех причин, влияющих на поведение изучаемой системы, привел бы к излишнему усложнению, введены следующие упрощения, не оказывающие существенного влияния на точность конечных результатов: 1) пренебрежем влиянием вихревых токов, 2) пренебрежем взаимной индуктивностью между обмотками якоря и возбуждения, 3) считаем сопротивление якорной цепи, слагающееся из сопротивлений обмоток якоря дополнительных полюсов и щеточного контакта постоянным, 4) считаем, что генератор имеет дополнительные полюса и, следовательно, продольная составляющая потока от реакции якоря отсутствует, 5) предположим, что скорость генератора при изменении нагрузки остается неиз-

менной, 6) считаем, что гистерезисная петля стабилизировалась (в конце работы рассматривается вопрос об учете частичных петель гистерезиса).

Таким образом, в работе проведены исследования с учетом следующих основных нелинейностей: кривой намагничивания и индуктивностей (нагрузки, возбуждения и якорной цепи). Приведен также критический обзор методов исследования нелинейных систем.

II. СТАТИКА СИСТЕМЫ

Поскольку автоколебательные свойства любой нелинейной системы тесно связаны со свойствами ее статических характеристик, а имеющиеся сведения о последних для изучаемой системы недостаточны для выявления ее автоколебательных свойств, рассмотрены вопросы, связанные с построением и экспериментальным снятием статических характеристик.

На основе исследования установлено, что: 1) экспериментальное снятие характеристик в режимах статики во всех четырех квадрантах при параллельном возбуждении возможно, но сложно, 2) метод характеристического треугольника может быть применен для построения характеристик холостого хода и внешней во всех квадрантах, 3) пренебрежение током возбуждения может в некоторых случаях привести к большим погрешностям, 4) статическая внешняя характеристика системы является неоднозначной, и, следовательно, сама система потенциально-автоколебательной.

Рассмотрены вопросы влияния величины сопротивления якорной цепи — r_a , сопротивления цепи возбуждения — r_b и скорости вращения — n_r на статические характеристики.

III. ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ПРИ $L_{II}=0$

Случай, когда генератор питает чисто активную нагрузку, является простейшим, но слабо изученным. При принятых допущениях динамика системы описывается уравнениями:

$$e_r(i_a) = z_a L_a + z_b i_b + L_a(i_a) \frac{di_a}{dt} + L_b(i_b) \frac{di_b}{dt} \quad (1)$$

$$e_r(i_\theta) = z_\alpha i_\alpha + z_H i_H + L_\alpha(i_\alpha) \frac{di_\alpha}{dt} \quad (2)$$

$$i_\alpha = i_\theta + i_H \quad (3)$$

После некоторых преобразований можно из этих уравнений получить два дифференциальных уравнения первого порядка.

Таким образом, система обладает одной степенью свободы. Выбираем за координаты фазовой плоскости независимые переменные i_θ и i_H .

Целесообразность такого выбора вытекает из того, что напряжение на зажимах якоря в статическом (установившемся) режиме выражается через ток возбуждения.

Таким образом, выбранная фазовая плоскость путем изменения масштаба вдоль оси ординат может быть легко приведена к плоскости статических и динамических внешних характеристик. Помимо этого, данная плоскость является привычной для специалистов по электрическим машинам и электроприводу. Фазовые траектории этой системы можно легко наблюдать на экране осциллографа.

Из выражений (1), (2) и (3) можно получить дифференциальное уравнение интегральных кривых на фазовой плоскости i_θ, i_H :

$$\frac{di_\theta}{di_H} = \frac{(z_H i_H - z_\theta i_\theta) \times}{L_\theta(i_\theta) e_r(i_\theta) + [z_\theta L_\alpha(i_\alpha) - z_\alpha L_\theta(i_\theta)] i_\theta - \frac{\times L_\alpha(i_\alpha)}{-[z_H L_\alpha(i_\alpha) + z_H L_\theta(i_\theta) + z_\alpha L_\theta(i_\theta)] i_H}} \quad (4)$$

Для построения фазовых траекторий воспользуемся методом изоклин.

Полагая в выражении (4) $\frac{di_\theta}{di_H} = \Theta = \text{const}$, получим уравнение изоклины. Придавая Θ ряд фиксированных численных значений и решая (4) относительно i_H , получим семейство изоклин, разыскиваемых на фазовой плоскости интегральных кривых, а по ним можно построить фазовый портрет системы.

Из выражения (4) получим уравнение изоклин в следующем виде:

$$i_{H\Theta}(i_{\theta u}) = \frac{\Theta L_\theta(i_{\theta u}) e_r(i_{\theta u}) + \{L_\alpha(i_{\alpha\Theta}) z_\theta + L_\alpha(i_{\alpha\Theta}) z_H + \Theta [L_\alpha(i_{\alpha\Theta}) z_\theta - L_\theta(i_{\theta u}) z_\alpha]\} i_{\theta u}}{L_\alpha(i_{\alpha\Theta}) z_H + L_\theta(i_{\theta u}) z_H + L_\theta(i_{\theta u}) z_\alpha} \quad (5)$$

В нем $i_{H\Theta}$ — значение тока возбуждения на изоклине.

Полагая в (5) $\Theta = \infty$, получим уравнение изоклины вертикальных касательных:

$$i_{H\infty}(i_{\theta u}) = \frac{L_\theta(i_{\theta u}) e_r(i_{\theta u}) + [L_\alpha(i_{\alpha\infty}) z_\theta - L_\theta(i_{\theta u}) z_\alpha] i_{\theta u}}{L_\alpha(i_{\alpha\infty}) z_H + L_\theta(i_{\theta u}) z_H + L_\theta(i_{\theta u}) z_\alpha} \quad (6)$$

Полагая в (5) $\Theta = 0$, получим уравнение изоклины горизонтальных касательных

$$i_{H0}(i_{\theta u}) = \frac{z_\theta}{z_H} i_{\theta u} \quad (7)$$

т. е. изоклиной горизонтальных касательных является характеристика нагрузки, что также подтверждает большое преимущество выбранной фазовой плоскости.

Поскольку в установившемся режиме $\left(\frac{di_\theta}{di_H}\right)_y = \frac{0}{0}$, то состояния равновесия системы являются особыми точками интегральных кривых.

Для исследования особых точек системы на устойчивость, понимая последнюю в смысле А. М. Ляпунова выразим e_r, i_θ и i_H в переходном процессе через их значения в установившемся режиме и через отклонения от этих значений и полагаем, что L_α и L_θ (индуктивности цепей якоря и возбуждения) в пределах малых отклонений постоянны и имеют значения $L_{\alpha y}$ и $L_{\theta y}$, можно записать уравнения (1) и (2) в отклонениях. Разлагая далее Δe_r (отклонение э. д. с.) в ряд Тейлора и ограничиваясь первым членом этого разложения, можно получить уравнения первого приближения по А. М. Ляпунову в виде

$$\frac{d(\Delta i_b)}{dt} = a \Delta i_b + b \Delta i_n, \quad (8)$$

$$\frac{d(\Delta i_n)}{dt} = c \Delta i_b + d \Delta i_n,$$

где

$$a = -\frac{z_b}{L_{by}}, \quad b = \frac{z_n}{L_{by}}$$

$$c = \frac{\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y}{L_{яy}} + \frac{z_b}{L_{by}} - \frac{z_я}{L_{яy}}, \quad (9)$$

$$d = -\left(\frac{z_n}{L_{by}} + \frac{z_n}{L_{яy}} + \frac{z_я}{L_{яy}}\right).$$

В этом случае характеристическое уравнение системы

$$\lambda^2 - (a+d)\lambda + (ad-bc) = 0 \quad (10)$$

имеет корни, равные

$$\lambda_{1,2} = \frac{a+d}{2} \pm \sqrt{\frac{(a+d)^2}{4} - (ad-bc)} \quad (11)$$

Из теории устойчивости известно, что уравнения первого приближения позволяют судить об устойчивости исходной нелинейной системы лишь в случае, если состояние равновесия (особая точка) является «грубой».

В реферируемой работе показано, что при активном характере нагрузки в системе возможны только «грубые» особые

точки типа устойчивого узла при $(ad-bc) > 0$ и типа седла при $(ad-bc) < 0$. Это следует из того, что при положительных значениях параметров не может быть $(a+d) > 0$ и невозможности появления особых точек типа устойчивый фокус.

Границей между устойчивой областью (узлы) и неустойчивой (седла) является «негрубая» сложная особая точка типа устойчивый узел — седло при $(ad-bc) = 0$. При учете зависимостей (9) определяющими условиями наличия той или другой особой точки являются

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y < z_я + z_b + \frac{z_b z_я}{z_n} \text{ — устойчивый узел,} \quad (12)$$

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y = z_я + z_b + \frac{z_b z_я}{z_n} \text{ — устойчивый узел-седло,} \quad (13)$$

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y > z_я + z_b + \frac{z_b z_я}{z_n} \text{ — седло.} \quad (14)$$

Как следует из этих выражений, в случаях холостого хода и короткого замыкания состояние равновесия всегда устойчиво. Далее, индуктивности L_{by} и $L_{яy}$ не влияют на характер состояния равновесия, а при соответствующем подборе параметров системы можно обеспечить условие (12), т. е. устойчивость в любой точке внешней характеристики.

Такое состояние «полной» устойчивости генератора при любых значениях нагрузки может быть получено, например, при пониженной скорости n_r вращения генератора, когда при всех прочих равных условиях производная $\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y$ приобретает меньшее значение. Изложенное подтверждено экспериментально. Сравнение расчетных и экспериментальных границ устойчивости дает достаточно хорошее совпадение (11%).

Далее в работе доказано, что если имеется область неустойчивости, то граница устойчивости всегда лежит, на внешней характеристике, ниже критической точки (а не совпадает с ней, как часто утверждают). Таким образом, указанные в

работе условия устойчивой и неустойчивой работы системы являются более точными, чем приводимые в литературе.

Для сознательного выбора значений параметров, обеспечивающих устойчивую работу, необходимо исследовать их влияние на тип особых точек.

Последний определяется сочетанием следующих параметров системы: r_n, r_b, r_a и $\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y$. Для выяснения типа особых точек при всех возможных сочетаниях параметров в работе построены три диаграммы разбиения плоскостей

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(z_b), \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(z_n), \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(z_a)$$

параметров системы на области, каждая из которых соответствует определенному типу особой точки. При этом учтено, что все параметры положительны, а также постоянны за исключением исследуемого.

Анализ диаграммы позволил определить влияние параметров на статику системы. Но диаграммы дают наглядную картину поведения системы только в «малом», по ним же ничего нельзя сказать о поведении системы за пределами «малого».

Для исследования поведения системы вблизи границы устойчивости применены методы, предложенные А. М. Ляпуновым и Н. Н. Баутиным. Рассматриваемый вопрос имеет большое значение не только с точки зрения изучения основного рабочего режима (состояния равновесия), но и с точки зрения исследования разбиения фазовой плоскости на траектории и зависимости качественной структуры разбиения от параметра.

Как известно, исследование сводится при наличии нулевого корня к оценке значений величины $l(\nu_0)$. Здесь l — ляпуновский коэффициент, ν_0 — бифуркационное значение параметра ν системы.

При этом исследовании необходимо в выражении разложение Δe_r в ряд Тейлора учитывать члены до второго порядка включительно. Тогда ляпуновский коэффициент для этого случая равен:

$$l(\nu_0) = - \frac{a^2 b^2 \nu_{20}}{(a^2 + bc)^3}$$

где коэффициенты a, b, c и d имеют прежние значения, согласно (9), а

$$\nu_{20} = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{d^2 e_r}{di_b^2}\right)_y}{L_{ay}}$$

В работе доказывается, что $l(\nu_0) \neq 0$ и граница является «опасной». Таким образом, система вблизи этой границы являясь устойчивой по уравнениям первого приближения, практически неустойчива, и вблизи нее нельзя гарантировать нормальную работу установки.

В работе показано, что бесконечность абсолютно неустойчива и, следовательно, сумма индексов Пуанкаре всех особых точек, возможных одновременно в системе, равна +1. Последнее находится в полном соответствии с физическим представлением.

Действительно, при больших значениях напряжения как характеристика холостого хода, так и внешняя из-за явления насыщения имеют почти горизонтальные участки. Имея в качестве состояния равновесия особую точку типа устойчивого узла, система в этих удаленных областях будет вести себя как линейная, поскольку будет выполнено условие (12). Следовательно, фазовые траектории γ входят из бесконечности в область конечных значений i_b и i_n .

Для выявления всей совокупности движений, возможных в системе при различных начальных условиях и значениях параметров необходимо разбить фазовую плоскость на траектории и построить ее фазовый портрет.

Поскольку все изоклины, за исключением изоклины горизонтальных касательных, являются кривыми, то построение изоклин сопряжено со значительными вычислениями. Для упрощения построений можно воспользоваться уравнениями первого приближения для изоклин, полученных путем линеаризации уравнений (5), (6) и (7), а по ним построить интегральные кривые.

Построенный таким образом приближенный фазовый портрет стремится при уменьшении областей к точному портрету как к пределу.

В работе приведены фазовые портреты на плоскости Δi_n , Δi_b , для всех возможных состояний равновесия и показано, как меняется картина при изменении параметров. На основе изложенного дан фазовый портрет системы в «малом» для случая, когда имеют место особые точки типа устойчивого узла, седла и сложная особая точка типа седло-устойчивый узел.

Представляет также интерес вопрос о возможности возбуждения в системе автоколебаний при активном характере нагрузки.

В системе замкнутые фазовые траектории (предельные циклы) невозможны, поскольку через все особые точки проходят интегральные прямые, простирающиеся в бесконечность.

Невозможность периодических режимов вытекает и из чисто физических соображений: поскольку $L_n = 0$, то в системе отсутствует накопитель энергии, который, являясь источником э. д. с., мог бы при благоприятных условиях вызвать перемагничивание генератора.

Связь фазовой траектории с переходным процессом и влияние параметров системы на динамику рассмотрены в главе VII работы.

IV. РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТРАКТОВКА АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ $L_n \neq 0$

Многообразие получающихся видов движения и сложность исследования протекающих в системе процессов, когда нагрузка имеет активно-индуктивный характер создают определенные трудности теоретического порядка. Поэтому на первом этапе исследования целесообразно ввести некоторую идеализацию, упрощающую задачу. Таковой идеализацией является релаксационная трактовка автоколебаний.

Известно, что для возникновения автоколебаний в рассматриваемой системе индуктивности контура возбуждения и якорной цепи должны быть «малы» по сравнению с индуктивностью нагрузки. Тогда в первом приближении естественно предположить, что

$$L_n \neq 0, L_b = 0 \quad \text{и} \quad L_a = 0 \quad (15)$$

Учитывая (15), для режима динамики получим:

$$e_r(i_b) = (z_a + z_b) i_b + z_a i_n \quad (16)$$

$$e_r(i_b) = z_a i_b + (z_a + z_n) i_n + L_n(i_n) \frac{di_n}{dt} \quad (17)$$

При совместном решении этих выражений можно получить уравнения первого приближения по А. М. Ляпунову. Характеристическое уравнение имеет единственный корень

$$\lambda = \frac{[z_a + z_b + \frac{z_a z_b}{z_n} - (\frac{de_r}{di_b})_y] z_n}{[(\frac{de_r}{di_b})_y - (z_a + z_b)] L_{ny}} \quad (18)$$

Как следует из (18), если

$$(\frac{de_r}{di_b})_y < z_a + z_b, \quad \text{то} \quad \lambda < 0 \quad (19)$$

но при

$$(\frac{de_r}{di_b})_y = z_a + z_b, \quad \lambda = +\infty \quad (20)$$

Таким образом, последнее условие определяет собой границу устойчивости. Таковой является также точка, где выполнено условие (13).

Следовательно, в системе имеют место несколько декрементных (устойчивых) и инкрементных (неустойчивых) областей. При $r_n = \infty$ состояния равновесия декрементны, а при $r_n = 0$ всегда инкрементны.

Далее, в реферируемой работе проведено исследование поведения системы вблизи границы устойчивости и доказано, что последняя является «опасной».

Показано, что и в случае принятой идеализации границы устойчивости всегда расположены ниже критической точки системы.

Как следует из (19) и (20), изменение устойчивости происходит «скачкообразно». Для рассмотрения физической стороны этого вопроса произведен анализ выражений для производных и показано, что при выполнении условия (20) и конечных значениях тока нагрузки $\frac{di_H}{dt}$ не может иметь значений, равных бесконечности. Последнее означает, что ток нагрузки не может изменяться «скачком» и для него не может быть «разрывных» колебаний. Объясняется это тем, что при $L_H \neq 0$ магнитное поле нагрузки запасает в каждый момент времени энергию которая не может изменяться мгновенно, поскольку система не обладает бесконечной мощностью. В то же время, в силу принятых идеализаций $L_B=0$ и $L_A=0$, токи возбуждения и якоря могут изменяться «скачком» при выполнении условия (20).

Поскольку в момент «скачка» правые части уравнений для $\frac{di_B}{dt}$ и $\frac{di_A}{dt}$ являются неаналитическими функциями, то условия теоремы Коши не выполнены и возможны случаи неединственности решений или отсутствие их.

Для представления переходных процессов системы на фазовой плоскости определим уравнение интегральных кривых на последней. В качестве координат выберем i_B и i_H . Дифференциальное уравнение интегральных кривых имеет вид:

$$z_B \dot{i}_B = e_r(i_B) - z_A \dot{i}_A = U_y \quad (21)$$

Откуда следует, что в данном случае интегральной кривой системы является ее статическая внешняя характеристика. Это, в свою очередь является большим преимуществом выбранной фазовой плоскости. Но поскольку внешняя характеристика неоднозначна относительно тока нагрузки, в случае нарушения условия Коши, имеем неединственность решения.

В момент «скачка» выражение (21) не отображает движения системы и необходимо ввести «условие скачка», позволяющее определить закон движения для этого случая.

Это условие получено в виде

$$\dot{i}_{A2} + \dot{i}_{B2} = \dot{i}_{A1} - \dot{i}_{B1}$$

где

i_{A1}, i_{B1} — ток якоря и возбуждения до «скачка».

i_{A2}, i_{B2} — ток якоря и возбуждения после «скачка».

В работе рассмотрен механизм возбуждения автоколебаний и показано, что в случае резко выраженного характера нелинейностей L_H и L_B реальная система совершает колебания, весьма близкие к релаксационным, т. е. принятая идеализация вполне допустима.

V. ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ПРИ $L_H \neq 0$

В случае активно-индуктивного характера нагрузки при принятых допущениях и при учете L_A и L_H система в динамике описывается уравнениями (1), (3) и

$$e_r(i_B) = z_A \dot{i}_A + z_H \dot{i}_H + L_A(i_A) \frac{di_A}{dt} + L_H(i_H) \frac{di_H}{dt} \quad (22)$$

Из этих выражений можно получить уравнение для интегральных кривых в виде

$$\frac{di_B}{di_H} = \frac{L_H(i_H) e_r(i_B) + [L_A(i_A) z_H - L_H(i_H) z_A] \dot{i}_H -}{L_B(i_B) e_r(i_B) + [L_A(i_A) z_B - L_B(i_B) z_A] \dot{i}_B -} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-[L_A(i_A) z_B + L_H(i_H) z_A + L_H(i_H) z_B] \dot{i}_B}{-[L_A(i_A) z_H + L_B(i_B) z_H + L_B(i_B) z_A] \dot{i}_H} \quad (23)$$

Для уравнения изоклин тогда имеем

$$L_{H0}(i_{B0}) = \frac{\Theta L_B(i_{B0}) - L_H(i_{H0})}{L_A(i_{A0}) z_H - L_H(i_{H0}) z_A + \Theta [L_A(i_{A0}) z_H + L_B(i_{B0}) z_H + L_B(i_{B0}) z_A]} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{e_r(i_{B0}) + \frac{L_A(i_{A0}) z_B + L_H(i_{H0}) z_A}{L_A(i_{A0}) z_H - L_H(i_{H0}) z_A}}{+ L_B(i_{B0}) z_A} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ L_H(i_{H0}) z_B + \Theta [L_A(i_{A0}) z_B - L_B(i_{B0}) z_A]}{+ \Theta [L_A(i_{A0}) z_H + L_B(i_{B0}) z_H + L_B(i_{B0}) z_A]} i_{B0} \quad (24)$$

При $\Theta = \infty$ получим уравнение изоклины вертикальных касательных:

$$i_{HO}(i_{BU}) = \frac{L_B(i_{BU})e_r(i_{BU}) + [L_A(i_{AO})z_B - L_B(i_{BU})z_A]i_{BU}}{L_A(i_{AO})z_H + L_B(i_{BU})z_H + L_B(i_{BU})z_A} \quad (25)$$

Уравнение изоклин горизонтальных касательных имеет вид:

$$i_{HO}(i_{BU}) = \frac{[L_A(i_{AO})z_B + L_H(i_{HO})z_A + L_H(i_{HO})z_B]i_{BU} - L_H(i_{HO})e_r(i_{BU})}{L_A(i_{AO})z_H - L_H(i_{HO})z_A} \quad (26)$$

И в данном случае состояния равновесия системы являются особыми точками семейства интегральных кривых, поскольку выражение (23) обращается в неопределенность вида $\frac{0}{0}$ при достижении величинами своих установившихся значений.

В работе доказано, что в системе при определенных сочетаниях параметров возможны автоколебания.

Для исследования состояний равновесия на устойчивость определены уравнения первого приближения по А. М. Ляпунову в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\Delta i_B)}{dt} &= a \Delta i_B + b \Delta i_H \\ \frac{d(\Delta i_H)}{dt} &= c \Delta i_B + d \Delta i_H \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где

$$a = \frac{L_{HY} \left(\frac{de_r}{di_B} \right)_Y - (L_{AY}z_B + L_{HY}z_A + L_{HY}z_B)}{L_{AY}L_{HY} + L_{BY}L_{HY} + L_{AY}L_{BY}} \quad (28)$$

$$b = \frac{L_{AY}z_H - L_{HY}z_A}{L_{AY}L_{HY} + L_{BY}L_{HY} + L_{AY}L_{BY}}$$

$$c = \frac{L_{BY} \left(\frac{de_r}{di_B} \right)_Y + (L_{AY}z_B - L_{BY}z_A)}{L_{AY}L_{HY} + L_{BY}L_{HY} + L_{AY}L_{BY}} \quad (28)$$

$$d = - \frac{L_{AY}z_H + L_{BY}z_H + L_{BY}z_A}{L_{AY}L_{HY} + L_{BY}L_{HY} + L_{AY}L_{BY}}$$

Характеристическое уравнение имеет вид согласно (10), а корни его определяются по (11). Анализируя состояния равновесия возможные при определенных сочетаниях параметров, можно установить, что в системе возможны следующие «грубые» особые точки и виды переходных процессов:

1. Неустойчивые фокусы (нарастающие колебательные).
2. Устойчивые фокусы (затухающие колебательные).
3. Неустойчивые узлы и седла (нарастающие аperiodические).
4. Устойчивые узлы (затухающие аperiodические).

Помимо этого возможны незатухающие колебания, т. е. автоколебания.

Из «негрубых» состояний равновесия возможны:

1. Сложный фокус (центр).
2. Сложная особая точка типа седло-центр.
3. Сложная особая точка типа седло — неустойчивый узел.
4. Сложная особая точка типа седло — устойчивый узел.

В работе построена диаграмма с координатами $\sigma = a + d$ и $\Delta = (ad - bc)$, позволившая наглядно показать зависимость характера состояний равновесия от параметров.

Границей между областями узлов и фокусов на диаграмме является парабола

$$4(ad - bc) = (a + d)^2 \quad (29)$$

Границей колебательной устойчивости является прямая, определяемая выражениями

$$a + d = 0, \quad ad - bc > 0 \quad (30)$$

после подстановки значений коэффициентов из (28) эти выражения приобретают вид

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y = (z_\alpha + z_\beta) + \frac{L_{\beta\gamma}}{L_{\alpha\gamma}}(z_\beta + z_\alpha) + \frac{L_{\alpha\gamma}}{L_{\alpha\gamma}}(z_\alpha + z_\beta) \quad (31)$$

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y < z_\beta + z_\alpha + \frac{z_\beta z_\alpha}{z_\alpha} \quad (32)$$

Аналогично можно получить выражение для границы апериодической устойчивости:

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y < (z_\alpha + z_\beta) + z_\alpha \left(\frac{L_{\beta\gamma} + L_{\alpha\gamma}}{L_{\alpha\gamma}}\right) + \frac{L_{\beta\gamma}}{L_{\alpha\gamma}} z_\beta + \frac{L_{\alpha\gamma}}{L_{\alpha\gamma}} z_\alpha \quad (33)$$

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y = z_\beta + z_\alpha + \frac{z_\beta z_\alpha}{z_\alpha} \quad (34)$$

В реферируемой работе доказано, что в случае указанного характера нагрузки, граница устойчивости системы всегда расположена на внешней характеристике ниже точки критического значения тока, а не совпадает с ней, как утверждает в учебной литературе. И в этом случае можно обеспечить устойчивую работу установки при любых значениях тока нагрузки.

VI. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НА ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ В «МАЛОМ»

Поскольку характер корней характеристического уравнения и, следовательно, особых точек и состояний равновесия зависит от следующих параметров системы $L_{\alpha\gamma}$, r_α , $L_{\beta\gamma}$, r_β , $L_{\gamma\alpha}$, r_γ и n_r , влияющих на величину $\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y$, то представляет

интерес выяснить характер особых точек при всех возможных сочетаниях параметров. Для этого в работе построено 6 видов диаграмм:

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(L_{\alpha\gamma}); \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(L_{\beta\gamma}); \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(L_{\gamma\alpha});$$

$$\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(r_\alpha); \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(r_\beta); \left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y(r_\gamma)$$

При этом при построении первых трех диаграмм все параметры принимаются постоянными за исключением исследуемого.

Для определения уравнения границы комплексных корней необходимо решить выражение (29) относительно $\left(\frac{de_r}{di_b}\right)_y$.

Границей, разделяющей области устойчивых фокусов и узлов от неустойчивых, является кривая, определяемая выражением (31), а границей области седел является кривая (34).

Придавая для первой диаграммы $L_{\alpha\gamma}$, а для других $L_{\beta\gamma}$ или $L_{\gamma\alpha}$ ряд фиксированных значений при постоянных значениях других параметров можно построить указанные диаграммы. В качестве примера все диаграммы в работе построены для генератора типа МИ-32.

Но построить диаграммы при изменении r_α , r_β или r_γ намного сложнее, чем первые три. Это объясняется тем, что при изменении одного из этих параметров меняются и другие параметры, так при изменении r_α меняются $L_{\beta\gamma}$, $L_{\gamma\alpha}$ и $L_{\alpha\gamma}$ из-за изменения токов нагрузки и возбуждения. При исследовании влияния на характер состояний равновесия r_β и r_γ необходимо вначале построить семейства внешних характеристик для значений $r_\beta = \text{var}$ или соответственно $r_\gamma = \text{var}$, после чего для каждого значения r_β или r_γ определить $L_{\alpha\gamma}$, $L_{\beta\gamma}$ и $L_{\gamma\alpha}$.

Построенные диаграммы показывают наглядно как влияет изменение каждого отдельного параметра на характер состояний равновесия, т. е. они дают полную картину поведения системы в «малом».

Далее показано, что пренебрежение нелинейным характером индуктивностей вносит сильное искажение в статику системы, а в динамику тем более.

Все расчеты, связанные с построением диаграмм были произведены на электронно-счетной машине «Минск—1».

Для исследования поведения системы вблизи границ областей устойчивости, т. е. для исследования системы на устойчивость, когда состояние равновесия является «негрубым» в реферируемой работе определены ляпуновские коэффициенты. Для этого при мнимых корнях необходимо в выражении разложения Δe_r в ряд Тейлора учесть члены до третьего порядка включительно. Тогда уравнения (27) могут быть представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\Delta i_B)}{dt} &= a \Delta i_B + b \Delta i_H + a_{20} \Delta i_B^2 + a_{30} \Delta i_B^3, \\ \frac{d(\Delta i_H)}{dt} &= c \Delta i_B + d \Delta i_H + b_{20} \Delta i_B^2 + b_{30} \Delta i_B^3, \end{aligned} \right\} (35)$$

где коэффициенты a, b, c и d имеют прежние значения, а прочие равны:

$$a_{20} = \frac{1}{2} \frac{L_{HY} \left(\frac{d^2 e_r}{d i_B^2} \right)_Y}{L_3}, \quad a_{30} = \frac{1}{6} \frac{L_{HY} \left(\frac{d^3 e_r}{d i_B^3} \right)_Y}{L_3}, \quad (36)$$

$$b_{20} = \frac{1}{2} \frac{L_{BY} \left(\frac{d^2 e_r}{d i_B^2} \right)_Y}{L_3}, \quad b_{30} = \frac{1}{6} \frac{L_{BY} \left(\frac{d^3 e_r}{d i_B^3} \right)_Y}{L_3}$$

$$L_3 = L_{AY} L_{HY} + L_{BY} L_{HY} + L_{AY} L_{BY}$$

Тогда ляпуновский коэффициент равен

$$L(\nu_0) = \frac{\pi}{4q\sqrt{q}} [2aa_{20}^2 + 2ba_{20}b_{20} - 3a_{30}(a^2 + bc)], \quad (37)$$

где

$$q = (ad - bc) > 0$$

Анализ выражения (37) показывает, что для рассматриваемой системы всегда

$$L(\nu_0) > 0$$

и, следовательно, данная граница является «опасной».

Поведение системы при нулевом корне можно установить, если учесть в выражении разложения Δe_r в ряд Тейлора члены до второго порядка включительно, тогда ляпуновский коэффициент для этого случая определяется как

$$l(\nu_0) = \frac{a b^2 (c a_{20} - a b_{20})}{(a^2 + bc)^3}.$$

Анализ этого выражения показывает, что

$$l(\nu_0) \neq 0$$

и рассматриваемая граница является «опасной».

Таким образом, поскольку обе границы «опасны» вблизи них система неустойчива и нельзя гарантировать нормальную работу установки. Помимо этого неравенство $L(\nu_0) > 0$ указывает, что в системе имеет место «жесткий» режим генерации автоколебаний. Последний возможен в том случае, если состояние равновесия устойчиво и требуется достаточно сильный начальный толчок, чтобы начался режим самовозбуждения, переходящий затем в автоколебания. В этом случае на фазовой плоскости возникают два предельных цикла — внутренний неустойчивый, и внешний, устойчивый. «Жесткий» режим возникновения автоколебаний является наиболее опасным, т. к. колебания возникают внезапно и могут иметь большую амплитуду, величину которой из-за внезапного возникновения невозможно своевременно ограничить. В работе подробно рассмотрена физика возбуждения автоколебаний.

Но режим возбуждения может быть и «мягким». Однако вероятность последнего в указанной системе мала, так как в реальной установке всегда имеют место возмущения.

Как показывает анализ, при данном характере нагрузки, бесконечность абсолютно неустойчива.

VII. ФАЗОВЫЙ ПОРТРЕТ СИСТЕМЫ

Для построения фазового портрета в «малом» в работе приведены уравнения коэффициентов наклона соответствующей

щих изоклин и касательных к континиуму интегральных кривых. Рассмотрен также характер каждого коэффициента вблизи соответствующего состояния равновесия.

Анализ нелинейных уравнений для изоклин горизонтальных и вертикальных касательных показывает, что первая из них является кривой, подобной внешней характеристике генератора, а вторая возрастающей функцией от $i_{н1}$.

Доказано, что в случае наличия состояния равновесия типа седла в системе должны иметь место одновременно еще два состояния равновесия, расположенные на одной ветви внешней характеристики, с индексом Пуанкаре +1. Таким образом, при одних и тех же параметрах одновременно имеют место три состояния равновесия. Как показано в работе, это можно объяснить только нелинейным характером r_n за счет сопротивления щеточного контакта.

Рассмотрен также вопрос о направлении движения изображающей точки по фазовой траектории в различных областях фазовой плоскости.

Для приближенного построения интегральной кривой в работе применен метод, базирующийся на использовании только изоклин горизонтальных и вертикальных касательных и являющийся некоторым видоизменением известного метода Льенара. Поскольку характер предельного цикла зависит от сочетаний параметров или, точнее, от поведения изоклин вблизи особой точки, рассмотрены различные случаи, которые могут иметь место, и сделаны соответствующие выводы о поведении системы в «малом» и «большом».

Для установления связи между фазовым портретом и переходным процессом в работе применена линейно-кусочная аппроксимация к нелинейным функциям.

Поскольку индуктивность якорной цепи является обычно линейной функцией от тока возбуждения, то ее аппроксимировать нет необходимости. Аппроксимируя фазовую траекторию и функции $L_n(i_n)$ и $L_b(i_b)$ и выбирая значения $i_{н1}$ и $i_{н2}$, $i_{в1}$ и $i_{в2}$ так, чтобы в пределах этих значений отрезки кривых хорошо представлялись бы линейными участками, исключая $\frac{di_b}{dt}$

получим из основных уравнений системы выражение

$$A + B i_n + (C + D i_n) \frac{di_n}{dt} = 0 \quad (38)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= z_\theta (a_{1,2} i_{н1} - L_{\theta 1}), \quad B = (z_n - a_{1,2} z_\theta), \\ C &= (L_{н1} + c_{1,2} a_{1,2}^2 i_{н1} - a_{1,2} L_{\theta 1} - \beta_{1,2} i_{н1}), \quad D = (\beta_{1,2} - c_{1,2} a_{1,2}^2) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$a_{1,2} = \frac{i_{\theta 2} - i_{\theta 1}}{i_{н2} - i_{н1}}, \quad \beta_{1,2} = \frac{L_{н2} - L_{н1}}{i_{н2} - i_{н1}}, \quad c_{1,2} = \frac{L_{\theta 2} - L_{\theta 1}}{i_{\theta 2} - i_{\theta 1}} \quad (40)$$

Из (38) получено выражение для времени движения изображающей точки по участку фазовой траектории в виде:

$$t_{1,2} = \frac{(AD - BC)}{B^2} \ln \frac{A + B i_{н2}}{A + B i_{н1}} - \frac{D}{B} (i_{н2} - i_{н1}) \quad (41a)$$

Аналогично, исключая $\frac{di_n}{dt}$, можно получить выражение

для $t_{1,2}$ в виде

$$t_{1,2} = \frac{(A_1 D_1 - C_1 B_1)}{B_1^2} \ln \frac{A_1 + B_1 i_{\theta 2}}{A_1 + B_1 i_{\theta 1}} - \frac{D_1}{B_1} (i_{\theta 2} - i_{\theta 1}) \quad (41b)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= z_n \left(\frac{1}{a_{1,2}} i_{\theta 1} - i_{н1} \right), \quad B_1 = \left(z_\theta - z_n \frac{1}{a_{1,2}} \right), \\ C_1 &= \left(L_{\theta 1} - c_{1,2} i_{\theta 1} - L_{н1} \frac{1}{a_{1,2}} + \beta_{1,2} \frac{1}{a_{1,2}^2} i_{\theta 1} \right), \\ D_1 &= \left(c_{1,2} - \beta_{1,2} \frac{1}{a_{1,2}^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Таким образом, если предельный цикл разбит на n участков, то период автоколебаний определяется формулами:

$$T \approx \sum_{m=1}^n \left\{ \left(\frac{AD - CB}{B^2} \right)_m \ln \left(\frac{A + B i_{н2}}{A + B i_{н1}} \right)_m - \left[\frac{D}{B} (i_{н2} - i_{н1}) \right]_m \right\} \quad (43a)$$

или

$$T \approx \sum_{m=1}^n \left\{ \left(\frac{A_1 D_1 - C_1 B_1}{B_1^2} \right)_m \ln \left(\frac{A_1 + B_1 i_{\theta 2}}{A_1 + B_1 i_{\theta 1}} \right)_m - \left[\frac{D_1}{B_1} (i_{\theta 2} - i_{\theta 1}) \right]_m \right\} \quad (436)$$

При расчетах выражения (41а), (41б) и (43а), (43б) равноценны за исключением участков, где

$$i_{\theta 2} = i_{\theta 1} \quad \text{или} \quad i_{H2} = i_{H1}$$

В первом случае можно пользоваться соответственно формулами (41а) и (43а), а во втором (41б) и (43б).

Выражения (41а) и (41б), справедливы также и для расчетов при чисто активном характере нагрузки, но коэффициенты (39) и (42) будут иметь другой вид.

Приведены также формулы для расчета времени переходного процесса и периода автоколебаний для случая использования приближенного метода построения фазового портрета.

Учитывая полученные зависимости и результаты, в реферруемой работе произведен анализ влияния параметров и нагрузки на характер автоколебаний и на поведение системы в динамике. Произведено сравнение полученных выводов с экспериментом.

Далее показано, что для повышения точности построения интегральных кривых и, следовательно, для расчета переходного процесса и автоколебательных режимов необходимо учитывать также частичные петли гистерезиса.

Рассмотрен также вопрос об определении параметров системы по заданным фазовым траекториям. Причем для этого предлагается использовать основные положения приближенного метода построения фазовых траекторий.

В конце работы проведен анализ мер борьбы с автоколебаниями и меры по повышению устойчивости системы.

В приложении к работе дан пример расчета переходного процесса системы при изменении r_n при активно-индуктивном характере нагрузки. Расчет был произведен для генератора типа МИ-32. Максимальное расхождение между опытом и

расчетом по току нагрузки составил не более +9%, а по току возбуждения — 7%. По времени расхождение составляет +10%. Все расчеты были произведены на электронно-цифровой машине «Минск-1».

ВЫВОДЫ

На основании произведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) в большинстве случаев при исследовании нельзя пренебрегать величиной тока возбуждения из-за значительной погрешности, вносимой в расчеты. Аналогичное можно сказать и относительно пренебрежения нелинейным характером индуктивностей;

2) метод характеристического треугольника может быть применен для построения характеристики холостого хода и внешней во всех четырех квадрантах;

3) применение метода фазовой плоскости позволило под другим углом зрения осветить ряд вопросов, как-то: устойчивость, режимы возбуждения автоколебаний — и проследить их зависимость от начальных условий и значений параметров.

Выбранная фазовая плоскость «ток возбуждения — ток нагрузки» обладает рядом преимуществ, поскольку она является плоскостью статических и динамических характеристик; следовательно, при исследовании динамики системы можно весьма просто производить ее сравнение со статикой, что удобно и наглядно. Так при рассмотрении разрывных колебаний интегральной кривой является внешняя характеристика генератора.

Помимо этого эта плоскость является привычной для специалистов по электроприводу и электрическим машинам.

Уравнения изоклин имеют достаточно простой вид, а в случае активного характера нагрузки изоклиной, горизонтальных касательных является статическая характеристика нагрузки. Переход от фазового портрета к развертке во времени достаточно прост. Фазовую траекторию системы можно наблюдать на экране электронного осциллографа;

4) зависимость состояний равновесия системы от параметров в работе представлена в виде диаграмм, на которых наглядно показаны все возможные состояния равновесия. Диаграммы и теория позволяют выявить бифуркационные зна-

чения параметров, что облегчит создание более рациональных конструкций электрических машин и систем;

5) при определенных сочетаниях параметров системы внешняя характеристика может быть устойчивой во всей области значений токов нагрузки и напряжений. Если же часть внешней характеристики и является областью неустойчивости, то граница устойчивости всегда лежит ниже критической точки. Иначе говоря, математически доказано предположение Рихтера относительно расположения неустойчивой области. Эксперименты, проведенные для проверки, подтвердили правильность этого положения;

6) строгая теория А. М. Ляпунова позволила доказать правильность сделанных акад. М. В. Шулейкиным выводов о возможных видах движения рассматриваемой системы;

7) границы устойчивости системы определяются, по изложенному в работе способу, с достаточной для практики точностью (+11%);

8) проведенное исследование поведения системы вблизи границ областей устойчивости («негрубые» состояния равновесия) показало, что границы являются «опасными», а следовательно, в системе имеет место «жесткий» режим возбуждения автоколебаний. «Мягкий» режим возбуждения возможен, но мало вероятен из-за имеющихся в реальной системе непрерывных возмущений;

9) теоретически и экспериментально показано, что при одних и тех же значениях параметров в системе в пределах одного квадранта могут иметь место одновременно три состояния равновесия, причем одним из них обязательно является особая точка типа седла. Объясняется это явление нелинейным характером сопротивления якорной цепи;

10) устойчивость системы увеличивается с увеличением сопротивления нагрузки и индуктивностей цепи возбуждения и якоря и с уменьшением индуктивности нагрузки. Увеличение сопротивления контура возбуждения и якорной цепи в определенных пределах снижает устойчивость системы, но дальнейшее возрастание этих параметров может снова увеличить устойчивость. Установление этих пределов можно произвести, согласно изложенному в работе. Увеличение скорости вращения генератора снижает устойчивость системы;

11) теоретически и экспериментально показано, что в переходном процессе:

а) с увеличением сопротивления цепи возбуждения, якоря и нагрузки экстремальные значения токов уменьшаются, а быстродействие системы увеличивается;

б) с увеличением индуктивностей быстродействие системы снижается;

в) увеличение скорости вращения генератора способствует возрастанию амплитуды токов и быстродействию системы;

12) в режиме автоколебаний:

а) увеличение индуктивностей цепи возбуждения и якорной и уменьшение сопротивлений контура возбуждения и якоря приводит к увеличению периода автоколебаний;

б) при увеличении сопротивления или уменьшении индуктивности нагрузки период автоколебаний увеличивается;

13) поскольку возбуждение автоколебаний становится все затруднительней с повышением ее устойчивости, то, увеличивая последнюю, мы уменьшаем вероятность автоколебательных режимов;

14) изложенные упрощенные методы построения фазовых траекторий и выражения для перехода от последних к развертке во времени могут быть применены, из-за недостаточной высокой точности, для предварительных расчетов. Фазовые портреты в «малом» могут быть использованы при небольших отклонениях от состояний равновесия;

15) принятые в работе методы расчета позволяют рассчитывать переходные процессы и автоколебательные режимы в рассматриваемой существенно-линейной системе с достаточно высокой степенью точности. Причем для увеличения точности расчета при построении изоклин необходимо учитывать частичные петли гистерезиса;

16) на основе изложенного в работе приближенного метода построения фазовых траекторий можно, при задании последних, определить значения некоторых параметров системы;

17) при исследовании системы изложенными методами успешно могут найти применение современные счетно-решающие устройства, и в частности электронно-цифровые машины;

18) для борьбы с возбуждением автоколебаний и для повышения устойчивости системы, помимо изменения параметров в надлежащем направлении можно рекомендовать следующие эффективные меры: параллельное соединение нагрузки, смещение щеток против направления вращения, введение дифференцирующих обратных связей, включение нелинейных

сопротивлений в цепь возбуждения, использование независимой обмотки, установку полупроводникового вентиля в цепи возбуждения;

19) полученные в работе результаты позволяют вести более эффективную борьбу с весьма нежелательными автоколебательными и неустойчивыми режимами имеющими место во многих электротехнических установках. Последнее относится как к цепям возбуждения систем электропривода, синхронных генераторов, так и к системам электроснабжения транспортных устройств.

Основной материал диссертации опубликован в следующих статьях:

1. Ю. К. Брезе, Статические характеристики генератора с параллельным возбуждением при работе на активную нагрузку. Известия ВУЗов «Электромеханика», № 9, 1961 г.
2. Ю. К. Брезе, Л. И. Ганджа, Устойчивость генератора с параллельным возбуждением при работе на активную нагрузку. Труды института автоматики и электрометрии СО АН СССР, выпуск 4, Новосибирск, 1961 г.
3. Л. И. Ганджа, Г. П. Лыщинский, А. И. Васильев, Ю. К. Брезе, К вопросу о переходных процессах и колебаниях в генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением. Труды института автоматики и электрометрии СО АН СССР, выпуск 4, Новосибирск, 1961 г.
4. Ю. К. Брезе, Л. И. Ганджа, Зависимость состояний равновесия от параметров для системы генератор параллельного возбуждения — активная нагрузка. Сборник трудов ЭМФ НЭТИ, т. 3., Новосибирск, 1961 г.
5. Ю. К. Брезе, Влияние параметров на поведение электромеханической системы в «малом». Известия СО АН СССР, № 12, 1961 г.