

6
А-25

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

П. ТРЕГНЕР
аспирант

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИОННОЙ ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
И НАПРЯЖЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград
1966

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

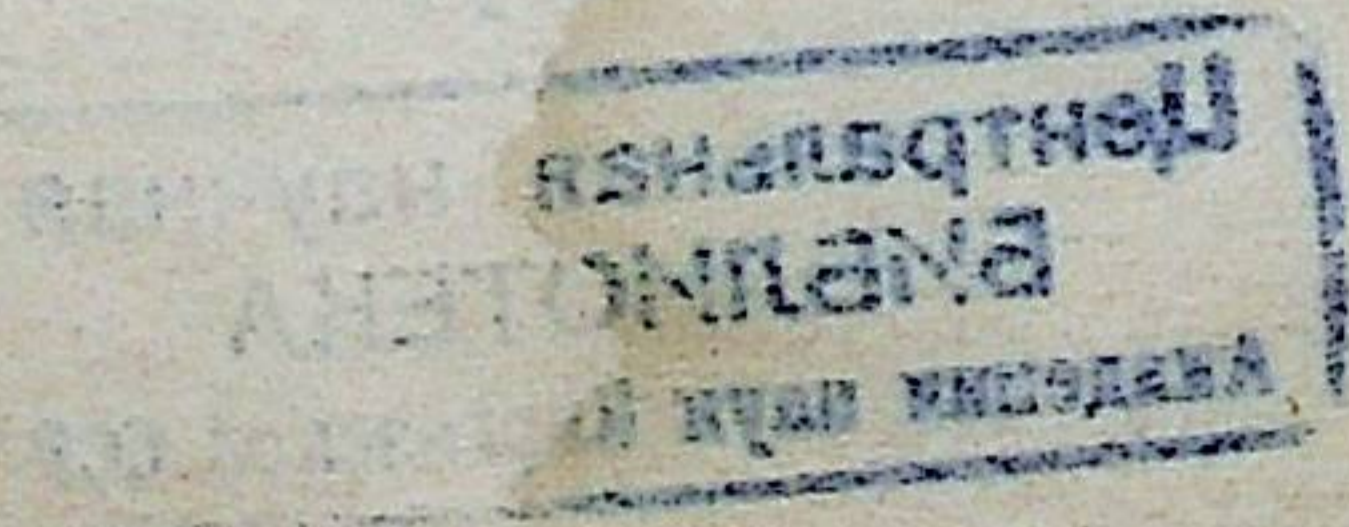
П. ТРЕГНЕР
аспирант

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИОННОЙ ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
И НАПРЯЖЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
д. т. н., профессор А. В. Фремке



Ленинград
1966

Введение

Для телеизмерения переменного тока и напряжения в энергетических системах и промышленных предприятиях при сравнительно небольших расстояниях получили применение токовые системы. Для передачи информации контролируемые электрические параметры преобразуются в унифицированный сигнал постоянного тока. При используемых в СССР с 1949 г. выпрямительных системах для телеизмерения переменного тока и напряжения унифицированным сигналом в линии связи является постоянный ток в пределах 0—1 ма при сопротивлении кабельной линии связи до 190 ом/км. Погрешность от изменения сопротивления линии связи приводит к тому, что выпрямительные токовые системы применяются для расстояний до 7—10 км по воздушным линиям связи, а по кабельным линиям связи до 20—25 км при погрешности порядка 3%. Так как проводимость изоляции воздушных линий связи зависит от метеорологических условий, в качестве линии связи для токовых систем применяют главным образом кабельные линии связи, обладающие незначительной проводимостью изоляции.

Кроме систем прямого преобразования известны различные компенсационные токовые системы, обладающие известными преимуществами. Компенсационные токовые системы позволяют значительно увеличить дальность действия систем при использовании кабельных линий связи. В литературе описаны токовые компенсационные системы, содержащие подвижные элементы в первичном измерительном преобразователе, что связано с известными недостатками. Поэтому в последнее время уделяется внимание статическим компенсационным системам. Преимуществом их применения, по сравнению с компенсационными преобразователями с механическими подвижными частями, является относительная про-

стота их изготовления и наладки, лучшие технические характеристики, длительный срок службы без ухода и экономичность.

При использовании компенсационной системы без первичного выпрямителя и без подвижных частей требуется достаточно точное и малоинерционное устройство для цепи обратной связи, преобразующее выходной сигнал преобразователя в сигнал однородный с входным сигналом.

Некоторые приводимые в литературе статические компенсационные токовые системы, близкие к рассматриваемой в работе, представляют собой сочетание электрического и магнитного усилителей, т. е. магнитного модулятора, причем последний выполняет функцию нуля-органа. В цепь обратной связи вводят магнитный модулятор, который преобразует выходной постоянный ток в переменный по линейному закону, нужный для компенсации входной (измеряемой) величины переменного тока. Выходной постоянный ток преобразователя является как током, протекающим в линии связи, так и током обратной связи, проходящим по соответствующей обмотке магнитного модулятора. По литературным данным погрешности (основная и дополнительная погрешности) не превышают $\pm 1\%$, причем сопротивление нагрузки может меняться от 0 до 5 ком. Время установления выходного тока не превышает 2 сек.

Недостатком является возможность появления погрешностей от нестабильности параметров магнитного модулятора. Поскольку модулятор питается от вспомогательного источника, преобразователь будет работать без существенных погрешностей лишь в малом диапазоне изменения фазы измеряемой величины. Также появляется погрешность, если в управляющей обмотке магнитного модулятора имеются переменные составляющие напряжения, являющиеся четными гармониками напряжения питания магнитного модулятора. Источником таких переменных составляющих может быть как первичный преобразователь, т. е. сама измеряемая величина, так и сам магнитный модулятор. Возникающая погрешность в первом случае зависит от амплитуды и от фазы гармоник. Ими можно только пренебречь при их наличии ниже 2%.

Другая система со статическим преобразователем может быть использована для телеизмерения электрических или неэлектрических величин, которые тем или иным способом могут изменять величину активного (с косвенным подогревом) со-

противления. Эта телеизмерительная система состоит из моста, в одно из плеч которого включено сопротивление с косвенным подогревом. Сопротивление плеч выбрано так, что мост автоматическими уравнивается за счет изменения тока подогрева во всем диапазоне изменения измеряемой величины. Для устойчивой работы системы необходимо использование фазочувствительного выпрямителя. Подогревные сопротивления с полупроводниковым чувствительным элементом обладают значительной инерционностью — около 40 сек. Зависимость тока в линии связи от измеряемой величины при использовании быстродействующего подогревного сопротивления нелинейная. Существует метод линеаризации зависимости тока в линии связи от измеряемой величины. Однако следует отметить, что подобные сопротивления с косвенным подогревом в настоящее время не являются стандартными элементами крупносерийного производства.

При использовании преобразователей (датчиков) переменного тока и напряжения с выходным сигналом в виде постоянного тока или напряжения в целях независимости показаний от искажения формы кривой (от высших гармонических составляющих) необходим преобразователь, выходной сигнал которого пропорционален действующему значению входной измеряемой величины. Использование в качестве такого датчика термпары приводит к сложной телеизмерительной системе (принимательное устройство аналогично автоматическому компенсатору), обладающей рядом существенных недостатков: нелинейностью характеристики шкалы принимающего прибора, недопустимостью перегрузок и др.

Диссертационная работа посвящена исследованию (статической) выпрямительной компенсационной системы для телеизмерения переменного тока и напряжения, построенной по принципу сравнения (компенсации) амплитуды переменного тока или напряжения с выходным сигналом — постоянным током.

В целях независимости показаний принимающего прибора от искажения формы кривой измеряемого тока или напряжения рассматривается возможность применения фильтров.

Статический режим

При исследовании возможности применения статических компенсационных методов для телеизмерения переменного тока и напряжения оказалось возможным применить метод

с амплитудным сравнением. Принцип этого метода состоит в том, что при замкнутой цепи обратной связи постоянный ток в линии связи сравнивается в цепи сравнения непосредственно с амплитудой входного сигнала переменного тока. Благодаря постоянному току в линии связи входной диод получает напряжение смещения, вследствие чего возникает переменное напряжение, форма которого представляет собой маленькие отрезки переменного входного сигнала синусоидальной формы. Разность ΔU между максимальным значением амплитуды входного напряжения $U_{m \text{ вх}}$ и падением напряжения U_{oc} на сопротивлении обратной связи R_{oc} подается на вход усилителя переменного тока. Импульсы в виде разности ΔU после усиления и выпрямления сглаживаются.

В практике компенсационных схем существуют различные способы снятия обратной связи с выхода схемы и подачи ее на вход схемы. В описываемой схеме выбрана обратная связь по напряжению. Ток в линии связи $I_{лс}$ зависит от амплитуды напряжения $U_{m \text{ вх}}$ по линейному закону и определяется выражением

$$I_{лс} = \frac{U_{m \text{ вх}}}{R_{oc}} \frac{1}{1 + \frac{1}{K_n \beta}}, \quad (1)$$

где K_n — коэффициент преобразования,
 β — коэффициент обратной связи.

Коэффициент преобразования в значительной степени зависит от прямого сопротивления входного диода цепи сравнения и связан с коэффициентом усиления усилителя K_0 по формуле

$$K_n = \frac{U_1}{\Delta U} K_0, \quad (2)$$

где U_1 — напряжение на входе усилителя.

Коэффициент статизма K_c , определяемый отношением некомпенсированной части входного напряжения к ее амплитуде, зависит от параметров схемы, т. е. от произведения $K_n \beta$ по формуле

$$K_c = \frac{\Delta U}{U_{m \text{ вх}}} = \frac{1}{1 + K_n \beta}. \quad (3)$$

Относительное изменение тока в линии связи равно

$$\frac{\Delta I_{лс}}{I_{лс}} = - \frac{\Delta R_{oc}}{R_{oc}} + \frac{\Delta \beta}{\beta (K_n \beta + 1)} + \frac{K_n}{K_n (K_n \beta + 1)}. \quad (4)$$

Сопротивление обратной связи непосредственно влияет на результат измерения. Для уменьшения его влияния на погрешность его следует изготовить из материала с малым температурным коэффициентом.

Прямое сопротивление полупроводникового диода влияет на точность преобразования. Для практической реализации схемы целесообразно использование кремниевых диодов, имеющих по сравнению с германиевыми, более пригодное для данной цели отношение прямого и обратного сопротивлений в широком диапазоне температур. При соответствующем выборе разности напряжений ΔU путем увеличения сопротивления обратной связи (при заданном коэффициенте статизма) можно достигнуть относительно малого прямого сопротивления кремниевого диода и получить суммарную погрешность преобразователя менее 1%; при этом коэффициент усиления K_0 должен быть не менее 6000.

Влияние формы кривой

Выпрямительные приборы для измерения переменных токов и напряжения чувствительны к форме кривой измеряемой величины. Это объясняется тем, что обычно приборы градуируют в действующих значениях, а показания приборов определяются средним или амплитудным значениями. Если формы кривых измеряемой величины при градуировке и при измерении неодинаковы, измерения получаются с погрешностью. В этой главе рассматривается влияние формы кривой измеряемой величины в том случае, когда измерительная система, отградуированная в действующих значениях, реагирует на амплитудное значение. Для сравнения приводится график погрешностей выпрямительных приборов в зависимости от количества высших гармоник.

Мгновенное значение измеряемого напряжения, которое кроме первой (основной) гармоники содержит одну n -ую гармонику, можно написать в виде

$$u = U_m [\sin \omega t + \delta \sin (n\omega t + \varphi)], \quad (5)$$

где U_m — амплитуда первой гармоники,

δ — отношение амплитуды n -й гармоники к амплитуде первой гармоники,

φ — сдвиг фазы n -й гармоники.

Из уравнения (5) можно определить зависимость экстремальных значений амплитуды напряжения при постоянном отношении амплитуд от сдвига фазы φ , определяя t , при котором $u(t, n, \varphi)$ имеет экстремальное значение. Численно значения.

$$t = \arccos \cos [-\vartheta n \cos (nt + \varphi)] \quad (6)$$

были определены для разных φ приближенными методами. Под влиянием высших гармоник экстремальное значение напряжения может принимать значения до алгебраического суммирования амплитуд первой и n -й гармоник. При наличии нескольких гармоник и при определенных сдвигах фаз экстремальные значения могут принимать значения между

$$U_{\max} = \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn} \quad (7)$$

и

$$U_{\min} = U_m - \sum_{n=2}^{\infty} U_{mn}. \quad (8)$$

При использовании амплитудного значения для измерения действующего значения наличие любой высшей гармоники может вызывать в самом неблагоприятном случае погрешность, составляющую соотношение: приблизительно процент гармоники на процент погрешности. Это соотношение имеет место главным образом при малых коэффициентах ϑ , когда измеряемая величина содержит меньше 12% высшей гармоники.

В выпрямительной системе, реагирующей на среднее значение, но отградуированной в действующем значении, особенно вызывают погрешности нечетные гармоники. Самую большую погрешность может вызывать 3-я гармоника при сдвиге фазы относительно первой гармоники, равном 180° с отношением: 1% гармоник — 0,38% погрешности.

Погрешность от влияния формы кривой измеряемой величины зависит от амплитуды высших гармоник и является периодической функцией сдвига фазы. Для измерительных целей интересны возможные экстремальные значения погрешности. В практике измеряемая величина не имеет той формы, которая была использована при градуировке и которая была по возможности близка к идеальной синусоидальной. По ГОСТ 1845—59 для электронных и выпрямительных приборов в классе точности 0,5 допускается 1% искажения, а в классе точности 1 допускается 2% искажения. При использовании

амплитудного значения для оценки действующего значения в любом случае присутствие высших гармоник может вызывать погрешности выше допустимых пределов класса точности, так что преимущества выпрямительного компенсационного метода с амплитудным сравнением теряют свое значение, если не удастся уменьшить влияние высших гармоник до или ниже пределов влияния гармоник при выпрямительных системах среднего значения.

Уменьшение погрешности от искажений формы кривой

В этой главе рассматривается возможность уменьшения погрешности от формы кривой применением фильтра для затухания паразитных высших гармоник. При предлагаемом компенсационном методе с амплитудным сравнением точность в некотором диапазоне процентного содержания высших гармоник можно улучшить в такой степени, в какой удастся подавить амплитуды искажающих высших гармоник. Погрешность, вызванная тем, что определенная высшая гармоника вследствие действия фильтра не подлежит измерению, можно определить из формулы

$$I = \sqrt{\sum \frac{1}{T} \int_0^T i_q^2 dt} = \sqrt{\sum I_q^2}. \quad (9)$$

В результате полного устранения высшей гармоники, содержащейся в размере до 14%, возникает лишь погрешность измерения меньше 1%. Для сравнения: при выпрямительных системах, градуированных в действующих значениях 14% второй гармоники могут вызывать погрешность до 1,25%, а 14% третьей гармоники до 6%. В целях повышения точности измерения малая зависимость погрешности от процентного содержания гармоник, особенно в начальном участке, оправдывает применение фильтра для уменьшения влияния высших гармоник.

Основная трудность создания фильтра заключается в том, что он должен ослабить высшие гармоники, в том числе и вторую, желательно на один порядок. При удвоении частоты затухание должно возрастать на 20 дБ, а в диапазоне пропускания от 49—51 гц наклон характеристики фильтра не должен вызывать частотную погрешность, превышающую отношение: процент изменения частоты на процент погрешности.

Для получения желаемой характеристики был осуществлен фильтр, состоящий из двух интегрирующих RC-звеньев и уси-

лителя с двойным T -образным мостом в цепи отрицательной обратной связи. При присутствии второй гармоники в измеряемой величине, ее амплитуда подавляется до 10,9%, а при присутствии 3-й гармоники — до 3,32%. Частотная погрешность, вызванная фильтром при изменении частоты в диапазоне от 49—51 $\mu\text{ц}$ не превышает $-0,4\%$.

Динамический режим

В предлагаемом передающем устройстве выпрямительной компенсационной системы на выходе имеется выпрямитель и сглаживающий фильтр. Последний в основном и обуславливает инерционность преобразования. От него же зависит пульсация тока в линии связи и устойчивость преобразования. Для уменьшения пульсации и повышения устойчивости преобразования целесообразно применение фильтра нижних частот с большой постоянной времени. Однако при этом ухудшается время установления тока в линии связи при скачкообразном изменении измеряемой величины. Поскольку в данном случае в качестве принимающего прибора применяется магнитоэлектрический (стрелочный) миллиамперметр, от его динамических характеристик зависит время установления показаний. Время успокоения такого прибора составляет около 4 сек . Если время установления тока в линии связи составляет меньше половины этого значения, то инерционность принимающего прибора определяет быстрдействие всей системы.

Из-за присутствия диодов в блоке выпрямитель—фильтр имеются две постоянные времени, причем постоянная времени разряда конденсатора фильтра значительно больше, чем постоянная времени заряда. При рассмотрении переходного процесса можно принимать во внимание лишь те параметры, которые оказывают наиболее существенное влияние. Предполагая, что однозвенный Γ -образный фильтр достаточно хорошо обеспечивает сглаживание тока в линии связи, переходный процесс, определяемый этим фильтром, будет иметь апериодический характер. Теоретическое рассмотрение переходного процесса при заряде конденсатора фильтра (при скачкообразном включении входного сигнала переменного тока) связано с трудностями.

Для исследования устойчивости передающего устройства выпрямительной компенсационной системы, состоящей из двух последовательно включенных блоков: активного фильтра и статического преобразователя с амплитудным сравнением,

применяется метод логарифмических частотных характеристик. После нахождения корней знаменателя и числителя передаточной функции разомкнутой системы диапазонного фильтра может быть представлена в виде

$$K_{\Phi}(p) = \frac{K_{y\Phi} (T_1 p + 1) (T_2^2 p^2 + 2\zeta T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1) (T_4 p + 1) (T_5 p + 1)}, \quad (10)$$

где $K_{y\Phi}$ — коэффициент усиления.

Для исследования устойчивости статического преобразователя из-за присутствия блока выпрямитель—фильтр необходимо принять некоторое допущение для линеаризации: характеристики полупроводниковых диодов принимаются идеальными и диоды заменяются реле. С этим допущением для исследования устойчивости, которое подтверждается экспериментом, была составлена передаточная функция разомкнутой системы статического преобразователя в виде

$$K(p) = \frac{(T_0 p)^4}{(T_1 p + 1) (T_2 p + 1) (T_3 p + 1) (T_4 p + 1) (T_5 p + 1)}, \quad (11)$$

где

$$T_0 = \sqrt[4]{K_{\Pi} K_{oc} T' T_3' T_4' T_5'}. \quad (12)$$

Экспериментальные исследования

Макет выпрямительной компенсационной системы выполнен на стандартных элементах крупносерийного производства. В данной главе приведены принципиальная схема и основные характеристики макета передающего устройства выпрямительной компенсационной системы на предел измерения $0-100 \text{ в}$ [а также приводятся данные сравнения с выпрямительной системой (без сглаживающего фильтра) и с выпрямительной токовой системой ВПН-2]:

Зависимость тока в линии связи от измеряемой величины сохраняет линейность в пределах $0 \div 1 \text{ ма}$ с точностью до $\pm 0,5\%$.

Минимальный ток в линии связи при отсутствии на входе макета сигнала — $1,5 \text{ мка}$.

Изменение сопротивления линии связи в пределах 10 ком $\pm 10\%$ на результатах измерений не сказывается. Изменение сопротивления линии связи от 10 ком до 0 при номинальном значении тока в линии связи вызывает погрешность $-0,32\%$.

Погрешность от изменения окружающей температуры в месте нахождения передающего устройства не превышает 0,55% на 10°.

Статизм системы составляет 1%.

Плавное изменение напряжения питания в пределах 220 в ±15% не оказывает заметного влияния на показания.

Частотная погрешность при изменении частоты в пределах 47,8 ÷ 52 гц ≤ 1% и 49 ÷ 51 гц ≤ 0,4%.

Погрешность от искажения формы кривой измеряемой величины приведена в таблицах. Наибольшее влияние оказывает 2-я гармоника. Десять процентов 2-й гармоники в зависимости от сдвига фазы могут вызвать погрешность до -1,6%. (Погрешность выпрямительной токовой системы ВПН-2 для телеизмерения переменного напряжения при этих же условиях составляет -6,5%).

Время установления тока в линии связи при включении входного сигнала не превышает 0,14 сек. Время переходного процесса при выключении входного сигнала не превышает 1,4 сек.

Мощность, потребляемая макетом от сети переменного тока напряжением 220 в частоты 50 гц, составляет 6 вт.

При расчете надежности макета приняты следующие упрощения:

— отказ системы (элемента) является событием случайным и независимым;

— интенсивность отказов системы (элемента) не зависит от продолжительности работы и является постоянной величиной, т. е. в течение срока службы у элементов отсутствует старение;

— все элементы данного типа равнонадежны, т. е. интенсивность отказов однотипных элементов одинакова.

При принятых предложениях в результате расчета определена вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t) = e^{-12,63 \cdot 10^{-5}t}$$

Результат расчета наработки на отказ всей системы $\bar{T}_0 = 7900$ час.

Выводы

Проведенное исследование выпрямительной компенсационной токовой системы для телеизмерения переменного тока и напряжения позволяет сделать следующие выводы.

1. Выпускаемые в настоящее время промышленностью выпрямительные системы прямого преобразования для телеизмерения переменного тока и напряжения имеют класс точности 2,5. Эти системы могут работать на кабельных линиях связи до 20 км. Компенсационные токовые системы для телеизмерения основных электрических величин промышленностью не выпускаются.

2. Известные компенсационные токовые системы, предназначенные в основном для телеизмерения неэлектрических величин, содержат подвижные части. Предложенная в настоящей работе выпрямительная компенсационная токовая система с амплитудным сравнением осуществлена на элементах крупносерийного производства. Путем изменения сопротивления обратной связи можно легко осуществить масштабные изменения.

3. Погрешности от искажения формы кривой тока и напряжения выпрямительных систем зависят от того, применяются или отсутствуют сглаживающие фильтры после выпрямления. В выпрямительном преобразователе без сглаживающего фильтра погрешности от несинусоидальной формы кривой значительно меньше, чем в выпрямительном преобразователе со сглаживающим фильтром. Отрицательным свойством является сильная пульсация выходного сигнала. При применении сглаживающих фильтров погрешность может принимать значение, равное соотношению: процент погрешности на процент гармоники.

Такая же погрешность имеет место и при использовании амплитудного сравнения для измерения действующего значения.

4. В работе показана возможность уменьшения погрешности от искажения формы кривой тока или напряжения применением фильтра для затухания высших гармоник. Практически полное устранение всех высших гармоник связано с значительными трудностями. Показано, что при десятикратном ослаблении любой высшей гармоники, в том числе и второй, которая составляла 12% амплитуды измеряемой величины, погрешность измерения будет <1%. В качестве фильтра применяется двухзвенный RC-фильтр и электронный усилитель с частотно-зависимой отрицательной обратной связью.

5. Статические и динамические характеристики макета выпрямительной компенсационной системы с амплитудным сравнением, полученные экспериментально, согласуются с

теоретическим расчетом. Исследования показали, что основная погрешность преобразования не превышает $\pm 0,5\%$.

6. На основании вышеизложенного можно утверждать, что выпрямительная компенсационная токовая система с амплитудным сравнением для телеизмерения переменного тока и напряжения с использованием фильтра нижних частот может быть осуществлена с классом точности 1.