

# Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| Предисловие.....  | 6         |
| Введение.....   | 7         |
| <b>Часть I. Исследование статических и динамических характеристик преобразователей напряжения понижающего типа.....</b> | <b>22</b> |
| <b>1. ИПН понижающего типа без ООС.....</b>   | <b>22</b> |
| 1.1. Анализ переходных и установившихся процессов в импульсных преобразователях напряжения.....                         | 23        |
| 1.1.1. Аперiodический режим.....  | 28        |
| 1.1.2. Граничный режим.....   | 30        |
| 1.1.3. Колебательный режим.....   | 32        |
| 1.2. Исследование усредненной составляющей тока дросселя и выходного напряжения.....                                    | 34        |
| 1.3. Исследование пульсаций тока дросселя и выходного напряжения.....   | 37        |
| 1.4. Режим прерывистого тока дросселя.....  | 46        |
| 1.5. Выводы.....  | 49        |
| <b>2. Импульсные преобразователи напряжения понижающего типа с ООС.....</b>   | <b>51</b> |
| 2.1. ИПН с ООС по выходному напряжению.....   | 57        |
| 2.2. ИПН с ООС по выходному напряжению и току дросселя.....   | 59        |
| 2.3. ИПН с ООС по выходному напряжению и току конденсатора.....   | 61        |
| 2.4. Выводы.....  | 63        |
| <b>3. Линейные методы расчета частотных характеристик ИПН понижающего типа с ООС.....</b>                               | <b>64</b> |
| 3.1. Метод усреднения и линеаризации.....   | 67        |
| 3.2. Метод эквивалентной замены импульсной части ИПН.....   | 73        |
| 3.3. Выводы.....  | 78        |
| <b>4. Методы расчета и измерения коэффициента передачи петлевого усиления ИПН понижающего типа с ООС.....</b>           | <b>79</b> |
| 4.1. Измерение петлевого усиления в ИПН методом разомкнутого контура.....   | 79        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1.1. Измерение в линейной модели .....  | 79         |
| 4.1.2. Модифицированная модель измерения .....  | 86         |
| 4.1.3. Измерение в импульсной модели .....  | 88         |
| 4.2. Измерение петлевого усиления в ИПН методом замкнутого контура .....  | 101        |
| 4.2.1. Измерение в линейной модели .....  | 101        |
| 4.2.2. Измерение в импульсной модели .....  | 104        |
| 4.2.3. Измерение физического макета .....   | 111        |
| 4.2.4. Измерение через внешние характеристики .....   | 114        |
| 4.2.5. Метод двойной инжекции с обнулением .....  | 117        |
| 4.2.6. Метод последовательной инжекции напряжения и тока .....  | 118        |
| 4.2.7. Метод Тиана .....  | 121        |
| 4.2.8. Модифицированный метод последовательной инжекции напряжения и тока .....   | 124        |
| 4.3. Измерение петлевого усиления в ИПН с двухконтурной ООС .....   | 125        |
| 4.4. Новые бестрансформаторные методы прямого измерения петлевого усиления ИПН .....  | 136        |
| 4.4.1. Метод инжекции тока .....  | 136        |
| 4.4.2. Бестрансформаторная инжекция напряжения .....  | 140        |
| 4.5. Выводы .....   | 146        |
| <b>5. Оценка погрешности метода усреднения и линеаризации для импульсного преобразователя напряжения понижающего типа .....</b>                               | <b>148</b> |
| 5.1. ИПН с одноконтурной ООС .....  | 148        |
| 5.2. ИПН с двухконтурной ООС .....  | 161        |
| 5.3. Выводы .....   | 170        |
| <b>6. Влияние пульсаций выходного напряжения ИПН понижающего типа на коэффициент стабилизации выходного напряжения и устойчивость ИПН .....</b>               | <b>172</b> |
| 6.1. Коэффициент передачи ШИМ-модулятора без учета пульсаций выходного напряжения .....   | 175        |
| 6.2. Коэффициент передачи ШИМ-модулятора с учетом пульсаций выходного напряжения .....  | 176        |
| 6.3. Исследование влияния резистивных потерь в конденсаторе СФ с характеристиками Чебышева и Баттерворта на устойчивость и коэффициент стабилизации ИПН ..... | 180        |
| 6.4. Инженерная методика расчета коэффициента стабилизации ИПН .....  | 184        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.5. Коэффициент передачи ШИМ-модулятора в ИПН с ООС по выходному напряжению и току дросселя . . . . .                                    | 188        |
| 6.6. Коэффициент передачи ШИМ-модулятора в ИПН с ООС по выходному напряжению и току конденсатора  | 190        |
| 6.7. Выводы . . . . .   | 193        |
| <b>7. Методика проектирования ИПН понижающего типа с однозвенным сглаживающим фильтром . . . . .</b>                                      | <b>194</b> |
| 7.1. Расчет сглаживающего фильтра . . . . .   | 194        |
| 7.2. Расчет цепи коррекции в ИПН с ООС по выходному напряжению . . . . .  | 196        |
| 7.2.1. Инерционное звено (тип 1) . . . . .  | 200        |
| 7.2.2. Пропорционально-инерционное (ПИ) звено (тип 2) . . . . .   | 210        |
| 7.2.3. Пропорциональное интегро-дифференцирующее (ПИД) звено (тип 3) . . . . .  | 221        |
| 7.2.4. Синтез звена коррекции для получения требуемого коэффициента передачи петлевого усиления . . . . .                                 | 230        |
| 7.3. Расчет цепи коррекции в ИПН с ООС по выходному напряжению и току дросселя . . . . .  | 232        |
| 7.3.1. Коррекция в контуре по выходному напряжению (управление по максимальному току дросселя) . . . . .                                  | 246        |
| 7.3.2. Коррекция в контуре по выходному напряжению и контуре по току дросселя (управление по среднему току дросселя) . . . . .            | 256        |
| 7.4. Расчет цепи коррекции в ИПН с ООС по выходному напряжению и току конденсатора . . . . .  | 268        |
| 7.4.1. Коррекция в контуре по выходному напряжению . . . . .  | 273        |
| 7.4.2. Коррекция в контуре по выходному напряжению и контуре по току конденсатора . . . . .   | 277        |
| 7.5. Выводы . . . . .   | 283        |
| <b>Часть II. Исследование распределенной системы электропитания . . . . .</b>   | <b>286</b> |
| <b>8. Работа фильтра на ИПН . . . . .</b>   | <b>286</b> |
| 8.1. Расчет входного сопротивления преобразователя . . . . .  | 290        |
| 8.2. Условия возникновения автоколебаний . . . . .  | 291        |
| 8.2.1. ИПН с однозначной ВАХ . . . . .  | 292        |
| 8.2.2. ИПН с двузначной ВАХ . . . . .   | 297        |
| 8.3. Измерение входного сопротивления преобразователя . . . . .   | 298        |
| 8.4. Экспериментальная проверка частотного критерия устойчивости и режимов генерации системы «входной фильтр — преобразователь» . . . . . | 299        |
| 8.4.1. Описание макета . . . . .  | 300        |
| 8.4.2. Анализ результатов измерения . . . . .   | 302        |

|  |            |
|--|------------|
| 8.5. Расчет входного сопротивления ИПН понижающего типа с различными контурами ООС и звеньями коррекции .....                | 309        |
| 8.5.1. ИПН с ООС по выходному напряжению .....   | 309        |
| 8.5.2. ИПН с ООС по выходному напряжению и току дросселя .....   | 316        |
| 8.5.3. ИПН с ООС по выходному напряжению и току конденсатора .....   | 327        |
| 8.6. Выводы .....  | 332        |
| <b>9. Расчет сетевых фильтров радиопомех для импульсных источников электропитания .....</b>                                  | <b>335</b> |
| 9.1. Методика расчета сетевых ФРП для ИПН .....  | 335        |
| 9.1.1. Методика расчета фильтра радиопомех .....   | 338        |
| 9.1.2. Моделирование фильтра на ЭВМ .....  | 341        |
| 9.1.3. Расчет и моделирование сетевого фильтра радиопомех для источника бесперебойного питания .....                         | 343        |
| 9.1.4. Результаты экспериментальных исследований макета ФРП .....  | 350        |
| 9.1.5. Специфика расчета сетевых ФРП с учетом обеспечения устойчивой работы системы «входной фильтр — преобразователь» ..... | 354        |
| 9.2. Расчет входного фильтра с требуемым подавлением и выходным сопротивлением .....   | 354        |
| 9.2.1. Однозвенный фильтр .....  | 355        |
| 9.2.2. Двухзвенный фильтр .....  | 359        |
| 9.3. Методы снижения тока утечки в ФРП .....   | 377        |
| 9.3.1. Пассивный способ компенсации для однофазной сети .....  | 378        |
| 9.3.2. Активный способ компенсации для трехфазной сети с изолированной нейтралью .....                                       | 393        |
| 9.3.3. Пассивный способ компенсации для трехфазной сети с изолированной нейтралью .....                                      | 395        |
| 9.3.3. Защита обслуживающего персонала от токов утечки в трехфазной сети с изолированной нейтралью .....                     | 395        |
| 9.4. Выводы .....  | 400        |
| <b>10. Работа ИПН на комплексную нагрузку .....</b>  | <b>403</b> |
| 10.1. Расчет и измерение выходного сопротивления преобразователя .....   | 405        |
| 10.2. Условия возникновения автоколебаний .....  | 406        |
| 10.3. Расчет выходного сопротивления ИПН понижающего типа с различными контурами ООС и звеньями коррекции .....              | 418        |

|   |            |
|---|------------|
| 10.3.1. ИПН с ООС по выходному напряжению .....   | 419        |
| 10.3.2. ИПН с ООС по выходному напряжению и току дросселя .....                           | 424        |
| 10.3.3. ИПН с ООС по выходному напряжению и току конденсатора .....                       | 432        |
| 10.4. Петлевое усиление ИПН, работающего на комплексную нагрузку .....                    | 439        |
| 10.5. Выводы .....  | 446        |
| <b>11. Работа ИПН на ИПН .....</b>  | <b>448</b> |
| 11.1. Устойчивость с учетом промежуточных фильтров .....                                  | 449        |
| 11.1.1. Режим малого сигнала .....  | 451        |
| 11.1.2. Режим большого сигнала .....  | 460        |
| 11.2. Особенность работы ИПН на ИПН .....   | 465        |
| 11.3. Выводы .....  | 468        |
| <b>Приложения .....</b>   | <b>470</b> |
| П1. Элементы теории четырехполюсников .....   | 470        |
| П1.1. Уравнения передачи и матрицы параметров четырехполюсников .....                     | 470        |
| П1.2. Связь матрицы А-параметров с внешними характеристиками четырехполюсника .....       | 472        |
| П1.3. Параметры простейших четырехполюсников .....  | 473        |
| П1.4. Соединения четырехполюсников .....  | 473        |
| П2. Расчет частотных характеристик ИПН в программах схемотехнического моделирования ..... | 476        |
| П2.1. Micro-CAP .....   | 477        |
| П2.2. LTspice .....   | 487        |
| П2.3. SimOne .....  | 491        |
| П2.4. SIMetrix/SIMPLIS .....  | 498        |
| П2.5. FASTMEAN .....  | 502        |
| П2.6. Выводы .....  | 506        |
| П3. Измерители частотных характеристик ИПН .....  | 507        |
| П3.1. Venable Instruments .....   | 508        |
| П3.2. NF Corporation .....  | 511        |
| П3.3. Newtons4th Ltd .....  | 512        |
| П3.4. Powertek .....  | 513        |
| П3.5. Solartron Analytical .....  | 513        |
| П3.6. AP Instruments .....  | 514        |
| П3.7. OMICRON Lab .....   | 510        |
| П3.8. Отечественный ИЧХ .....   | 515        |
| П3.9. Отечественный измерительный комплекс .....  | 518        |
| <b>Литература .....</b>   | <b>524</b> |