

С. К. Шелковий

***Сорок років
наукової співпраці НТУ «ХПІ»
з університетами Німеччини
в галузі технічної механіки***

збірник статей

Харків
2019

УДК 539.3
Ш43

Рецензент — доцент, к.т.н. *Грищенко В. М.*

Шелковий С. К.

Ш43 Сорок років наукової співпраці НТУ «ХПІ» з університетами Німеччини в галузі технічної механіки. Збірник статей / С. К. Шелковий — Харків: НТУ «ХПІ», 2019. — 48 с.

ISBN 978-617-7618-25-5.

В книзі доцента, кандидата технічних наук С. К. Шелкового представлений огляд сорока років наукового партнерства вчених-механіків НТУ «ХПІ» з технічними університетами Магдебурга, Дрездена, Аахена поряд із статтею, присвяченою відомому дрезденському вченому професору Фолькеру Ульбріхту.

Друкуються також наукова стаття з тематики доповідей автора в університетах Німеччини — стосовно динамічного аналізу складних просторових конструкцій енергомашинобудування.

УДК 539.3

ISBN 978-617-7618-25-5

© Шелковий С. К., Степченко О. С., 2019

ДО СІМДЕСЯТИРІЧЧЯ ПРОФЕСОРА ФОЛЬКЕРА УЛЬБРІХТА

С.К. Шелковий, доцент, к. т. н.

Професор Фолькер Ульбріхт народився 17 липня 1949 року в місті Дрездені, столиці Саксонії. Після закінчення середньої школи працював декілька років в промисловості на підприємствах міста Дрездена, після чого здобув вищу освіту в Дрезденському технічному університеті за фахом «Прикладна механіка та математика».



Під керівництвом видатного вченого-механіка професора Г. Ландграфа Фолькер Ульбріхт захистив у Технічному Університеті Дрездена першу (Dr.-Ing.) та другу (Dr.-Ing. habil.) докторські дисертації у галузі нелінійної механіки твердих деформованих тіл, отримавши звання професора. З 70-их років минулого сторіччя по теперішній час він здійснює викладацьку та наукову роботу на посаді професора Дрезденського Технічного Університету (з 2016 року на посаді сінйора-професора).

З 2003 року по 2009 рік професор Ф. Ульбріхт працював деканом, а з 2012-го по 2016-ий заступником декана факультету «Машинознавство» Дрезденського Технічного Університету — найбільшого факультету цього учбового закладу.

Варто лише згадати, що факультет «Машинознавство» налічує більше як шість з половиною тисяч студентів, з якими проводять освітню та наукову роботу більше вісімдесяти досвідчених професорів, а річний бюджет факультету суттєво перевищує суму в мільйон євро.

У 1977—1978 роках Фолькер Ульбріхт, як науковий співробітник Дрезденського Технічного університету і фахівець у галузі нелінійного деформування матеріалів, проходив десятимісячне стажування на кафедрі «Динаміки та міцності машин» ХП. Керівником його стажування від кафедри ДММ був професор А. В. Бурлаков. І перші інтернаціональні публікації у харківському міжвідомчому науково-технічному збірнику «Динаміка та міцність машин», що вийшли у світ ще 1979-го року, належать саме доктору Ф. Ульбріхту та його дрезденському науковому керівникові, відомому вченому-механіку, професору Г. Ландграфу.

З того часу щільні та плідні наукові контакти ХП з Технічним Університетом Дрездена продовжуються вже більше як чотири десятки років. Професор Ф. Ульбріхт є сьогодні добре відомим науковій спільноті Європи фахівцем з нелінійної механіки, автором численних журнальних публікацій, організатором багатьох міжнародних наукових конференцій з механіки в Дрездені та інших містах Саксонії.

На протязі значного часу професор Ульбріхт виконував важливу та відповідальну роботу вченого секретаря найавторитетнішого наукового об'єднання Німеччини, та й усієї Європи, — GAMM, тобто міжнародної Спільки Прикладної Математики та Механіки.

Це поважне об'єднання вчених-механіків налічує сьогодні близько двох тисяч членів і постійно веде активну роботу з організації наукових конференцій та забезпечення наукових періодичних видань.

Професор Ф. Ульбріхт багаторазово організовував наукові доповіді співробітників кафедри ДММ в Дрездені, і зокрема також автора цієї статті, здійснював керівництво дипломниками та аспірантами, що прибули з Харкова до Дрездена, особисто забезпечував лабораторний практикум для груп студентів-практикантів ХП під час їх серпневих поїздок до Німеччини.

Наукова творча активність професора Ульбріхта не вщухає із плином часу. Достатньо привести хоча б частковий перелік його наукових публікацій, що вміщений на офіційному сайті Дрезденського Технічного Університету. Його наукові інтереси, як і раніше, містяться у царині досліджень матеріалів із великими деформаціями, із суттєвою нелінійністю, композиційних та полімерних

матеріалів. Результати цих досліджень, як можна бачити з переліку його робіт, постійно публікуються у найбільш авторитетних європейських наукових періодичних виданнях:

Joseph Goldmann, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. On boundary conditions for homogenization of volume elements undergoing localization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 113(1):1--21, 2018.

Martin Boisly, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. Analysing the large amplitude oscillatory shear response of a Bingham-Hooke model in Pipkin space and by Fourier Transform rheology to predict weak strain overshoots. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 245:11--24, 2017.

Christian Spieler, Markus Kästner, and Volker Ulbricht. Analytic and numeric solution of a magneto-mechanical inclusion problem. *Archive of Applied Mechanics*, 85(9-10), 2015.

Martin Boisly, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. Analysing the large amplitude oscillatory shear of the Cross and Cross—Maxwell models with the aid of Fourier transform rheology using the example of a solvent-borne alkyd primer. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 225:10--27, 2015.

Stefan May, Markus Kästner, Sebastian Müller, and Volker Ulbricht. Hybrid IGAFEM/IGABEM formulation for two-dimensional stationary magnetic and coupled magneto-mechanical field problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 273:161--180, 2014.

Christian Spieler, Philipp Metsch, Markus Kästner, and Volker Ulbricht. Microscale modeling of magnetoactive composites undergoing large deformations. *Technischen Mechanik*, 34(1):39--50, 2014.

Martin Boisly, Markus Kästner, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. General aspects of yield stress fluids — Terminology and definition of viscosity. *Applied Rheology*, 24(1), 2014.

Martin Boisly, Markus Kästner, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. Large amplitude oscillatory shear of the Prandtl element analysed by fourier transform rheology. *Applied Rheology*, 24(3), 2014.

Eike Dohmen, Martin Boisly, Dmitry Borin, Markus Kästner, Volker Ulbricht, Maik Gude, Werner Hufenbach, Gert Heinrich, and Stefan Odenbach. Advancing towards polyurethane-based magnetorheological composites. *Advanced Engineering Materials*, 16(10), 2014.

Markus Kästner, Sebastian Müller, Christian Spieler, Joseph Goldmann, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. Higher order extended FEM for weak discontinuities -- level set representation, quadrature and application to magneto-mechanical problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 93(13):1403--1424, 2013.

Markus Kästner, Sebastian Müller, and Volker Ulbricht. XFEM-modelling of inelastic material behaviour and interface failure in textile-reinforced composites. *Procedia Engineering*, 2:43--51, 2013.

Christian Spieler, Markus Kästner, Joseph Goldmann, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. XFEM modeling and homogenization of magnetoactive composites. *Acta Mechanica*, 224(11):2453--2469, 2013.

Axel Kluge, Andreas Nocke, Christian Paul, Chokri Cherif, Thomas Linse, and Volker Ulbricht. Development and characterization of textile-processable actuators based on shape-memory alloys for adaptive fiber-reinforced plastics. *Textile Research Journal*, 83(18):1936--1948, 2013.

Markus Kästner, Jörg Brummund, Martin Obst, Karin Thielsch, and Volker Ulbricht. Inelastic material behavior of polymers — experimental characterization, formulation and implementation of a material model. *Mechanics of Materials*, 52:40--57, 2012.

Markus Kästner, Sebastian Müller, and Volker Ulbricht. XFEM-modelling of heterogeneous materials and interface failure. *GACM report*, pages 23--30, 2012.

Sebastian Müller, Markus Kästner, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. On the numerical handling of fractional viscoelastic material models in a FE analysis. *Computational Mechanics*, 2012.

Sebastian Müller, Markus Kästner, and Volker Ulbricht. XFEM modeling of inelastic material behavior of composite. *PAMM*, 12(Special Issue: 83rd Annual Meeting of the International Association of Applied

Mathematics and Mechanics (GAMM), Darmstadt 2012):149--150, 2012.

Markus Kästner, Georg Haasemann, and Volker Ulbricht. Multiscale XFEM-modelling and simulation of the inelastic material behaviour of textile-reinforced polymers. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 86:477--498, 2011.

Haasemann Georg, Kästner Markus, Prüger Stefan, and Ulbricht Volker. Development of a quadratic finite element formulation based on the XFEM and NURBS. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 86, S. 598-617, 2011., 86(4-5):598--617, 2011.

Sebastian Müller, Markus Kästner, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. A nonlinear fractional viscoelastic material model for polymers. *Computational Materials Science*, 50(10):2938--2949, 2011.

Sebastian Müller, Markus Kästner, Jörg Brummund, and Volker Ulbricht. A material model of nonlinear fractional viscoelasticity. *PAMM*, 11(1):411--412, 2011.

Georg Haasemann and Volker Ulbricht. Numerical evaluation of the viscoelastic and viscoplastic behavior of composites. *Technische Mechanik*, 30:122--135, 2010.

Georg Haasemann, Christian Lux, and Volker Ulbricht. Development of an elastic-plastic constitutive model for highly anisotropic materials. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 10(1):409--410, 2010.

Markus Kästner, Swen Blobel, Martin Obst, Karin Thielsch, and Volker Ulbricht. Experimental Characterization of the Viscoplastic Material Behaviour of Thermosets and Thermoplastics. *Proceedings in Applied Mechanics and Materials*, 24-25:195--200, 2010.

Swen Blobel, Karin Thielsch, Markus Kästner, and Volker Ulbricht. Application of Real-Time Photoelastic Analysis to Single Fibre Fragmentation Tests. *Proceedings in Applied Mechanics and Materials*, 24-25, 2010.

Kästner Markus, Obst Martin, Brummund Jörg, and Ulbricht Volker. Multiscale modelling of the effective viscoplastic material behaviour of textile-reinforced composites using XFEM. *Proc. Appl. Mat. Mech.*, 10:297--298, 2010.

Професор Ф. Ульбріхт є великим патріотом свого рідного незрівняного міста Дрездена, цієї справжньої Флоренції на Ельбі, є щирим патріотом своєї Саксонії. Кожного разу, приймаючи закордонних гостей, він з величезним ентузіазмом розповідає про історичну та культурну спадщину своєї батьківщини, щедро ділиться своїми найдорожчими роздумами і почуттями. Він готовий їхати за кермом сотні кілометрів, аби ще і ще раз подарувати друзям чудові краєвиди Саксонії, подарувати їм старовинну красу неповторно виразних історичних міст — Майсена і Фрайберга, Гьорліца і Бауцена.

Професор Фолькер Ульбріхт вже більше сорока років залишається добрим і надійним другом нашого Харківського Технічного університету. Тож побажаємо людині високого інтелекту і величезних знань, людині щирої і щедрої душі ще багато років плідної праці, родинного щастя, вірності його друзів, які по-справжньому його люблять і цінують.

СОРОК РОКІВ НАУКОВОГО ТА ОСВІТНЬОГО СПІВРОБІТНИЦТВА КАФЕДРИ ДИНАМІКИ ТА МІЦНОСТІ МАШИН НТУ «ХПІ» З ТЕХНІЧНИМИ УНІВЕРСИТЕТАМИ НІМЕЧЧИНИ

С. К. Шелковий, доцент, к.т.н.

Початок наукового та освітнього співробітництва кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХПІ» Національного Технічного Університету «ХПІ» з німецькими колегами-механіками з Магдебургського університету Отто фон Геріке (вказані сьогоднішні назви обох учбових закладів) відноситься до середини 1970-их років.

Перший «Договір про творче співробітництво між секцією Машинобудування (Механіка твердого тіла) Магдебургської Вищої технічної школи ім. Отто фон Геріке і кафедрою динаміки та міцності машин Харківського політехнічного інституту на 1977—1979 роки.» був підписаний у жовтні 1977 року.

З боку ХПІ підписи під договором поставили ректор інституту професор М. Ф. Семко та завідувач кафедри ДММ професор С. І. Богомолів, з боку Магдебургської ВТШ — ректор професор Пробст та завідувач кафедри «Механіки твердого тіла» професор Й. Альтенбах. Одночасно із цим «Договором» було затверджено також і «Робочий план спільних досліджень на 1977—1979 роки».

Цей перший Договір між Вишами-партнерами і поклав початок їхній інтенсивній та плідній взаємодії у галузі науки та вищої освіти, котра продовжується вже більше як сорок років. При цьому

початковий Договір про творче співробітництво з часом неодноразово отримував пролонгацію.

Власно кажучи, взаємодія наших наукових колективів-партнерів триває вже більше як сорок років, бо ще у 1975 році з першим науковим стажуванням до кафедри ДММ прибув професор кафедри МТТ Магдебургської Вищої технічної школи Вольфганг Штефан.

У 1976 році з аналогічними візитами на кафедрі ДММ побували доктор Фридріх Вааль і доцент Зигфрід Кочик. У подальшому наукові стажування на кафедрі динаміки та міцності машин проходили такі викладачі та наукові співробітники Магдебургського партнерського ВУЗу:

- 1977 рік — професор Й. Альтенбах
- 1977 рік — професор У. Фішер
- 1978 рік — доцент В. Веезе
- 1979 рік — доктор Х. Манг
- 1980 рік — професор А. Лінгенер
- 1981 рік — доктор Х. Альтенбах
- 1982 рік — доцент У. Габберт
- 1985 рік — доцент Ф. Лаугвіц
- 1987 рік — професор В. Шперлінг
- 1988 рік — доцент М. Цейн

Робочі плани наукових стажувань включали в себе виступи німецьких гостей-стажерів з науковими доповідями на кафедрі ДММ і публікації статей за підсумками спільних наукових досліджень вчених кафедр-партнерів. У такому ж режимі проходили і наукові стажування викладачів і наукових співробітників кафедри ДММ під час їх гостьового перебування у Магдебурзі на кафедрі МТТ.

Протягом того ж першого десятиріччя міжвузівського партнерства Магдебургський ВУЗ відвідали із робочими візитами такі співробітники кафедри динаміки та міцності машин:

- 1977 рік — доцент Б. С. Лукін
- 1978 рік — доцент В. Б. Гриньов
- 1979 рік — доцент О. К. Морачковський

1981 рік — доцент В. О. Жовдак
1982 рік — професор С. І. Богомолов
1983 рік — доцент Г. І. Львов
1985 рік — доцент С. К. Шелковий
1986 рік — доцент А. М. Журавльова
1987 рік — доцент А. Г. Андрєєв
1987 рік — м.н.с. Є. Ю. Костенко
1988 рік — м.н.с. К. В. Науменко
1989 рік — ст.н.с. О. Л. Шелудяков

Про досить широкий спектр тематики спільних наукових досліджень кафедр-партнерів може свідчити вибірковий і далеко не повний перелік спільних наукових публікацій, що вийшли у світ лише в одному друкованому виданні, — у республіканському міжвідомчому науково-технічному збірнику «Динаміка та міцність машин», підготовку котрого здійснювала кафедра ДММ.

Цей же перелік статей дає уяву і про вчених двох університетів — учасників спільних наукових розробок:

Г. Ландграф, Ф. Ульбрихт Учёт нелинейного деформирования материалов при расчёте оболочек вращения. — Сборник «Динамика и прочность машин» (ДПМ), № 30, 1979 г.

Г. Ландграф, Ф. Ульбрихт Расчёты упруго-пластического деформирования оболочек вращения. — Сборник ДПМ, № 30, 1979 г.

И. Альтенбах, М. Тодоров Обобщённые вариационные принципы и гибридные конечные элементы в теории упругости. — Сборник ДПМ, № 34, 1981 г.

И. Альтенбах, А. Г. Андреев, Г. Фриче Расчёт напряжений и деформаций в вагонном колесе при осе- и неосесимметричных нагрузках. — Сборник ДПМ, № 34, 1981 г.

А. Лингенер Экспериментальные исследования стохастических процессов в механических системах. — Сборник ДПМ, № 38, 1983 г.

И. Альтенбах, Х. Альтенбах, В. Киссинг Построение одномерных конечных элементов на основе полубезмоментной теории оболочек Власова. — Сборник ДПМ, № 38, 1983 г.

З. Кочик Расчёт пластически деформируемых деталей. — Сборник ДПМ, № 42, 1985 г.

У. Фишер, С. И. Богомолов Применение метода граничных элементов к решению плоской задачи теории упругости. — Сборник ДПМ, № 42, 1985.

И. Альтенбах, В. Киссинг, С. К. Шелковый Конечные элементы полубезмоментной теории оболочек для тонкостенных замкнутых непрямоугольных конструкций. — Сборник ДПМ, № 42, 1985 г.

Г. Шмидт, В. А. Жовдак Определение спектральных характеристик колебательных процессов. — Сборник ДПМ, № 42, 1985 г.

Х. Альтенбах, В. А. Фёдоров Исследование краевого эффекта неоднородной по толщине тонкой круговой цилиндрической оболочки. — Сборник ДПМ, № 42, 1985 г.

К. Гепель, Э. А. Симсон Некоторые возможности оптимальной виброизоляции в машиностроении. — Сборник ДПМ, № 42, 1985 г.

И. Альтенбах, Л. Вильтингер Конечноэлементная программа для упруго-статических задач теории трещин. — Сборник ДПМ, № 44, 1986 г.

Х. Альтенбах, О. К. Морачковский, К. Науменко Моделирование ползучести тонких пластин с учётом повреждаемости и больших перемещений. — Сборник ДПМ, № 55, 1997 г.

V. Ulbricht, R. John, H. Bergander Deformationsgesetze auf der Grundlage des plastischen Spin-Konzeptes in konvektiven Koordinaten. — Сборник ДПМ, № 56, 1998 г.

O. Morachkovsky, H. Altenbach, M. Pasyuk Computational Modeling of Creep Damage Evolution in Transversally-Isotropic Structures. — Сборник ДПМ, № 56, 1998 г.

E. Kullig, V. Ulbricht Zum Zusammenhang zwischen Fluess- und Deformationstheorie bei grossen Verformungen. — Сборник ДПМ, № 57, 2000.

Х. Альтенбах, К. Науменко Г.И. Львов, С.Н. Пулипенко Численное исследование влияния технологических параметров изготовления на упругие свойства коротко-волокнистых композиционных материалов. — Сборник ДПМ, № 12, 2003 г.

Е. И. Гораш, Г. И. Львов, Х. Альтенбах, К. Науменко Анализ высокотемпературной ползучести T-образного соединения двух труб, нагруженных давлением, с учётом анизотропных свойств материала в зоне сварного шва. — Сборник ДПМ, № 20, 2005 г.

С. Гладков, К. Науменко Свободное вращение абсолютно твёрдого цилиндра с учётом вязкого трения. — Сборник ДПМ, № 32, 2006 г.

С. Гладков, Р. Биечек, И. Штайнбах Конечноэлементное моделирование затвердевания бинарного сплава на мезоуровне. — Сборник ДПМ, № 6, 2010.

Важливим пунктом Договору 1977 року про співробітництво кафедр ДММ Харківського Політеху і МТТ Магдебургської вищої школи виявилось також положення про обмін студентськими навчально-ознайомчими практиками. Саме з 1977 року ці поїздки харківських і магдебургських студентських груп було поставлено на регулярну основу.

На протязі двадцяти днів практики студенти-динаміки з Харкова виконували змістовну та різноманітну програму в Німеччині. Окрім лабораторних занять в Магдебургському та Дрезденському університетах програма передбачала для практикантів доволі великі можливості ознайомлення з країною. Так маршрут групи

студентів ДММ проходив по багатьох містах Східної Німеччини: Берлін, Магдебург, Шьонебек (огляд тракторобудівного заводу), Ваймар, Ляйпциг, Дрезден, Потсдам, Людвігсфельде (огляд заводу вантажних автомашин).

Проводилися також недільні поїздки студентських груп у мальовниче старовинне місто Вернігероде та у гори Гарц. Практика харківської групи студентів проходила щороку у фіксовані терміни — з 20 липня по 13 серпня. Двома тижнями раніше в Україні починалася практика магдебургської групи студентів, котра закінчувалася у перші дні приїзду наших студентів-динаміків до Магдебургу, де спілкування двох студентських груп продовжувалося вже в аудиторіях німецького університету.

Перебування німецької групи починалося 6 липня з чотирьохденного огляду міста Києва і продовжувалося двома тижнями лабораторних занять в ХПІ та оглядом потужних харківських промислових підприємств — Турбінного заводу і заводу «Електроважмаш». Ці два тижні включали в себе також поїздки до Полтави і до студентського табору відпочинку у Фігурівці на Сіверському Донці. Завершувався маршрут німецької студентської групи триденним перебуванням у Москві, звідки група 26 липня поверталася до Берліна та Магдебурга.

Першою групою студентів-динаміків, що планово виїздила на практику до НДР у 1977 році, керували доценти А. Г. Андреев та І. Б. Карінцев. У 1978 році кураторами практики були доцент О. К. Морачковський та аспірант С. К. Шелковий. Згадується, що у групі практикантів-політехників того року відрізнявся своєю серйозністю та вдумливістю студент Валерій Конкін, який став нині, через сорок років, заступником директора Інженерно-фізичного інституту НТУ «ХПІ» професором В. Н. Конкіним.

В тому ж році групою німецьких студентів, що відвідали Україну, керував майбутній багаторічний завідувач кафедрою Механіки твердого тіла доктор Ульріх Габберт, і до того ж колективу молодих студентів-механіків належали сьгоднішні ведучі наукові співробітники кафедри МТТ доктора наук Хайнц Кьоппе та Йохим Грохля. Тобто сьгоднішній науково-викладацький склад обох ка-

федр-партнерів формувався вже тоді в процесі обопільного обміну знаннями та ідеями, в побудові дружніх партнерських відносин на довгі роки уперед.

Літні планові обміни групами студентів-практикантів продовжувалися з незмінним успіхом, з вельми позитивними відгуками обох сторін, до 1990-го року. Після істотних політичних змін у світі, коли пішли з історичної сцени і СРСР, і НДР, умови обміну суттєво ускладнилися. За нових обставин обмін втратив принцип безвалютності, котрий спрощував раніше багато організаційних моментів.

Починаючи з 90-их років поїздки харківських студентів-механіків на учбово-ознайомчу практику до ФРН відбуваються вже тільки одного разу на два-три роки, по мірі розгляду окремих заявок та виділення коштів на ці поїздки Німецьким Фондом Академічних Обмінів — DAAD. До того ж і строки, і маршрути пересування груп за нових умов стали суттєво скороченими.

Тим не менш, обміни науковими стажуваннями вчених та викладачів кафедр-партнерів ДММ НТУ «ХПІ» і МТТ Магдебургського університету продовжувалися на регулярних засадах і в 1990-і, і в 2000-і роки, аж до сьогоденного часу. В ці роки пріоритетним напрямком для кафедри динаміки та міцності машин стає навчання все більшої кількості молодих вчених, — студентів-дипломників та аспірантів, — на ґрунті високотехнологічного наукового обладнання, що їм володіє такий авторитетний європейський учбовий заклад, яким, безумовно, залишається сьогодні Магдебургський університет Отто фон Геріке.

Важливу роль в цій підготовці молодих вчених-механіків відіграє та обставина, що вже декілька років поспіль студенти та аспіранти з Харкова отримують фінансову підтримку у вигляді Ейлеровських іменних стипендій та інших освітніх грантів, що виділяються урядом ФРН. Постійним організатором цієї спонсорської підтримки залишається наш добрий друг і колега професор Хольм Альтенбах, котрий, починаючи ще з 1981 року багаторазово відвідував НТУ «ХПІ» та незмінно виступав перед

науковою та студентською спільнотою з читанням циклів лекцій з багатьох розділів нелінійної механіки твердого деформованого тіла. При цьому він також активно друкував свої наукові роботи у нашому міжвідомчому збірнику «Динаміка та міцність машин».

Він же здійснює на протязі багатьох років в Магдебургському університеті, а ще раніше і в Технічному університеті Халле-Віттенберга, наукове керівництво аспірантами, випускниками кафедри ДММ. Так останніми роками дисертації «докторів філософії» (ступень PhD) захистили наші харківські випускники К. Науменко, Є. Костенко, Є. Гораш, О. Ожога-Масловська, І. Львов, О. Пригорнев.

Сьогодні, в 2019 році, професор Хольм Альтенбах є авторитетним та відомим у Європі вченим, завідувачем кафедри Механіки твердого тіла Магдебургського університету, тієї кафедри, котрою у 1970—1980-і роки керував його батько професор Йоганнес Альтенбах.

Обидва вони, і батько, і син, зробивши значний внесок в розвиток партнерства НТУ «ХПІ» та Магдебургського університету, удостоєні звання «Почесний доктор Національного Технічного університету «ХПІ».

Кафедра динаміки та міцності машин на протязі багатьох років підтримує також стабільні наукові контакти з колегами-механіками Дрезденського Технічного університету. Ще у 1977—1978 роках десятимісячне наукове стажування на кафедрі ДММ проходив науковий співробітник Дрезденського Технічного університету доктор Фолькер Ульбріхт, фахівець у галузі нелінійного деформування матеріалів. Керівником його стажування від кафедри ДММ був професор А. В. Бурлаков. І перші інтернаціональні публікації в харківському науково-технічному збірнику «Динаміка та міцність машин», що вийшли у світ ще 1979-го року, належать саме доктору Ф. Ульбріхту та його дрезденському науковому керівникові, відомому вченому-механіку, професору Г. Ландграфу.

З того часу щільні наукові контакти ХПІ з Технічним Університетом Дрездена продовжуються вже більше як чотири десятки

років. Професор Ф. Ульбріхт є сьогодні добре відомим науковій спільноті Європи фахівцем з нелінійної механіки, автором численних журнальних публікацій. На протязі значного часу професор Ульбріхт виконував важливу та відповідальну роботу вченого секретаря авторитетнішого наукового об'єднання Німеччини, та й усієї Європи, — GAMM, тобто міжнародної Спільки Прикладної Математики та Механіки.

Професор Ф. Ульбріхт багаторазово організовував наукові доповіді співробітників кафедри ДММ в Дрездені, і зокрема також, автора цієї статті, здійснював керівництво дипломниками та аспірантами, що прибули з Харкова до Дрездена, особисто забезпечував лабораторні заняття для груп студентів-практикантів ХПІ під час їх серпневих поїздок до Німеччини.

Разом з цими плановими традиційними контактами, кафедрою ДММ спільно з Дрезденським Технічним університетом у 1996—1998 роках був реалізований науково-організаційний проект з європейської програми Темпус-Тасіс. В рамках цієї програми професор Г. І. Львов та доцент С. К. Шелковий працювали в університеті Дрездена та в науковому центрі Європейського Економічного Союзу у Брюсселі, вивчаючи методику підготовки та документаційне забезпечення подальших європейських наукових програм. З боку Дрезденського університету керівництво цим проектом і в Дрездені, і в Брюсселі здійснював доктор Г. Краузе.

1992-го року делегація харківських підприємств та організацій приймала участь у широко відомій Нюрнбергській виставці, одній з найбільших у Німеччині та Європі. Освіту Харкова і науково-технічні розробки харківських вчених репрезентували Харківський політехнічний та Харківський авіаційний інститути. До складу делегації ХПІ входили професор Г. І. Львов, професор А. І. Грабченко, доцент С. К. Шелковий.

У роботі харківської групи прийняв тоді участь і мер Харкова, міста-партнера Нюрнбергу, Є. П. Кушнар'ов, який у подальшому трагічно загинув за обставин, так до кінця і не з'ясованих, але, скоріше за все, мотивованих політичними рішеннями мафіозної влади. Йдеться про так званий, горезвісний «випадок на полюванні»...

Третім інтернаціональним партнером кафедри ДММ в Німеччині, зв'язки з яким зміцнилися останніми роками, є Технічний університет Аахена. У відміну від східно-німецьких міст Магдебурга та Дрездена, Аахен, як відомо, є старовинним містом біля західного кордону Німеччини, котре позначене дуже багатою історичною долею.

Рейнсько-Вестфальський Технічний університет Аахена та RWTH — повна назва та аббревіатура цього ВУЗу, що є заснованим в 1870 році та має дуже багаті наукові традиції. Достатньо нагадати, що RWTH входить у п'ятірку найавторитетніших технічних університетів Європи та позначений науковою діяльністю в його стінах п'яти Нобелівських лауреатів з фізики та хімії у період з 1911 по 1963 роки. Відомий авіаконструктор Хуго Юнкерс також свого часу працював професором Технічного університету в Аахені.

Професор механіки М. Іцков з Аахенського університету виступав кілька років тому на кафедрі ДММ із цікавою доповіддю, щодо чисельного моделювання біологічних об'єктів та процесів. З візитом-відповіддю та науковою доповіддю з нелінійної механіки відвідав Аахенський університет професор Г. І. Львов, завідувач кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП».

В Технічному університеті Аахена проходив також наукові стажування у 2013—2014 та 2017—2018 роках професор кафедри ДММ О. О. Ларін, нині директор Інженерно-фізичного інституту НТУ «ХП», реалізуючи свої теоретичні та експериментальні дослідження та читаючи курс лекцій для магістрантів, що продовжували освіту у Аахені згідно міжнародної програми. До університету RWTH також неодноразово прибували на переддипломну практику харківські студенти-динаміки, маючи можливість виїздити звідти задля ознайомлення і до технічних університетів Штутгарта та Магдебурга.

Досвід наукової взаємодії з технічними університетами Німеччини сприяв тому, що останніми роками вчені кафедр ДММ НТУ «ХП» стали приймати дедалі більшу участь у комплексних європейських наукових програмах та проектах: Tempus, Inco-Copernicus, Tempus SCM, Innoripes. При цьому і викладачі

кафедри (професор Г. І. Львов, доценти В. О. Федоров, В. Г. Сукіасов, О. О. Водка), і аспіранти проходили двох-трьохмісячні наукові стажування в університетах Болгарії, Латвії, Польщі.

Інтенсивна освітня та наукова взаємодія НТУ «ХПІ» по лінії кафедр ДММ, а також кафедр «Електропривід» (завідувач — професор В. Б. Клепиков), «Різання матеріалів» (професор А. І. Грабченко) та «Підйомно-транспортні машини» (професор О. В. Григоров), дала можливість в 2003 році відкрити в нашому Університеті Німецький Технічний факультет. При цьому окрема група студентів Німецького технічного факультету проходить навчання спільно із студентами фахів «Динаміка та міцність машин», «Комп'ютерна механіка», «Інтегральні технології проектування» і має можливість прямувати разом зі студентами кафедри ДММ на стажування до університетів Німеччини.

Сьогодні Україна все ще знаходиться на непростому етапі свого історичного розвитку. Повноцінна інтеграція країни у європейське цивілізаційне, і зокрема в економічне, середовище, потребує від всіх гілок влади країни і від кожного з наших громадян відповідальних та обміркованих рішень й зусиль.

Але, спираючись на досвід вже чотирьох десятиліть наукового та освітнього співробітництва кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХПІ» з технічними університетами Німеччини, можна говорити у цьому конкретному випадку про те, що європейський вектор, котрий вибрала сьогодні Україна, — це єдино вірний шлях до ефективної високопродуктивної діяльності, до кращого і надійного майбуття нашого суспільства.

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ «ПАРОВА ТУРБИНА-ФУНДАМЕНТ» МЕТОДАМИ МОДАЛЬНОГО СІНТЕЗУ ТА СУПЕРЕЛЕМЕНТНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ

*С. К. Шелковий, доцент, к.т.н.,
О.С. Степченко, к.т.н.*

Ця стаття є прикладом наукових розробок, які виконувалися на кафедрі «Динаміка та міцність машин» при постійній наявності наукових контактів з німецькими партнерами-механіками.

Зокрема наукові результати цього дослідження доповідалися доцентом С. К. Шелковим під час його планових стажувань у Магдебургському та Дрезденському технічних університетах, а також на наукових конференціях у містах Брауншвайг та Гамбург.

Далі текст статті подається мовою оригіналу цих доповідей, тобто німецькою.

S. S c h e l k o v y, Dozent Dr.-Ing., A. S t e p c h e n k o, Dr.-Ing.

**DYNAMISCHE ANALYSE DES SYSTEMS «DAMPFTURBINE-
FUNDAMENT» AUF GRUNDLAGE DES MODALSYNTHEVERFAHRENS
UND SUPERELEMENTENKONDENSATION**

Mittels der Computerrealisierung des Verfahrens der statischen Superelementkondensation wurden in [1, 2, 3] die ausführliche Berechnung der Eigenfrequenz- und Eigenformspektren sowie der dynamischen Nachgiebigkeit des Gehäuses des Niederdruckzylinders (NDZ) einer Dampfturbine realisiert. Die sogenannte „Wabenkonstruktion“ des Gehäuses wurde als räumliches Platten- und Stabsystem modelliert.

Für eine verbesserte Gehäusekonstruktion des NDZ sind senkrechte versteifende Platten in der Nähe des Lagers durch das räumliche Stabsystem ersetzt wurden, was bei Beibehaltung der Festigkeit eine Verminderung des Gewichts und eine Verbesserung der Aerodynamik des Dampfes gewährleisten soll.

Für die dynamische Analyse dieses neuen Gehäuses einer NDZ sowie für die Analyse des kompletten Systems „Dampfturbine-Fundament“ wurden Programmkomplexe auf der Grundlage des Modalsyntheseverfahrens entwickelt. Teilweise wurde auch für die Berechnung einiger Baugruppen des Systems „Dampfturbine-Fundament“ die Superelementmethode in der Form des statischen Kondensation angewendet. Bei dieser Kondensation wird die Verbindung des externen Last- und Geometrieparameter als

$$[Z]_{CV} [q]_c = \left[[Z]_{CC} - [Z]_{CB} [Z]_{BB}^{-1} [Z]_{BC} \right] [q]_c = [F]_c - [Z]_{CB} [Z]_{BB}^{-1} [F]_B \quad (1)$$

dargestellt.

In der Gln. (1) sind die indizierten Matrizen als Blöcke der gewöhnlichen FEM-Steifigkeitsmatrix definiert

$$[Z] = [K] - \omega^2 [M] = \begin{vmatrix} Z_{CC} & Z_{CB} \\ Z_{BC} & Z_{BB} \end{vmatrix} \quad (2)$$

In der Gln. (2) gehören die Indizes „C“ zu den Parametern des Superknoten, und „B“ zu den inneren Parametern. Nach der Bestimmung der Außenparameter $\{q\}_c$ der kompletten Konstruktion werden die internen verallgemeinerten Verschiebungen für jedes Superelement folgendermaßen

$$[q]_B = [Z]_{BB}^{-1} [F]_B - [Z]_{BB}^{-1} [Z]_{BC} [q]_c \quad (3)$$

dargestellt.

Im Algorithmus ist die automatische Identifizierung der Nummern der Eigenfrequenzen im Spektrum bei der Choleski-Zerlegung oder der Gaußtriangulation der dynamischen Steifigkeitsmatrizen gewährleistet.

$$M_c = M + \sum_{i=1}^T N_i M_i \quad (4)$$

$$M_c = M + \sum_{i=1}^T N_{i,j} M_{i,j} + \dots + \sum_{i=1}^{T-1} N_{s-1,j} M_{s-1,j} \quad (5)$$

Hier sind M_c - die Zahl der Eigenfrequenzen, die niedriger als die Probefrequenz ω liegen; T - die Zahl der SE-Typen des Systems; N_i - die Zahl der SE vom i -Typ; M_i - die Zahl der Eigenfrequenzen des SE vom i -Typ bei fixierten Superknotenparametern, die niedriger als ω liegen; M - die Zahl der negativen Koeffizienten auf der Diagonale der Matrix $[Z]_{\Sigma CV}$

Die Gln. (5) demonstriert dieselbe Identifizierung bei der statischen Kondensation in einem mehrstufigen Prozeß.

Das Modalsyntheseverfahren in der Variante von Craig-Bampton [] realisiert folgende Prozedur. Für die Eigenschwingungsgleichung des einzelnen Superelements

$$\begin{bmatrix} [K_{mm} & K_{bc}] \\ [K_{cb} & K_{cc}] \end{bmatrix} - p^2 \begin{bmatrix} M_{bc} & M_{cb} \\ M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x^b \\ x^c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p^e \end{Bmatrix} \quad (6)$$

wird der Koordinatenvektor $\{x^b\}$ in einen statischen und einen dynamischen Anteil zerlegt.

$$\{x^b\} = \{x_D^b\} + \{x_C^b\} \quad (7)$$

Der statische Teil des Vektors $\{x_C^b\}$ wird folgendermaßen

$$[K_{mm}]\{x_C^b\} + [K_{bc}]\{x_C^c\} = 0 \quad (8)$$

$$\{x_C^b\} = [V^c]\{x_C^c\}, \quad [V^c] = [K_{mm}]^{-1}[K_{bc}] \quad (9)$$

definiert.

Den dynamischen Teil erhalten wir in der Form:

$$\{x_D^b\} = [V^s]\{Q^s\} \quad (10)$$

S - Zahl der SE-Eigenformen,

$\{V^j\}$ - j -te Eigenform, $j = 1 \dots S$;

Q_j - neue verallgemeinerte Koordinaten, $j = 1 \dots S$.

Nach der Koordinatenzerlegung erhält man die Eigenschwingungsgleichung des Superelements als

$$[[K_{mm}] - \omega^2 [M_{mm}]]\{V^j\} = 0, \quad j = 1 \dots S \quad (11)$$

Gln. (7) wird unter Berücksichtigung von (9) und (10) als

$$\begin{Bmatrix} x^b \\ x^c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} V^S & V^C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q^S \\ x^c \end{Bmatrix} \quad (12)$$

dargestellt. Auf diese Weise erhält man

$$\begin{Bmatrix} x^b \\ x^c \end{Bmatrix} = [L] \begin{Bmatrix} Q^S \\ x^c \end{Bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} V^S & V^C \\ 0 & E \end{bmatrix} \quad (13)$$

Die Matrizen für die neuen verallgemeinerten Koordinaten lauten:

$$[K]_{CE} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix}, \quad [M]_{CE} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die Blöcke der Matrizen $[K]_{CE}$, $[M]_{CE}$ werden folgendermaßen

$$\begin{aligned} [K_{11}] &= [V^S]^T [K_{BB}] [V^S] \\ [K_{22}] &= [K_{CC}]^T - [V^C]^T [K_{BC}] [V^C] \\ [M_{11}] &= [V^S]^T [M_{BB}] [V^S] \\ [M_{12}] &= -[V^S]^T [M_{BB}] [V^C] + [V^S]^T [M_{BC}] \\ [M_{22}] &= -[V^C]^T [M_{BB}] [V^C] + [M_{CB}] [V^C] + [V^C]^T [M_{BC}] + [M_{CC}] \end{aligned} \quad (15)$$

dargestellt. Nach der Choleski-Zerlegung der SE-Ausgangsstifigkeitsmatrix

$$\begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BC} \\ K_{CB} & K_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ R & L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^T & R^T \\ 0 & L_1^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

erhalten wir

$$[K_{BB}] = [L][D][L]^T, \quad [K_{BC}] = [L][D][R]^T, \quad [K_{CB}] = [R][D][L]^T \quad (17)$$

Unter Berücksichtigung von (17) bekommt man für die Gl. (9) und für die Matrix $[K_{22}]$ aus Gl. (15) folgende Form:

$$[V^C] = [L]^{-1} [R]^T, \quad [K_{CC}] = [K_{CC}] - [R]^T [D] [R] \quad (18)$$

Die Diagonalkoeffizienten für $[K_{11}]$ und $[M_{11}]$ erhält man zu:

$$K_j^n = \{V^j\}^T [M_{BB}] \{V^j\} \omega_j^2 = M_j \omega_j^2, \quad M_j^n = M_j, \quad j=1 \dots S \quad (19)$$

Tabelle 1: Die Eigenfrequenzen eines Stabes

| Номер част. | Метод | Значения соб. частот для моделей: | | | | | Точное решен. |
|----------------|---------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| | | 2 x 2 | 2 x 3 | 2 x 4 | 2 x 5 | 2 x 10 | |
| P ₁ | МСФ x1ф | 322.0 | 317.19 | 317.17 | 317.09 | 317.9 | 318.6 |
| | МСФ x2ф | 317.4 | 317.19 | 317.17 | 317.09 | 317.9 | |
| | МСФ x3ф | 317.3 | 317.0 | 316.98 | 316.87 | 317.7 | |
| | МСФ x4ф | 317.3 | 317.0 | 316.98 | 316.87 | 317.7 | |
| | МКЭ | 317.3 | 316.9 | 316.9 | 316.89 | 316.8 | |
| P ₂ | МСФ x1ф | 322.1 | 317.21 | 317.19 | 317.09 | 317.95 | 318.6 |
| | МСФ x2ф | 317.5 | 317.21 | 317.17 | 317.09 | 317.94 | |
| | МСФ x3ф | 317.4 | 317.1 | 316.98 | 316.87 | 317.74 | |
| | МСФ x4ф | 317.4 | 317.1 | 316.98 | 316.87 | 317.7 | |
| | МКЭ | 317.3 | 316.9 | 316.9 | 316.89 | 316.8 | |
| P ₃ | МСФ x1ф | 1019.5 | 876.2 | 875.1 | 874.65 | 874.8 | 872.0 |
| | МСФ x2ф | 882.1 | 876.2 | 875.1 | 874.65 | 874.9 | |
| | МСФ x3ф | 881.6 | 875.3 | 874.15 | 873.65 | 873.8 | |
| | МСФ x4ф | 881.6 | 875.3 | 874.15 | 873.65 | 873.8 | |
| | МКЭ | 881.6 | 875.2 | 874.1 | 873.6 | 873.5 | |
| P ₄ | МСФ x1ф | 1019.5 | 876.3 | 875.2 | 874.65 | 874.85 | 872.0 |
| | МСФ x2ф | 882.2 | 876.3 | 875.1 | 874.65 | 874.9 | |
| | МСФ x3ф | 881.8 | 875.3 | 874.15 | 873.65 | 873.8 | |
| | МСФ x4ф | 881.9 | 875.3 | 874.15 | 873.65 | 873.87 | |
| | МКЭ | 881.67 | 875.2 | 874.1 | 873.6 | 873.5 | |
| P ₅ | МСФ x1ф | 1790.0 | 1765.3 | 1761.2 | 1759.4 | 1759.3 | 1711.7 |
| | МСФ x2ф | 1757.0 | 1765.3 | 1761.2 | 1759.4 | 1759.3 | |
| | МСФ x3ф | 1749.0 | 1727.1 | 1720.5 | 1717.9 | 1717.7 | |
| | МСФ x4ф | 1749.0 | 1727.1 | 1720.5 | 1717.9 | 1717.7 | |
| | МКЭ | 1749.0 | 1724.7 | 1716.5 | 1713.2 | 1712.5 | |

Таблица 3: Zahl der Freiheitsgrade für verschiedene SE-Stab-Platten-Modelle des Gehäuses

| Вид модели корпуса | Кол-во КЭ | Кол-во СЭ | Кол-во ст. св. общие | Кол-во ст. св. суперузлов |
|---|-----------|-----------|----------------------|---------------------------|
| ПЛОСКОСТНАЯ | 152 | 24 | 414 | 114 |
| ИЗГИБНО - ПЛОСКОСТНАЯ | 153 | 24 | 538 | 185 |
| ИЗГИБНО - ПЛОСКОСТНАЯ С УТОЧНЕННОЙ ОПОРОЙ ПОДШ. | 224 | 25 | 905 | 297 |

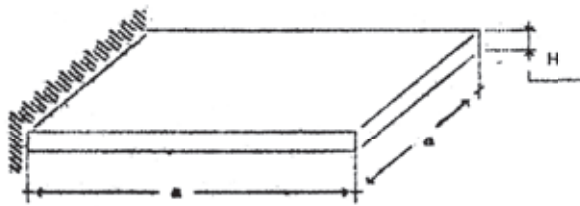
Таблица 4: Еigenfrequenzen für verschiedene SE-Stab-Platten-Modelle des Gehäuses

| Номер | Величины собственных частот | | | | | |
|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | 1-я модель (своб. поп.) | 1-я модель (своб. поп.) | 2-я модель (своб. поп.) | 3-я модель (своб. поп. вар. 1) | 3-я модель (своб. поп. вар. 2) | 3-я модель (супр. поп.) |
| | | | | | | |
| P_1^u | 100.1 | 63.0 | 60.0 | 57.1 | 51.1 | 41.8 |
| P_1^s | | | 62.7 | 59.4 | 53.5 | 44.8 |
| P_2^u | 124.3 | 65.1 | 68.7 | 71.4 | 62.7 | 59.2 |
| P_2^s | | | 73.3 | 74.3 | 64.8 | - |

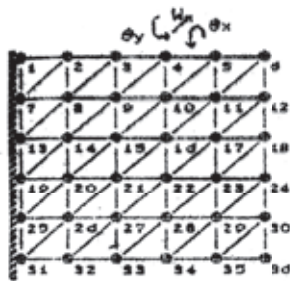
Таблица 5

| Метод расчета | М С Э | МССФ (1Ф) | МССФ (2Ф) | МССФ (3Ф) |
|--------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| ВРЕМЯ СЧЕТА (СЕК.) | 193,5 | 9,72 | 9,92 | 9,96 |

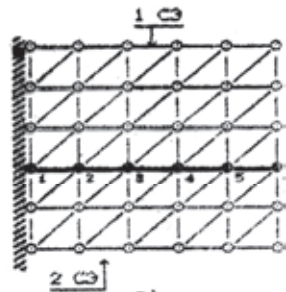
Bild 1: Die Superelement-Diskretisation einer Platten



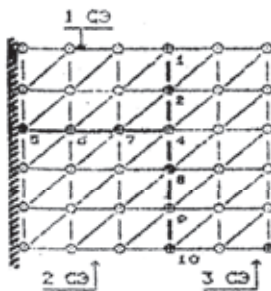
a)



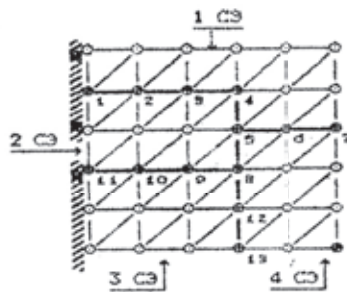
c)



b)



г)



д)

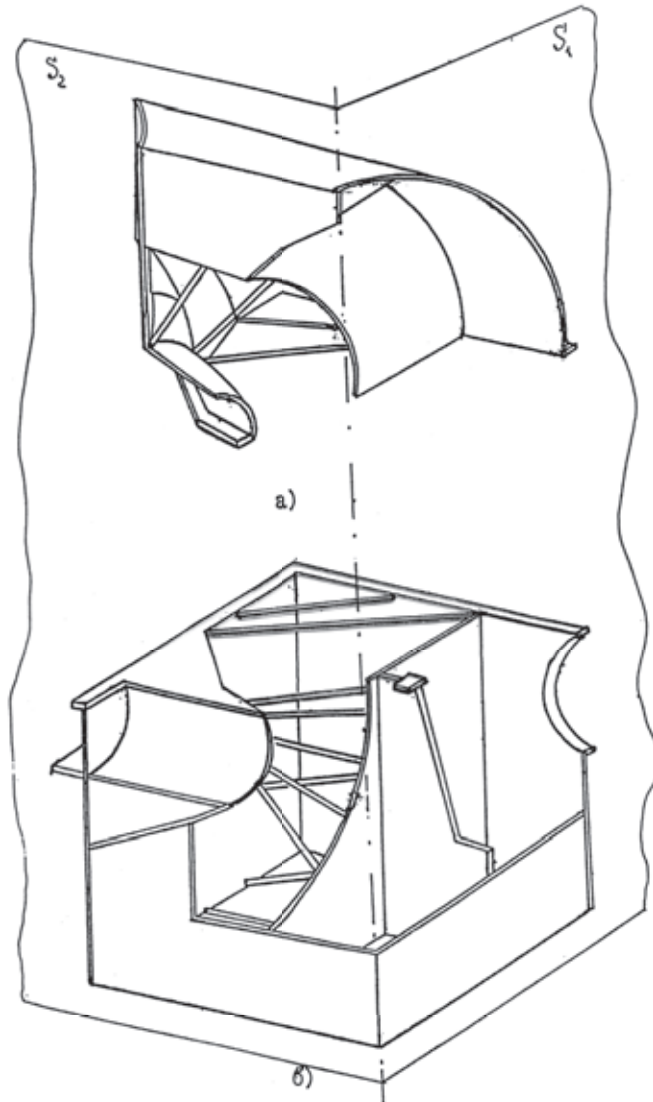


Bild 2: Das Gehäuse eines Niederdruckzylinders und der Gehäusedeckel
(1/4 der doppelt symmetrischen Konstruktion)

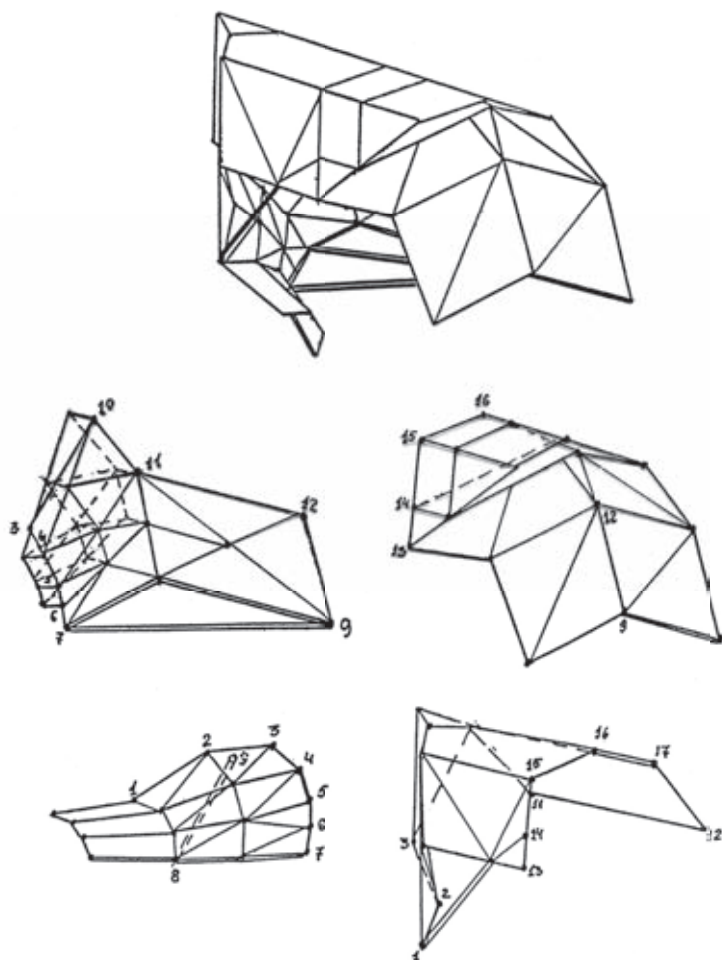


Bild 3: FE-modell eines Gehäusedeckels (1/4 der doppelt symmetrischen Konstruktion) und die Superelement-Typen

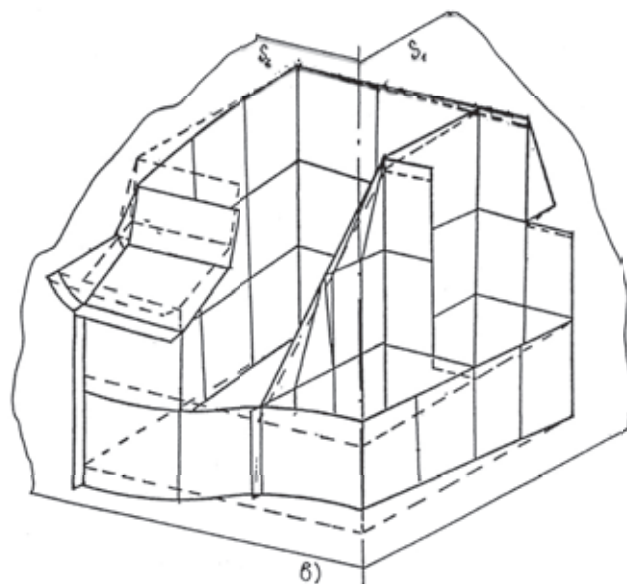
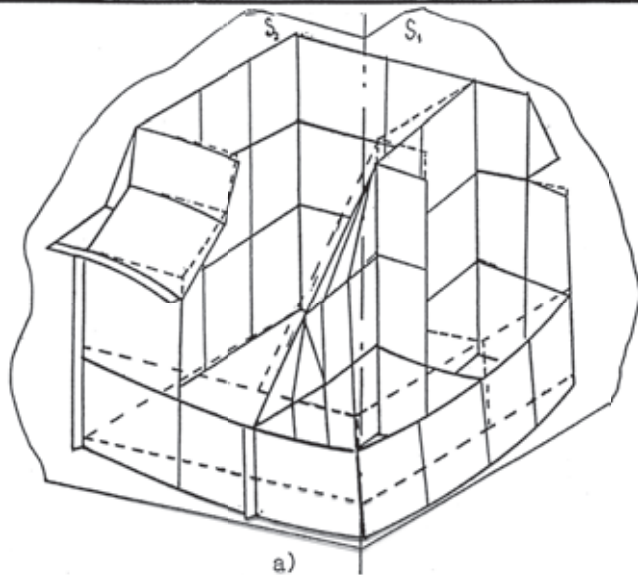


Bild 4: Eigenformen eines Gehäuses eines NDZ (ebenes Plattenmodell)

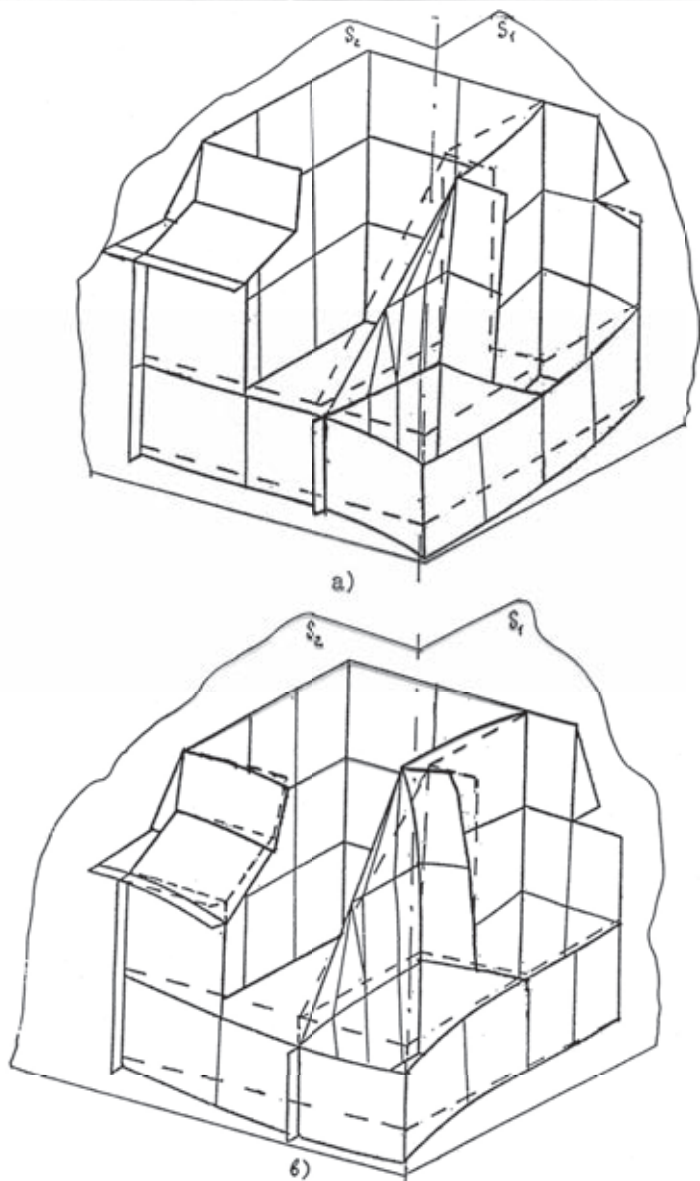


Bild 5: Eigenformen eines Gehäuses eines NDZ für das vollständige SE-Stab-Plattenmodell

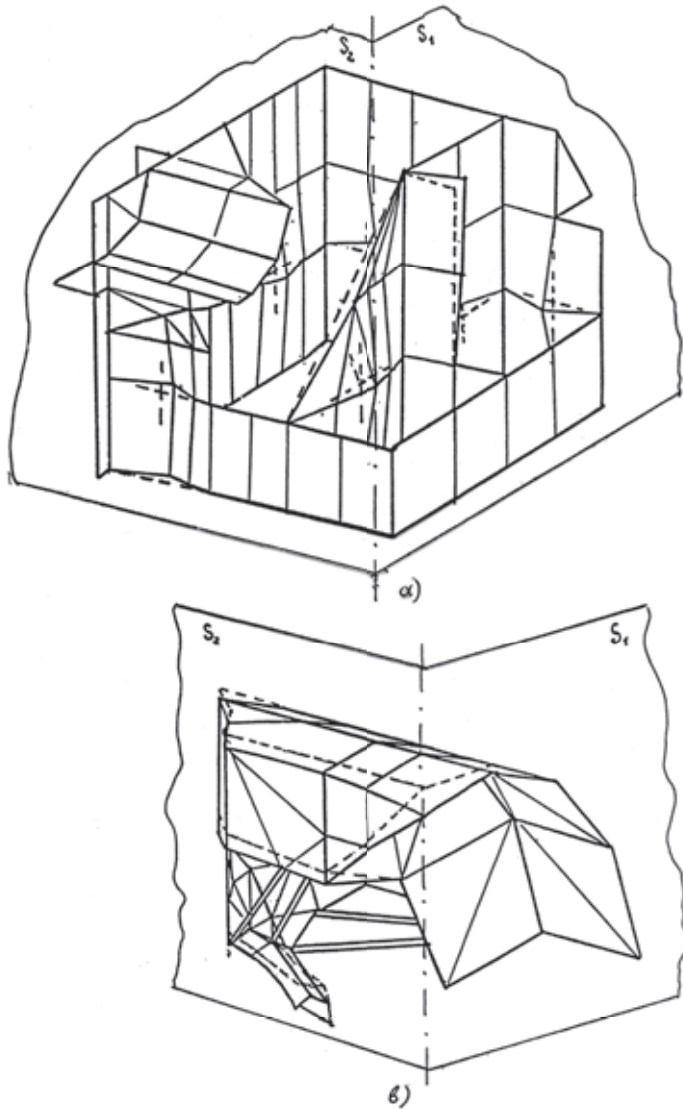


Bild 6: Eigenformen eines Gehäuses und eines Gehäusedeckels für das vollständige SE-Stab-Plattenmodell

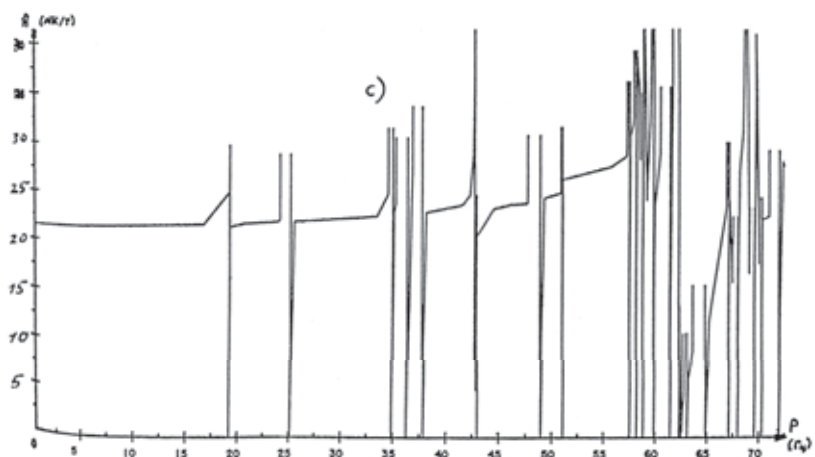
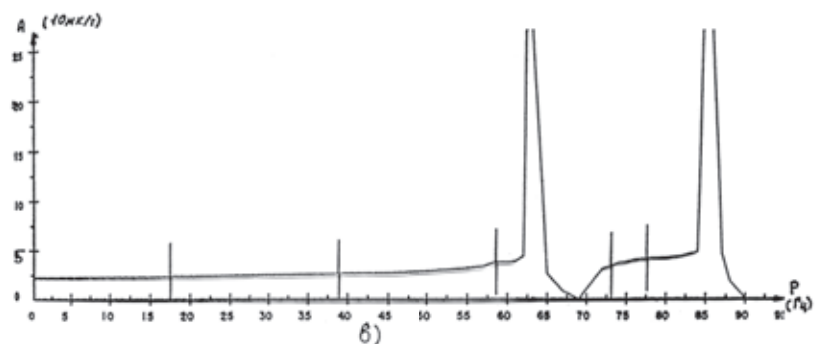
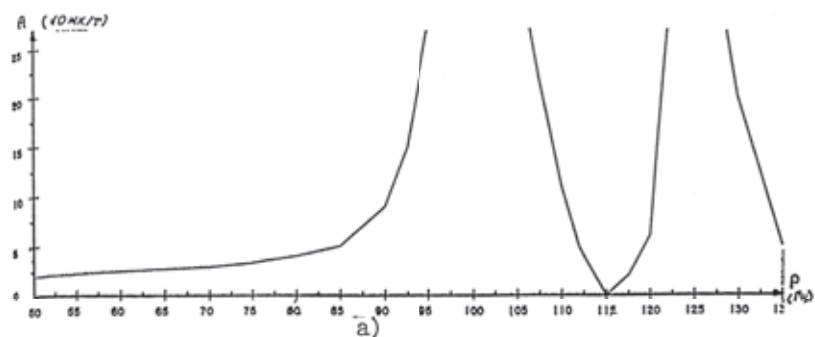


Bild 7: Amplitudenfrequenzgänge für verschiedene SE-Stab-Platten-
Modelle des Gehäuses eines NDZ

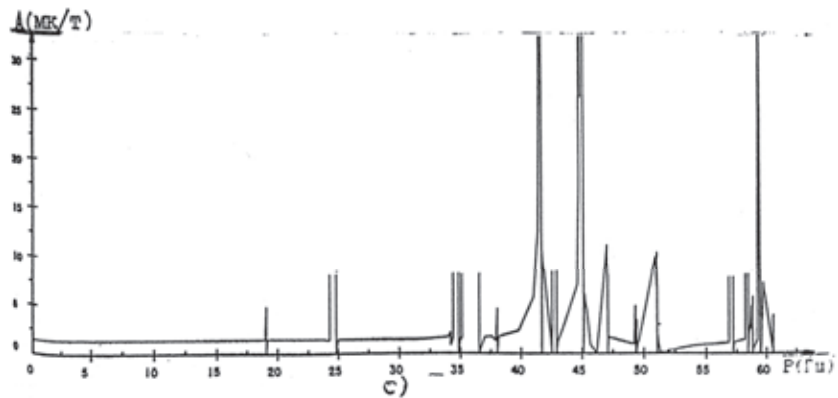
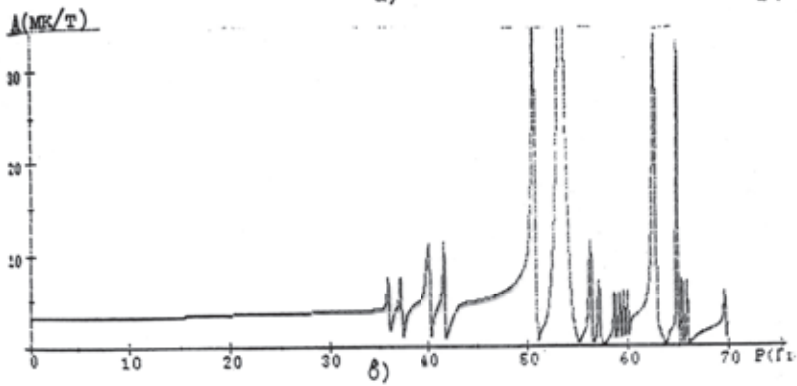
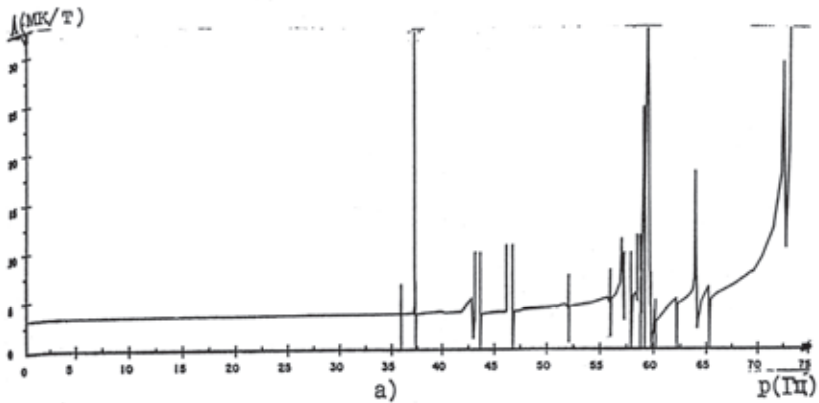


Bild 8: Amplitudenfrequenzgänge für verschiedene SE-Stab-Platten-Modelle des Gehäuses eines NDZ

Für ein System mit N Superelementen werden die Eigenschwingungsgleichungen folgendermaßen

$$\left[[K^C] - p^2 [M^C] \right] \{ Q_i^s \dots Q_N^s, x_{CV} \}^T = 0 \quad (20)$$

mit N - Zahl der Superelemente;
 x_{CV} - Koppelkoordinaten der Superelemente;
 Q_i^s - verallgemeinerte Koordinaten für das i-te Superelement.
 dargestellt. Endgültig erhalten wir für die Steifigkeits- und Massenmatrix

$$[K^C] = \begin{bmatrix} K_{11}^C & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ 0 & 0 & K_{11}^C & 0 \\ 0 & \cdot & 0 & K_{22}^C \end{bmatrix}, \quad [M^C] = \begin{bmatrix} M_{11}^C & \cdot & 0 & \\ \cdot & \cdot & 0 & M_{12}^C \\ 0 & 0 & M_{11}^C & \\ & M_{21}^C & & M_{22}^C \end{bmatrix} \quad (21)$$

Hier muß man für die Matrixblöcke K_{22}^C und M_{22}^C die bekannte Summierungsprozedur durchführen.

Die positiven Ergebnisse der numerischen Überprüfung der Genauigkeit der Modalsynthesemethode zeigen die Tabellen 1 und 2. Die Testberechnungen wurden für verschiedene Typen der Superelementdiskretisierung eines Stabes und einer Platte sowie unter Berücksichtigung der verschiedenen Zahlen der Eigenformen der Superelemente durchgeführt. Das Bild 1 zeigt Varianten der Superelementdiskretisierung einer Platte bei diesen Berechnungen.

In den Bildern 2 und 3 sind das Gehäuse des verbesserten NDZ und der Gehäusedeckel sowie die Superelementtypen dieses Deckels dargestellt.

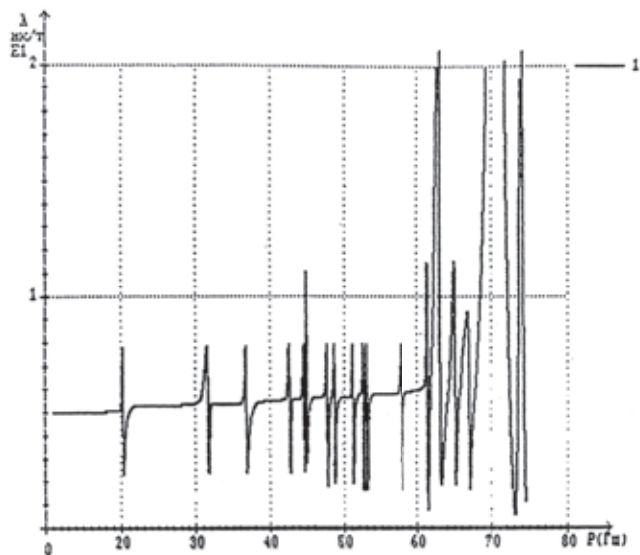
Es wurden drei Modelle des Gehäuses des NDZ betrachtet:

- 1) ein Modell der ebenen Plattenschwingung (Plattenmodell)
- 2) ein Scheiben-Plattenmodell
- 3) ein Scheiben-Plattenmodell mit präziser FE-Modellierung der Stützen der Lager.

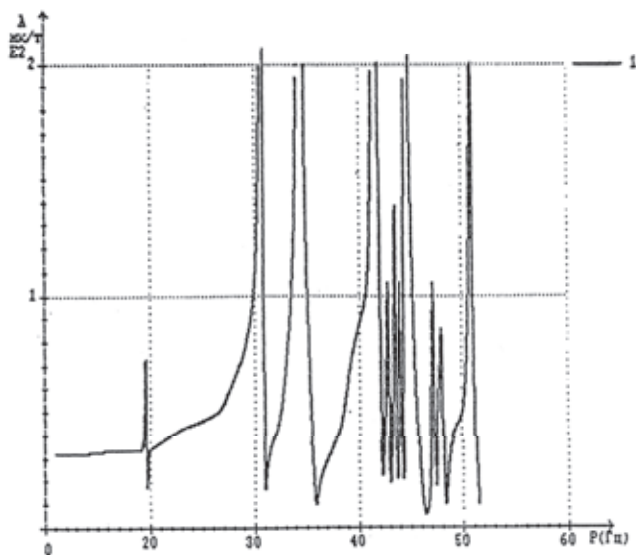
In den Varianten 1) und 2) wurde die Stütze des Lagers als ein räumliches System aus starren Stäben und Platten modelliert. Für alle drei Modelle wurden der Deckel, der Kondensator und das Innengehäuse als diskrete Massen berücksichtigt. Die Amplitudenfrequenzgänge in den Bildern 7, 8 wurden für Rotorunwuchten für einen Punkt auf den Stützen des Lagers für folgende Modelle berechnet:

- Bild 7a: Modell 1) bei gelenkiger Lagerung aller Konsolen des NDZ;
- Bild 7b: Modell 1) bei Einspannung aller Konsolen des NDZ;
- Bild 7c: Modell 2) bei gelenkiger Lagerung aller Konsolen des NDZ;
- Bild 8a: Modell 3) bei gelenkiger Lagerung aller Konsolen des NDZ;
- Bild 8b: Modell 3) bei gelenkiger Lagerung von 2 Konsolen des NDZ;
- Bild 8c: Modell 3) unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Fundaments für die Randbedingungen der Konsolen.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Eigenfrequenzen und der Eigenformen sind in der Tabelle 4 und in den Bildern 4 - 6 dargestellt. Für das Modell 1) wurden die globalen „Plattenfrequenzen“ p_1, p_2 erhalten, die analog zu den entsprechenden Eigenfrequenzen des „Wabenmodells“ sind (Bild 4a, b).



a)



b)

Bild 9: Amplitudenfrequenzgänge für SE-Modelle des Gehäusedeckels

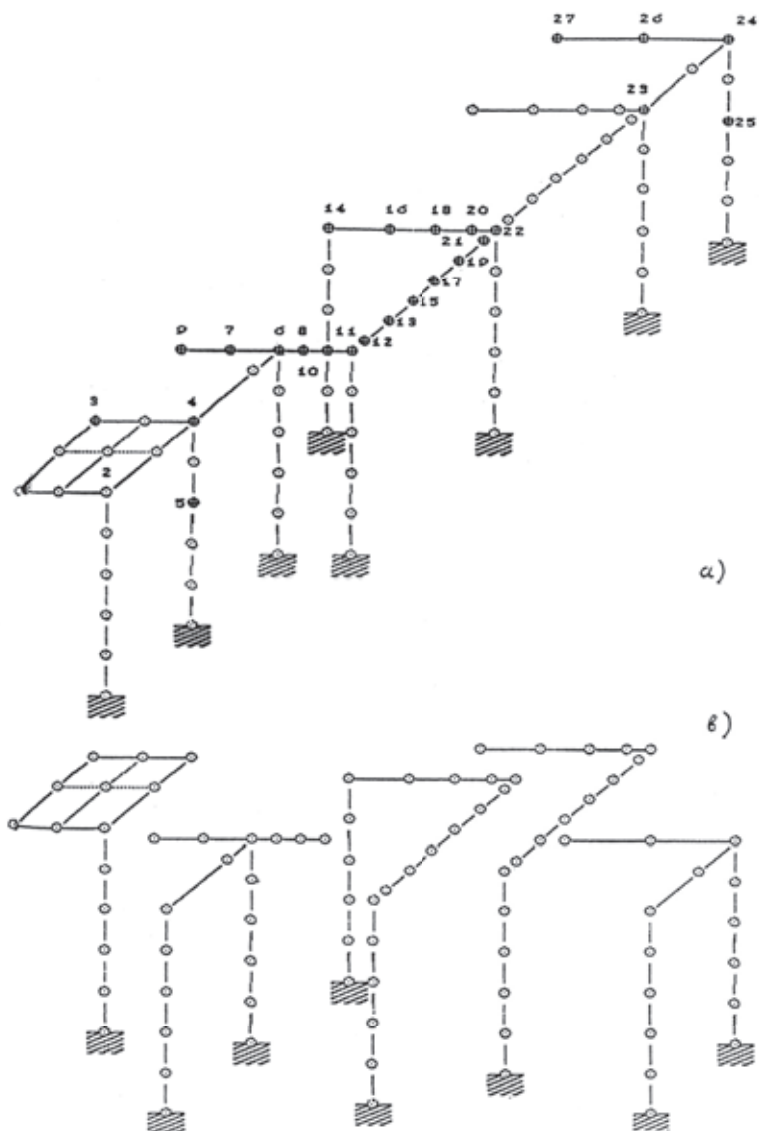
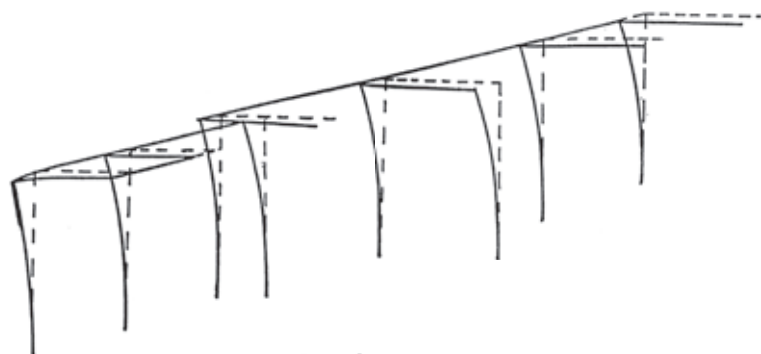
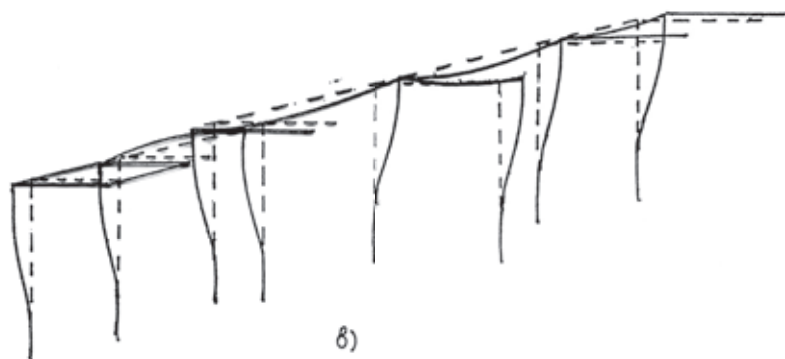


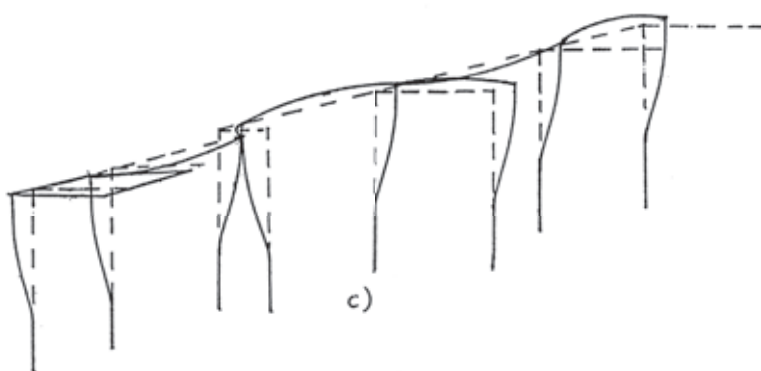
Bild 10: SE-Stabmodell des Fundaments einer Dampfturbine (1/2 der symmetrischen Konstruktion) und Superelement-Typen



a)



b)



c)

Bild 11: Eigenformen des Fundaments einer Dampfturbine

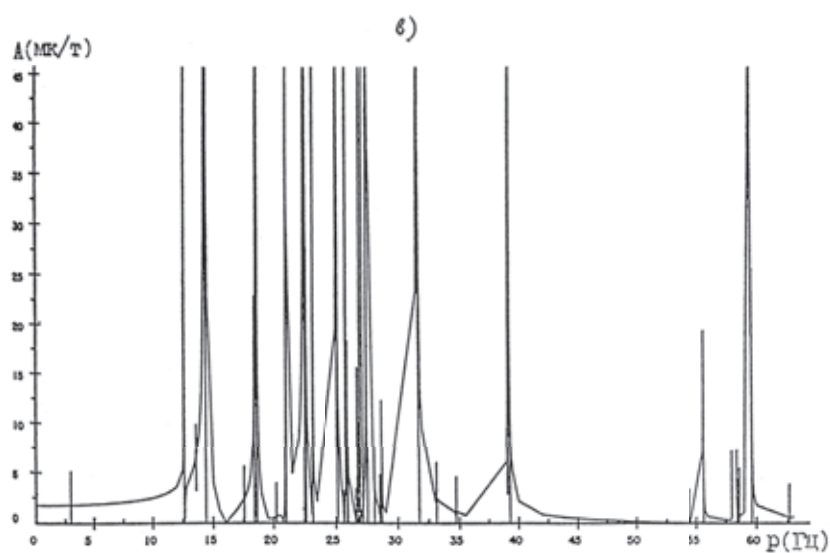
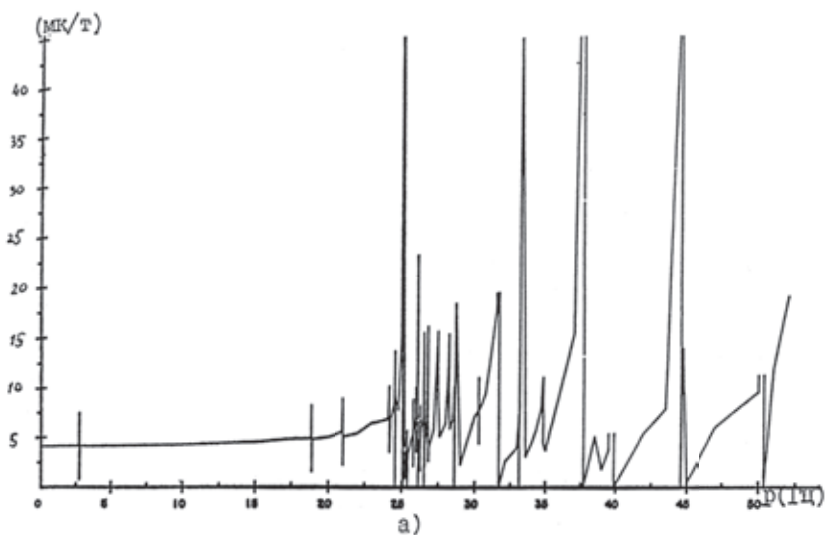


Bild 12: Amplitudenfrequenzgänge für SE-Stab-Modelle des Fundaments einer Turbine

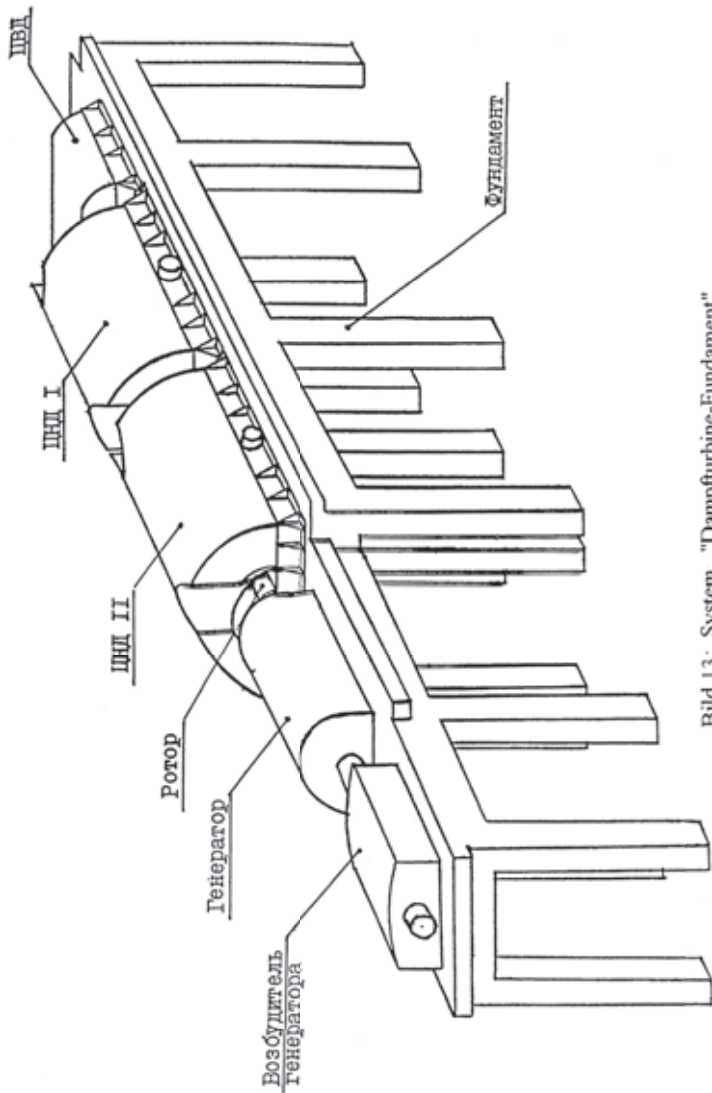


Bild 13: System "Dampfturbine-Fundament"

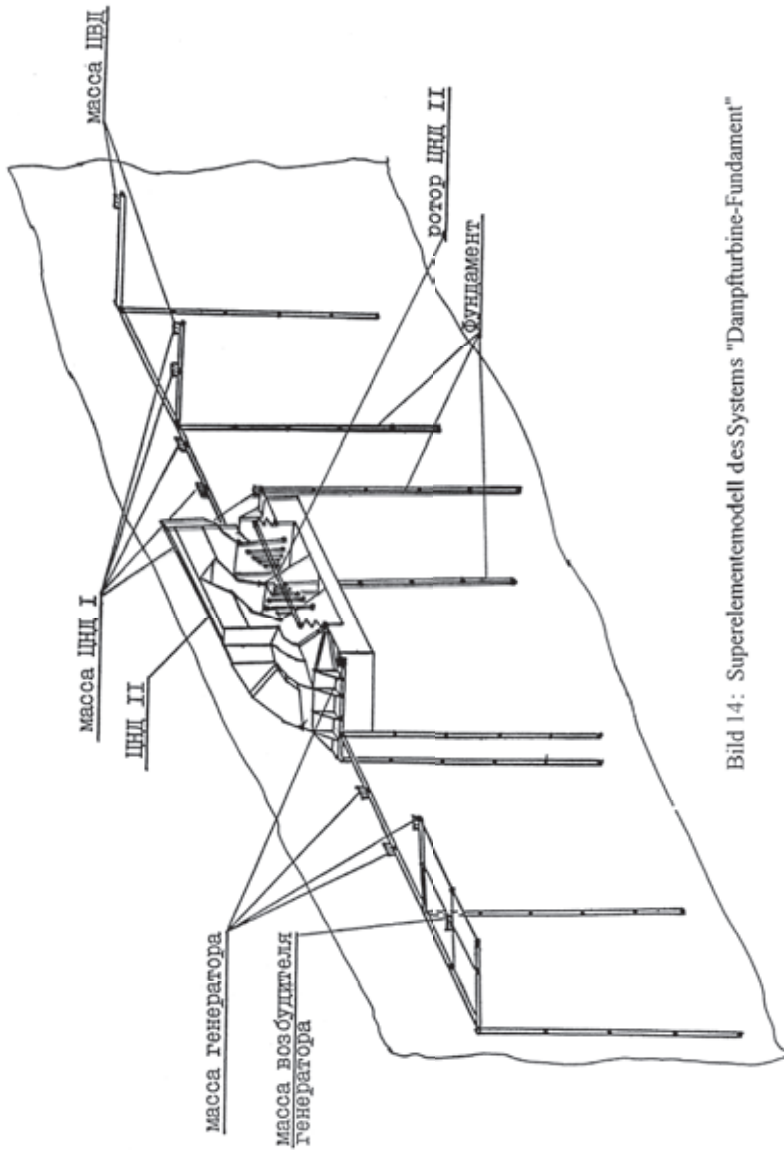


Bild 14: Superelementmodell des Systems "Dampfmaschine-Fundament"

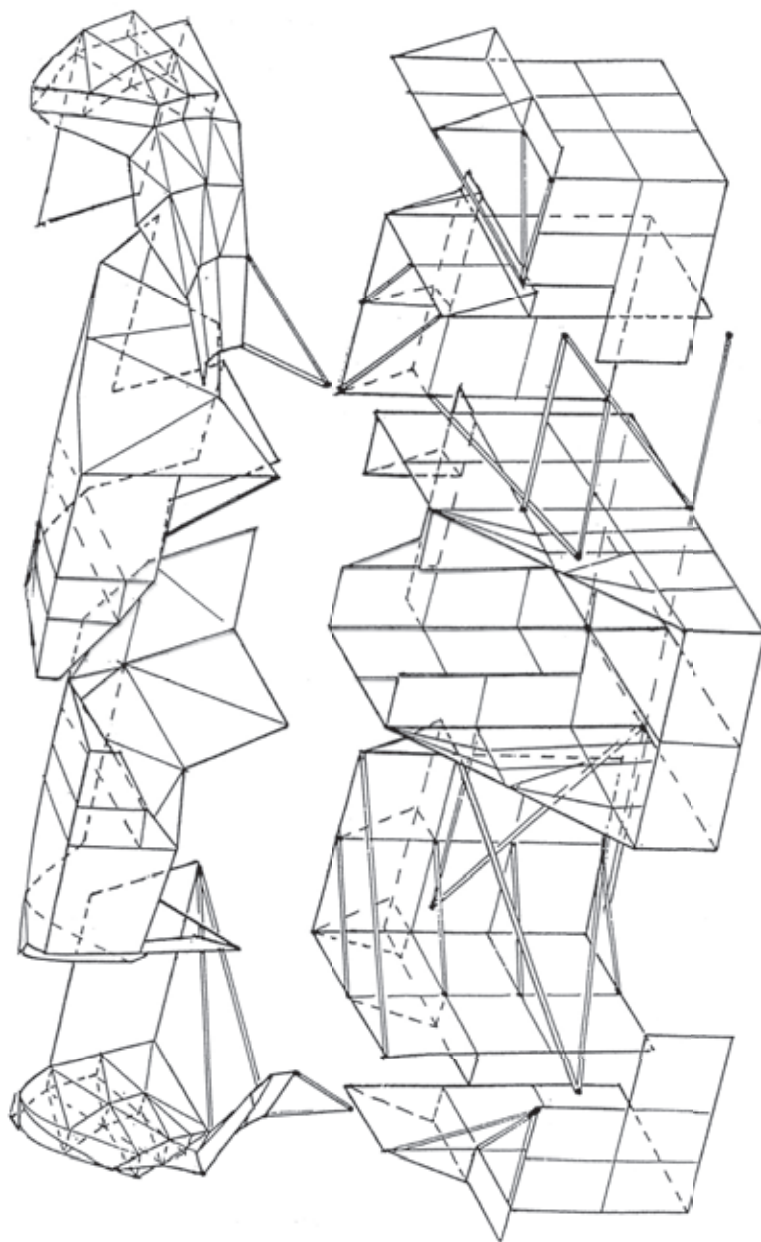


Bild 15: Superelement-Typen des Gehäuses und des Gehäusedeckels
(1/2 der symmetrischen Konstruktion) für Berechnung des Systems
"Dampfturbine-Fundament"

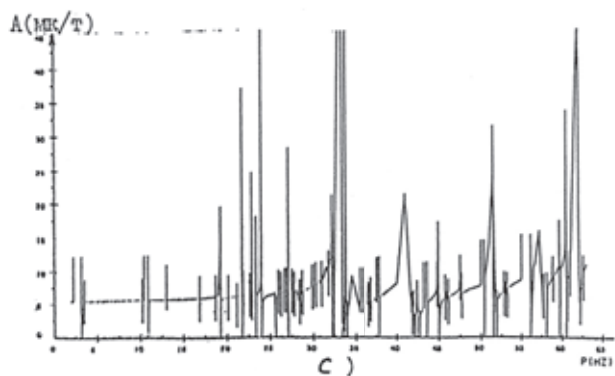
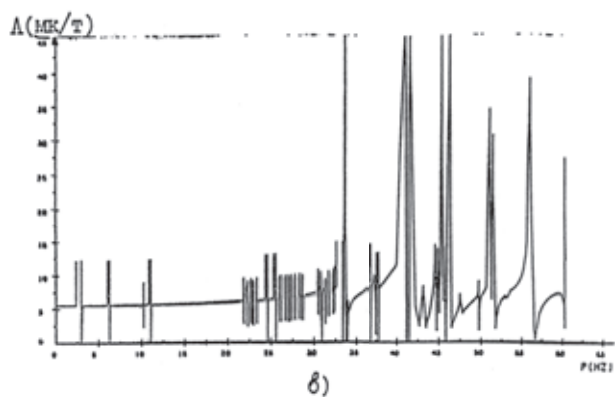
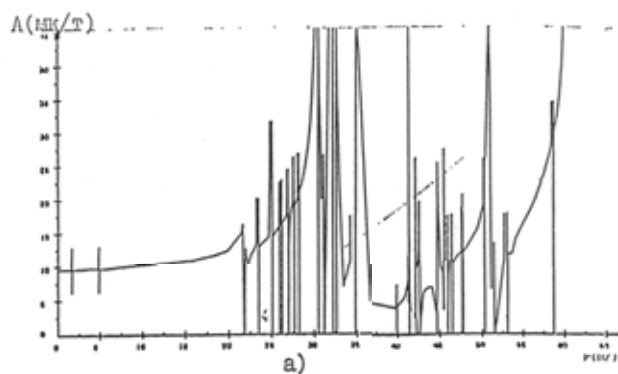


Bild 16: Amplitudenfrequenzgänge für SE-Modell "Dampfturbine-Fundament"

Für das Modell 2) existieren im selben Frequenzbereich 2 Paare von Eigenfrequenzen p_1^a , p_1^b und p_2^a , p_2^b . Die Eigenformen von beiden Paaren entsprechen den Eigenformen für p_1 und p_2 . Der Unterschied besteht darin, daß die Richtung der Biegeverschiebung der zentralen Stützplatte des Lagers für p_1^a und p_1^b entgegengesetzt ist (Bild 5a, b).

Auf diese Weise erhält man hier die sogenannte „Aufspaltung“ der „Plattenfrequenzen“ im Spektrum des kompletten Scheiben-Platten-Modells des Gehäuses des NDZ.

Das Bild 6a zeigt eine typische Scheibeneigenform. Die entsprechenden Scheibeneigenfrequenzen kann man als zahlreiche schmale Spitzen der Amplitudenfrequenzgänge in den Bildern 7b, c und 8a, b, c erkennen.

Die Amplitudenfrequenzgänge für das Deckelmodell wurden bei Einspannung (Bild 9a) und bei gelenkiger Lagerung (Bild 9b) am Übergang zum Gehäuse erhalten.

Das Bild 6a zeigt die niedrigste Eigenform des Deckels. Die Berechnungen der Eigenfrequenzen zeigen, daß die Nachgiebigkeit des Deckels wesentlich größer ist als die Nachgiebigkeit des Gehäuses.

Es wurde ein Vergleich der Effektivität des Modalsyntheseverfahrens (MSV) und der SE-Kondensation bei der Berechnung der Eigenfrequenzen und der erzwungenen Schwingungen des Turbinenfundaments durchgeführt. Das Bild 10 zeigt das SE-Stabmodell des Fundaments einer Dampfturbine und die Superelement-Typen dieses Modells. In der Tabelle 6 findet man die Eigenfrequenzen des Fundaments für verschiedene Berechnungsvarianten. Man kann eine wesentliche Verminderung der Rechenzeiten für das MSV im Vergleich mit der SE-

Kondensation und eine gute Genauigkeit des MSV unter Berücksichtigung der geringen Zahl der SE-Eigenform (1,2 und 3 Eigenformen für jedes SE in der Tabelle 6) konstatieren. Das Bild 11 zeigt die niedrigste Fundamenteigenform mit globalen Achsverschiebungen (Bild 11a) und zwei Eigenformen mit überwiegend Biegeverschiebungen der Stäbe des Fundamentmodells (Bild 11 b,c).

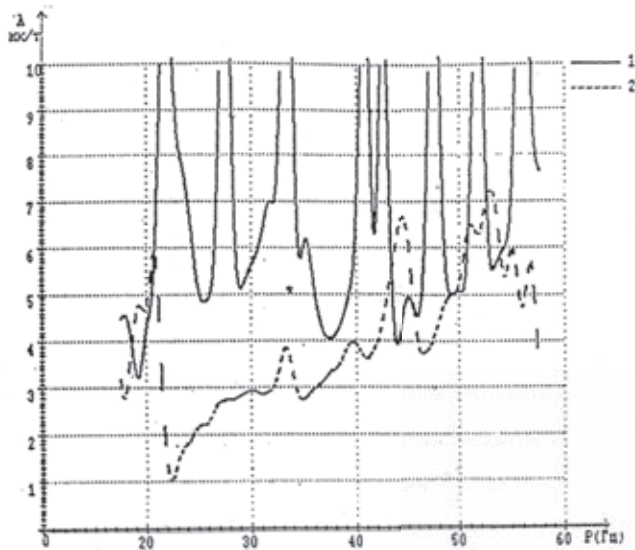
Das Bild 12 zeigt die Amplitudenfrequenzgänge für einzelne SE-Stabmodelle des Fundaments (Bild 12 a) und für das Modell des Fundaments unter Berücksichtigung der diskreten Massen der Turbinenbauteile (Bild 12 b). Im letzten Fall (erste Stufe der Modellierung des Systems „Dampfturbine-Fundament“) hat die komplette Konstruktion keine Resonanzen im Arbeitsbereich um 50 Hz.

Es wurden Berechnungen der Eigenfrequenzen und -formen sowie der erzwungenen Schwingungen für verschiedene Modelle des Systems „Dampfturbine-Fundament“ durchgeführt. Die Bilder 13 und 14 zeigen ein Schema und ein SE-Modell dieses Systems. Im Bild 15 sind die Superelementtypen für die Analyse dieses Systems dargestellt.

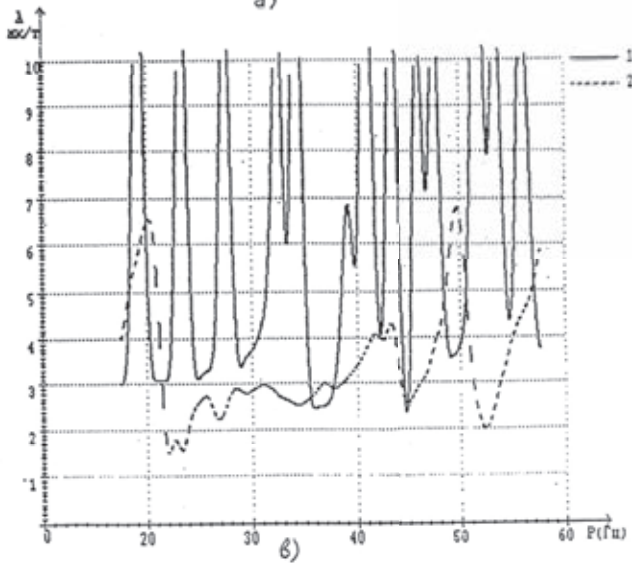
Für die Untersuchung des Einflusses der einzelnen Bauteile auf die Systemdynamik wurde die Berechnung des Systems mit Hilfe folgender Modelle realisiert:

- 1) Fundament;
- 2) Fundament - Gehäuse des NDZ;
- 3) Fundament - Gehäuse des NDZ - Deckel des Gehäuses;
- 4) Fundament - Gehäuse des NDZ - Deckel - diskrete Massen des Generators, des Generatorerregers und des Hochdruckzylinders;
- 5) Fundament - diskrete Massen der gesamten Ausrüstung der Turbine.

Die Bilder 16 a, b, c zeigen die Amplitudenfrequenzgänge für die Modelle 2), 3) und 4). Die entsprechenden Ergebnisse für die Modelle 1) und 5) wurden bereits in den Bildern 12 a, b dargestellt. Der Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge für die Berechnung des kompletten Systems (Bild 17 a,b, Kurve 1) mit experimentellen Ergebnissen an der realen Turbine (Bild 17 a, b, Kurve 2) für zwei verschiedene Punkte auf den Stützlagern demonstriert die qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse.



a)



b)

Bild 17: Amplitudenfrequenzgänge für SE-Modell "Dampfturbine-Fundament"

ЗМІСТ

До сімдесятиріччя професора Фолькера Ульбріхта.....3

Сорок років наукового та освітнього співробітництва
кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП»
з технічними університетами Німеччини.....9

Динамічний аналіз системи «парова турбіна-фундамент»
методами модального синтезу
та суперелементної конденсації20

Наукове видання

ШЕЛКОВИЙ
Сергій Костянтинович

**Сорок років
наукової співпраці НТУ «ХП»
з університетами Німеччини
в галузі технічної механіки
збірник статей**

(українською та німецькою мовами)

ISBN 617-7618-25-5



9 786177 618255

Відповідальний за випуск

С. К. Шелковий

Редакція авторська

Комп'ютерна верстка

О. А. Мірошниченко

Підписано до друку 17.06.2019.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Умов. друк. арк. 2,79. Зам. № МО-24/19
Наклад 150 прим.

Видання і друк: ФОП Мірошніченко О. А.
61002, м. Харків, вул. Дарвіна, 16, кв. 25
Тел.: (050) 303-22-85
ел. пошта: merash@i.ua

ДЛЯ ПОДАТОК