

РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА. АВТОМАТИКА»

УДК 534.86

РЯЗАНЦЕВ О.В., к.ф.-м.н., доцент
АНДРЕЕВ О.В., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В АУДИОУСТРОЙСТВАХ

У роботі наведена розроблена авторами узагальнена модель електромеханічного зворотного зв'язку (ЕМЗЗ). Наведено результати експериментального дослідження аудіосистеми з ЕМЗЗ по прискоренню руху звукової котушки гучномовця при спектральному й імпульсному тестуванні. Показано, що за допомогою комбінованого ЕМЗЗ можна в широких межах управляти всіма механічними параметрами гучномовця незалежно від конструкції і його акустичного оформлення.

В работе приведена разработанная авторами обобщенная модель электромеханической обратной связи (ЭМОС). Приведены результаты экспериментального исследования аудиосистемы с ЭМОС по ускорению движения звуковой катушки громкоговорителя при спектральном и импульсном тестировании. Показано, что с помощью комбинированной ЭМОС можно в широких пределах управлять всеми механическими параметрами громкоговорителя независимо от его конструкции и акустического оформления.

In work the generalized model of an electromechanical feedback developed by authors (EMFB) is resulted. Results of an experimental research of an audiosystem with EMFB on acceleration of movement of the sound coil of a loudspeaker are resulted at spectral and pulse testing. It is shown, that by means of combined EMFB it is possible to operate over a wide range all mechanical parameters of a loudspeaker irrespective of its design and its acoustic registration.

Введение. В работе [1] показано, что правильная реализация электромеханической обратной связи (ЭМОС) в усилителе звуковой частоты (УЗЧ) позволяет существенно повысить верность воспроизведения аудиосигналов во всем диапазоне звуковых частот. При этом УЗЧ и громкоговоритель уже нельзя рассматривать как отдельные устройства, а как единый электроакустический комплекс (ЭАК), в котором искажения, вносимые громкоговорителем, компенсируются УЗЧ с помощью петли ЭМОС. Громкоговоритель в этом случае рассматривается как механический осциллятор с вязким трением и электрическим токовым возбуждением.

Постановка задачи. В настоящее время в электроакустике отсутствует единая точка зрения на эффективность ЭМОС, целесообразность использования того или иного сигнала, способа организации петли ЭМОС и т.д. В связи с этим в данной работе поставлена задача разработки общего теоретического подхода к методу ЭМОС, анализа всех возможных следствий и выдача рекомендаций по наиболее полному использованию потенциальных возможностей данного метода. В работе [1] показано, в частности, что введение ЭМОС по сигналу скорости движения звуковой катушки в определенной полярности эквивалентно увеличению коэффициента вязкого трения подвижной части громкоговорителя, а в противоположной – его уменьшению, вплоть до возбуждения ЭАК. Аналогичным образом можно показать, что введение ЭМОС по ускорению ка-

тушки изменяет эффективную массу подвижной части громкоговорителя, а по координате – эффективный коэффициент жесткости. Таким образом, уравнение движения звуковой катушки $m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = F(t)$ при наличии всех видов ЭМОС выглядит так:

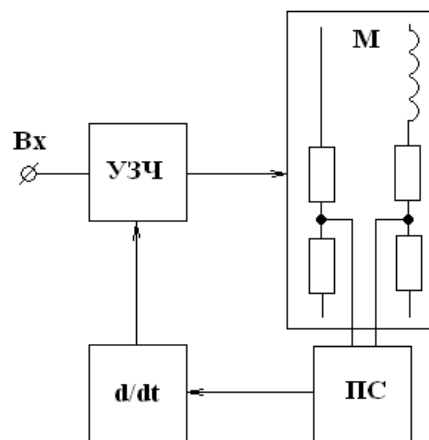
$$[m \pm \Delta m] \cdot \ddot{x} + [\gamma \pm \Delta \gamma] \cdot \dot{x} + [k \pm \Delta k] \cdot x = F(t),$$

где $\Delta m, \Delta \gamma, \Delta k$ – вносимые за счет ЭМОС масса, коэффициент вязкого трения и коэффициент жесткости громкоговорителя, x – координата звуковой катушки.

Знак «+» соответствует отрицательной ЭМОС (оЭМОС), «-» – положительной (пЭМОС), точки обозначают производные по времени от координаты звуковой катушки x громкоговорителя, $F(t)$ – вынуждающая сила. Следует подчеркнуть, что $\Delta m, \Delta \gamma, \Delta k$ – динамические величины, зависящие от режима работы громкоговорителя, его механических параметров, акустического оформления, вида функции $F(t)$. Отсюда непосредственно следует, что механические параметры любого громкоговорителя независимо от его акустического оформления можно варьировать в широких пределах, изменяя вид и полярность ЭМОС, т.е. подвижную часть можно «утяжелить» и, соответственно, снизить резонансную частоту громкоговорителя при оЭМОС по ускорению, или облегчить – при пЭМОС, повысив таким образом эту частоту. При достаточной глубине пЭМОС можно получить отрицательную эффективную массу подвижной части громкоговорителя, отрицательный коэффициент вязкого трения и отрицательный коэффициент жесткости. Все эти случаи соответствуют превращению ЭАК в автогенератор, что соответствует состоянию возбуждения.

В общем случае возможно наличие трех параллельных петель ЭМОС по сигналам x, \dot{x} и \ddot{x} , однако для достижения цели максимально верного воспроизведения наиболее привлекательны последние две или только третья. Дело в том, что звуковое давление громкоговорителя пропорционально ускорению диффузора, т.е. для тона с частотой ω : $P \approx A \cdot \omega$, A – амплитуда колебаний. При ЭМОС по \dot{x} сохраняется скорость $A \cdot \omega$, т.е. $P \approx const \cdot \omega$ или $P \approx \omega$, и звуковая отдача ЭАК приблизительно линейно возрастает с увеличением частоты сигнала, что подтверждается экспериментально.

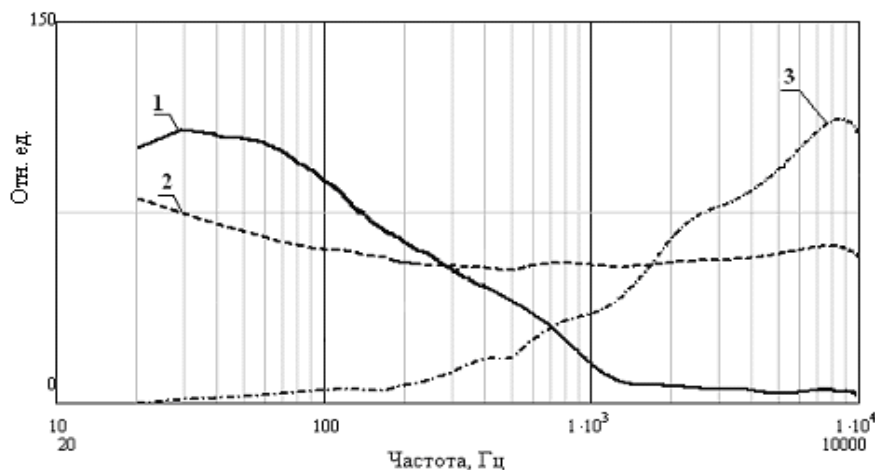
Результаты работы. С целью проверки этих предположений были проведены эксперименты с ЭАК, включающим типовой УЗЧ, громкоговоритель в закрытом корпусе и аналоговый дифференциатор в петле ЭМОС по скорости. Критерием верности воспроизведения является сигнал ускорения звуковой катушки, снимаемый с выхода дифференциатора. Структура приведена на рис. 1.



ПС – преобразователь симметрии, М – мост выделения сигнала ЭМОС по \dot{x}

Рисунок 1 – Структура ЭАК

Следует отметить, что сигнал ускорения звуковой катушки не вполне отражает развиваемое громкоговорителем звуковое давление в области высокочастотных компонент спектра, т.к. диффузор внепоршневого диапазона (более 600 Гц) уже не успевает отслеживать колебания катушки, возникает изгибная волна, уменьшается эффективная площадь излучения. Так что для получения равномерной характеристики ЭАК по звуковому давлению частотная характеристика сигнала ускорения катушки должна иметь слабовозрастающий характер. Как показано на рис.1, сигнал ЭМОС по скорости выделяется сбалансированным во всем диапазоне частот мостом и с помощью преобразователя симметрии приводится к напряжению относительно общей шины питания. Полученные частотные характеристики ЭАК при такой ЭМОС по \ddot{x} приведены на рис.2.



1 – глубокая оЭМОС; 2 – оптимальная оЭМОС; 3 – глубокая пЭМОС

Рисунок 2 – Частотные характеристики ЭАК по ускорению

Сразу отметим, что степень глубины ЭМОС нельзя охарактеризовать таким же простым образом, как глубину частотнозависимой ОС-ЭМОС по ускорению имеет квадратичную зависимость от частоты. Поэтому о степени глубины проще судить по виду полученных характеристик ЭАК. Как видно из рис.2, при достаточно глубокой оЭМОС резонансная частота ЭАК смещается в область единиц и долей герц (при собственной резонансной частоте громкоговорителя в данном корпусе 140 Гц). При глубокой пЭМОС резонансная частота смещается в область 12 кГц. Совершенно очевидно, что любой громкоговоритель таким образом можно легко превратить в «сверхнизкочастотный» или в ВЧ-головку безотносительно к его собственным механическим параметрам и акустическому оформлению. В качестве промежуточных вариантов оптимальной следует считать характеристику 2, что подтверждается прослушиванием фонограмм.

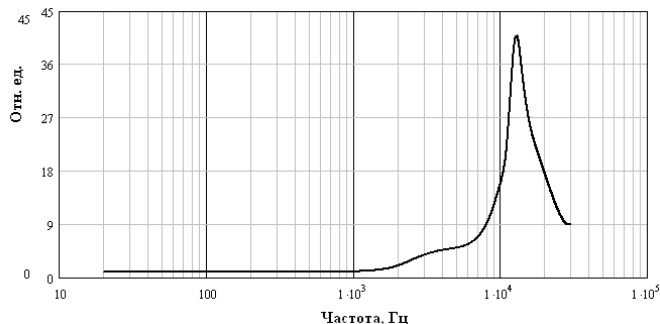


Рисунок 3 – Частотная характеристика громкоговорителя при глубокой пЭМОС

Результаты экспериментов, приведенные на рис.3, показывают, что резонансная частота громкоговорителя в данном случае, т.е. режиме близком, к возбуждению, сдвигается в область порядка 12кГц, образуя хорошо заметный резонансный пик.

Остановимся теперь на спектральных характеристиках ЭАК. В качестве источника использовался, как и ранее, сигнал ускорения, отображающий в достаточной мере развиваемое громкоговорителем звуковое давление. Испытательным сигналом служил тон частотой 1 кГц. На рис.4, 5 приведены спектрограммы сигнала ускорения без ЭМОС и с ЭМОС соответственно.

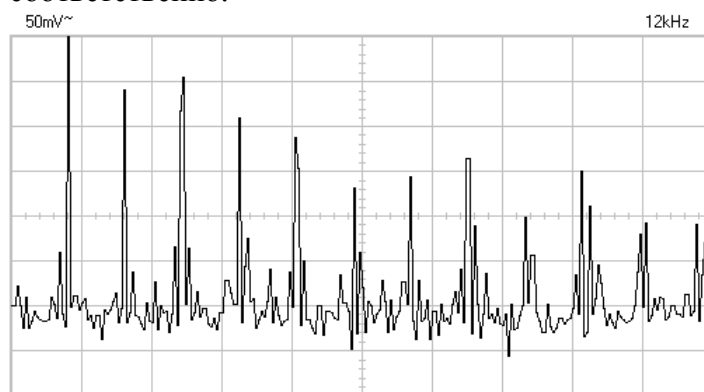


Рисунок 4 – Спектральная характеристика громкоговорителя без ЭМОС

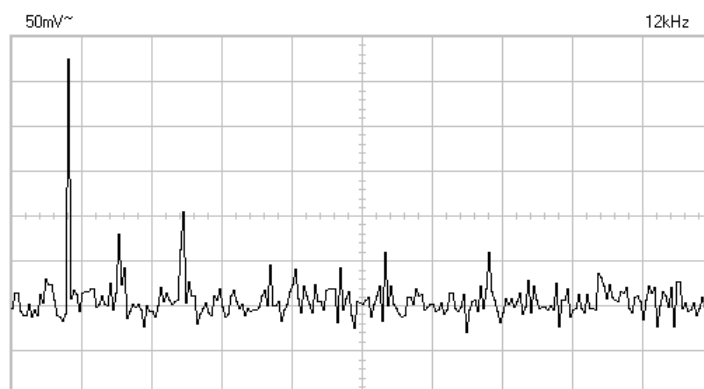


Рисунок 5 – Спектральная характеристика громкоговорителя с оЭМОС

Мощность, подводимая к громкоговорителю, находилась в пределах от 50% номинальной до номинальной, вертикальная шкала спектрального анализатора – логарифмическая. Из рис.4 видно, что в таком режиме кроме недопустимого уровня гармоник, возникающих вследствие нелинейности громкоговорителя, как осциллятора, появляются и комбинационные частоты, т.е. спектр существенно «загрязняется», делая звучание «непрозрачным», обогащенным ложными звуками (невозможность различения звучания различных источников, общее искажение исходной фонограммы).

На рис.5 спектр намного чище, комбинационные частоты отсутствуют, а уровень гармоник ослабляется приблизительно в 50-100 раз. При прослушивании фонограмм отчетливо ощущается «прозрачность» звучания, различимость отдельных источников, присущие высококачественным акустическим агрегатам, работающим в режиме малого сигнала (не более 10% от номинальной мощности).

Сложнее всего добиться от аудиосистем верного воспроизведения сигналов импульсного характера, которое в полной мере характеризуется импульсными или переходными характеристиками системы. Для регистрации этих характеристик в данной

работе использовался однополярный импульс и биполярный меандр. Регистрировался сигнал ЭМОС по ускорению. Результаты приведены на рис.6, 7, 8, 9.

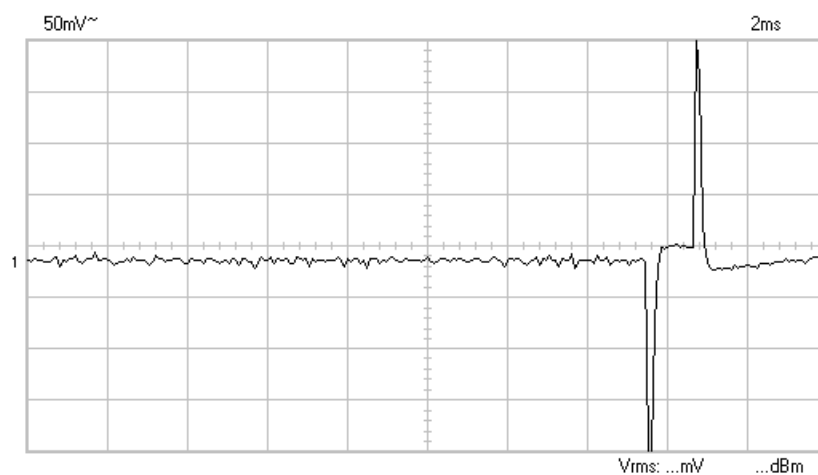


Рисунок 6 – Импульсная характеристика без ЭМОС

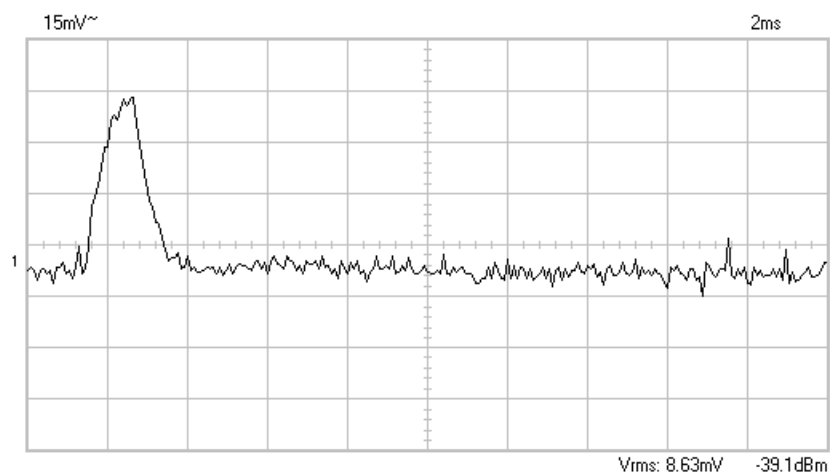


Рисунок 7 – Импульсная характеристика с ЭМОС

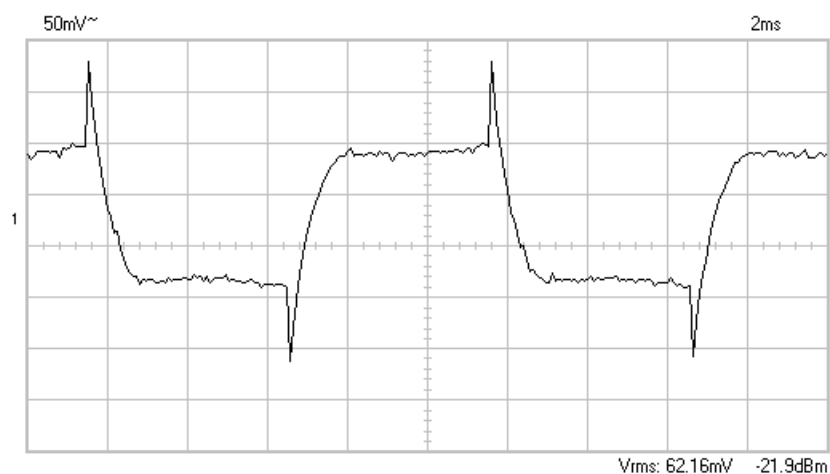


Рисунок 8 – Переходная характеристика с оЭМОС

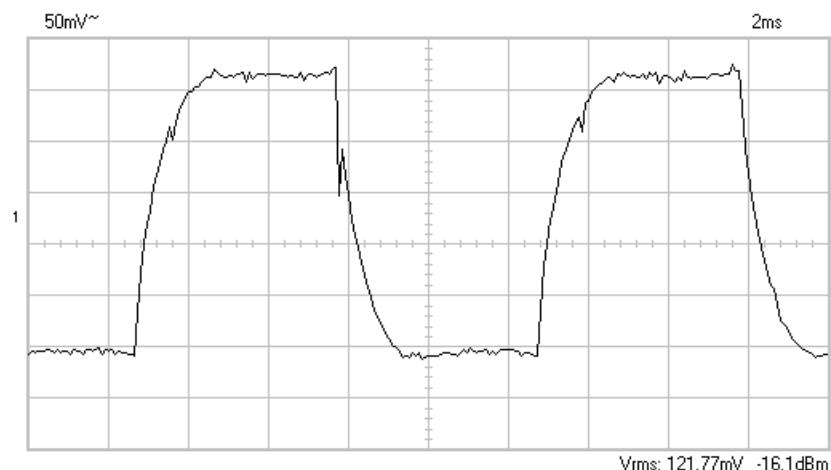


Рисунок 9 – Переходная характеристика при максимальной глубине ЭМОС

На рис.6 хорошо видно, что при разомкнутой петле ЭМОС громкоговоритель фактически дифференцирует входной сигнал (короткий однополярный П-импульс). То же самое происходит при использовании в качестве сигнала меандра. На рис.7 приведена импульсная характеристика громкоговорителя с ЭМОС, которая по форме достаточно близка к исходному сигналу.

Переходные характеристики на рис.8, 9 также свидетельствуют о соответствии входного и выходного сигналов, причем это соответствие тем больше, чем больше глубина ЭМОС.

Стоит заметить, что при разорванной петле ЭМОС после ударного воздействия на громкоговоритель во всех случаях наблюдается отчетливое послезвучание громкоговорителя на собственной резонансной частоте (в данном случае 140 Гц) как отмечено в работе [1]. Наличие ЭМОС полностью устраняет этот дефект: при использовании в качестве сигнала ЭМОС \dot{x} за счет вносимого вязкого трения, а при использовании \ddot{x} – за счет утяжеления массы подвижной части громкоговорителя.

Выводы. Предложена обобщенная модель ЭМОС по координате, скорости и ускорению звуковой катушки громкоговорителя, показана возможность регулировки в широких пределах всех механических параметров громкоговорителя безотносительно к его оформлению, определены условия организации оптимальной ЭМОС по ускорению, обеспечивающей практически равномерную характеристику громкоговорителя по звуковому давлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рязанцев О.В., Андреев О.В. Про ефективність використання електромеханічного зворотнього зв'язку в підсилювачах звукових частот. – Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні праці). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2005 – С.259-264.
2. Ю.Митрофанов, А.Пикерсгиль. Электродинамическая обратная связь в акустических системах. – Радио, 1970. – №5. – С.25-26.

Днепродзержинский государственный технический университет

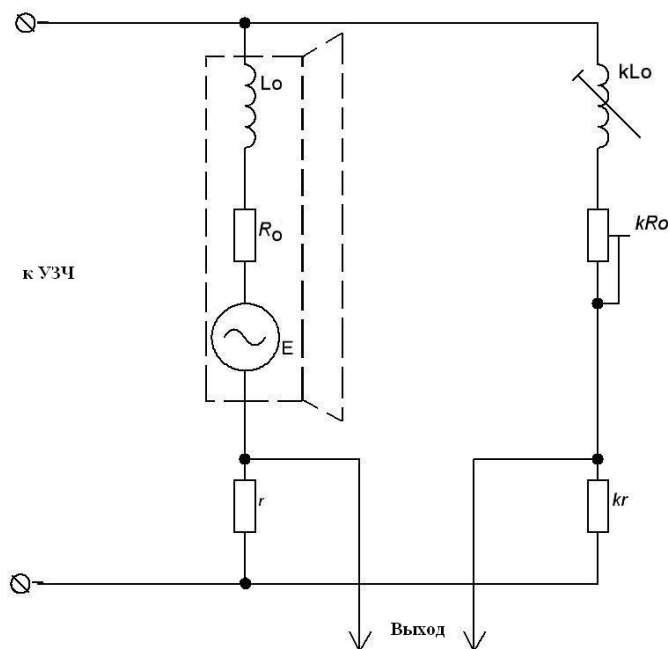
МЕТОДЫ БАЛАНСИРОВКИ МОСТОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ (ЭМОС)

У роботі наведені розроблені авторами методи балансування мостів у всьому діапазоні посилюваних частот для виділення сигналу електромеханічного зворотного зв'язку, а також результати проведених експериментів.

В работе приведены разработанные авторами методы балансировки мостов во всем диапазоне усиливаемых частот для выделения сигнала электромеханической обратной связи, а также результаты проведенных экспериментов.

In work the methods of balancing of bridges developed by authors in all range of strengthened frequencies for allocation of a signal of an electromechanical feedback and also results of the lead experiments are resulted.

Введение. В одной из первых публикаций по поводу ЭМОС [1] изложены принципы выделения сигнала скорости движения звуковой катушки громкоговорителя с помощью моста вида:



L_0, R_0, r – элементы активного плеча; kL_0, kR_0, k_r – элементы пассивного плеча, $K \approx 10$

Рисунок 1 – Мост для выделения сигнала скорости

При условии $r \ll R_0$ и малом значении выходного сопротивления УЗЧ выделенный в диагонали сигнал имеет амплитуду:

$$U = \frac{E \cdot r}{\sqrt{R_0^2 + (\omega \cdot L_0)^2}},$$

где E – ЭДС индукции, пропорциональная скорости движения звуковой катушки громкоговорителя.

Как видно, в области высоких частот этот сигнал ослабевает, однако такой недостаток можно устранить путем соответствующей коррекции, а в целом метод очень удобен, т.к. не требует изменения конструкции громкоговорителя. Основная трудность заключается в точности балансировки моста во всем диапазоне усиливаемых частот, которая в идеальном варианте предполагает механическое затормаживание звуковой катушки громкоговорителя, что в большинстве случаев невозможно. Именно указанная трудность привела к тому, что многие авторы ограничиваются балансировкой моста только по постоянному току, а в этом случае «лишним» оказывается элемент kL_0 . Мост в области средних и высоких частот оказывается несбалансированным, что, в свою очередь, привело к неверным представлениям об эффективности использования ЭМОС только в «поршневом» диапазоне, некорректным способам настройки аудиоустройств с ЭМОС, выбору ее полярности и, как следствие, – разочарованию в потенциальных возможностях этого вида ОС. Во многих случаях вообще предлагается заменить ЭМОС двумя петлями ОС-ПОС по выходному току и ООС по напряжению на громкоговорителе. К этому следует добавить неопределенность самого типа используемого сигнала (скорость, ускорение), неразборчивость в выборе дифференцирующих устройств, критериев эффективности работы аудиоустройств с ЭМОС и пр.

Постановка задачи. В данной работе предлагается балансировать мост импульсами малой длительностью $\tau = 10$ мкс. Можно, например, воспользоваться последовательностью импульсов с частотой следования 10 ... 15 Гц. Смысл метода заключается в регистрации функции отклика громкоговорителя на ударное возбуждение, длительность которого настолько мала, что за время «удара» звуковая катушка громкоговорителя практически остается на месте и сигнал ее скорости отсутствует. Тогда в диагонали несбалансированного моста должен присутствовать ударный импульс, что легко зарегистрировать осциллографом, а в диагонали сбалансированного моста – только «послезвучание» громкоговорителя, т.е. затухающий колебательный процесс на частоте собственного резонанса.

Результаты работы. Из изложенного следует, что после предварительной балансировки по постоянному току с помощью элемента kL_0 следует добиваться исчезновения ударного импульса на осциллограмме сигнала в диагонали моста. Характерные состояния такой балансировки приведены на рис.2.

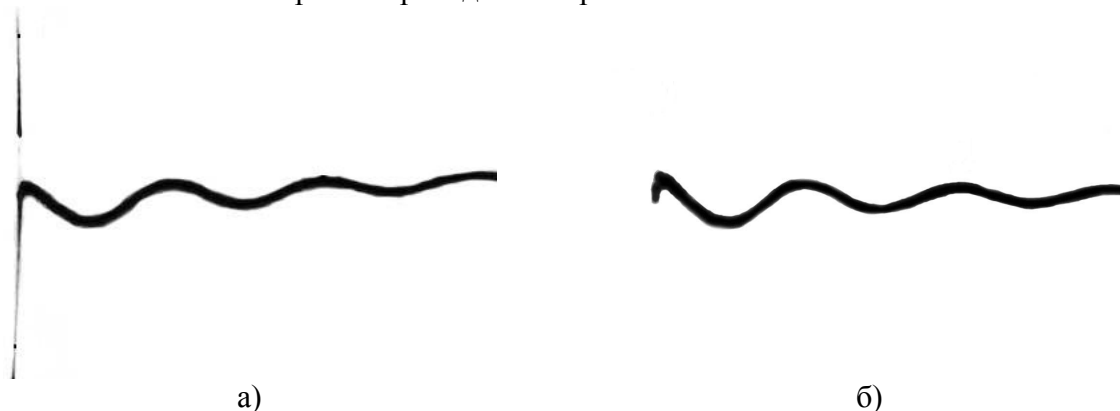
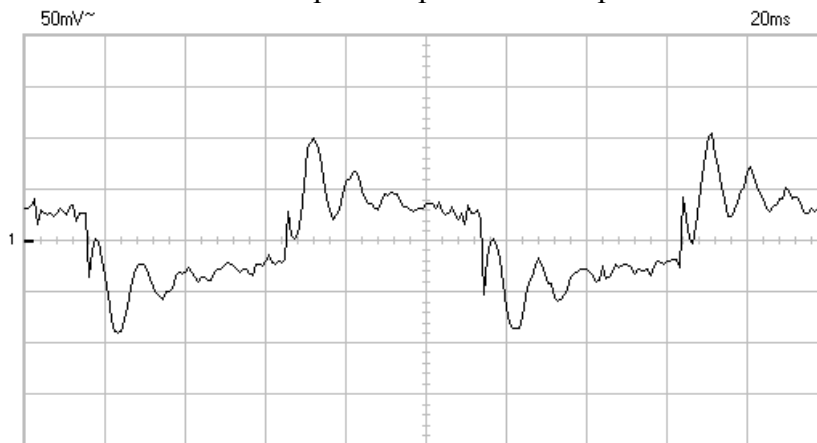


Рисунок 2 – Осциллограммы для разбалансированного моста (а), для сбалансированного моста (б)

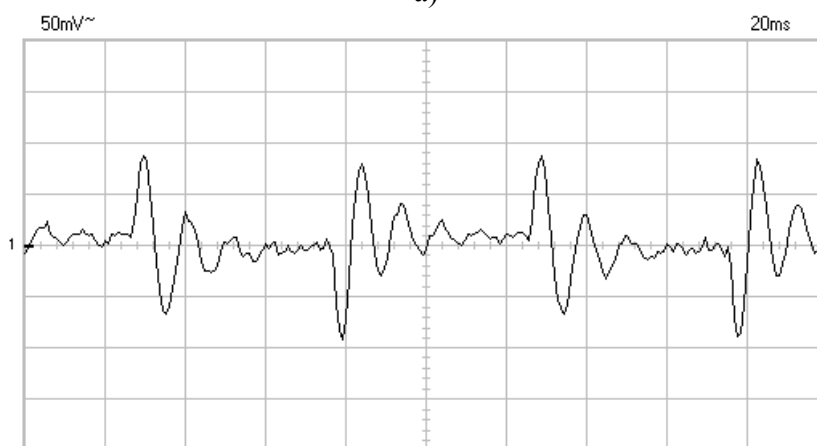
Заметим, что вследствие значительной ширины спектра короткого импульса ($\Delta f = 100 \text{ кГц}$ при выбранном τ) такой метод автоматически обеспечивает баланс моста во всем звуковом диапазоне.

Для этой же цели можно использовать и меандр с частотой 10...15 Гц. В этом случае можно выполнить балансировку по переменному и постоянному току.

Характерные состояния балансировки приведены на рис.3.



а)

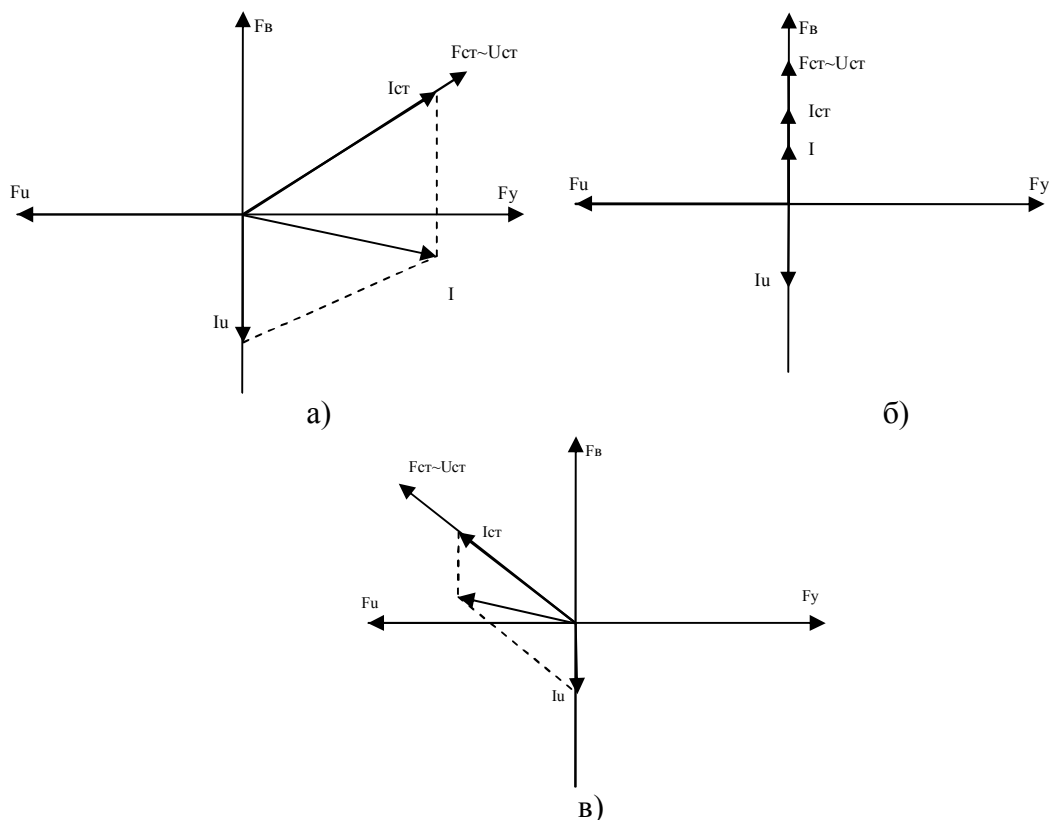


б)

а – мост разбалансирован; б – мост сбалансирован

Рисунок 3 – Осциллограммы при балансировке моста с использованием меандра

В отсутствие импульсных генераторов можно воспользоваться генератором гармонических сигналов звуковых частот. При этом предлагается рассматривать громкоговоритель как механический осциллятор с вязким трением. В этом случае сила Ампера, действующая на звуковую катушку, обусловлена двумя компонентами тока – сторонней и индукционной. На рис.4 изображены разложения этой силы на упругую, вязкую и инерционную компоненты в дорезонансной, резонансной и послерезонансной областях ($F_y \sim x; F_v \sim \dot{x}; F_u \sim \ddot{x}$).



а) дорезонансная область; б) резонанс; в) послерезонансная область
Рисунок 4 – Векторные диаграммы разложения сил

Из этих диаграмм видно, что в дорезонансной области напряжение источника сигнала опережает по фазе ток через громкоговоритель, в резонансе – напряжение и ток синфазны, в послерезонансной области ток через громкоговоритель опережает выходное напряжение УЗЧ. Т.о. в I квадранте громкоговоритель характеризуется «реактивностью» L-типа, а во II – С-типа, причем природа этой «реактивности» заключается в наличии индукционного тока I_u , который на векторной диаграмме коллинеарен вектору скорости ($\dot{x} \| F_g$).

Итак, если частоту гармонических колебаний f выбрать намного меньше $f_{рез}$, то вектор I_{cr} будет в I квадранте и почти совпадет с осью F_y . Если мост сбалансирован, то в его диагонали присутствует только сигнал I_u и любая разбалансировка, приводящая к возникновению в этой диагонали сигнала, $\pm \Delta I_{cr}$ приведет только к увеличению напряжения сигнала. То же самое произойдет и на частоте $f \gg f_{рез}$, только I_{cr} будет находиться во II квадранте. Эти состояния иллюстрирует рис.5.

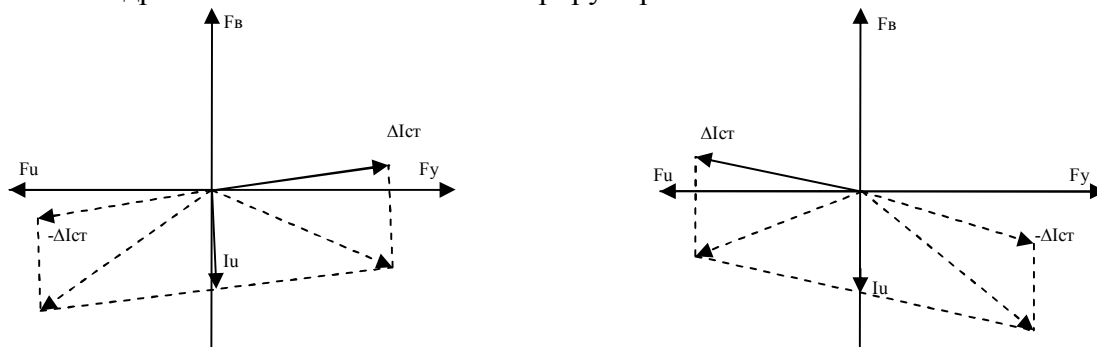


Рисунок 5 – Векторные диаграммы, поясняющие балансировку моста с помощью гармонического сигнала

Отсюда сразу следует, что для балансировки моста по постоянному току следует подать на него сигнал с частотой $10 \dots 15$ Гц и элементами kR_0 добиться минимального сигнала в диагонали моста. Затем подать на мост сигнал с частотой $10 \dots 15$ кГц и элементом kL_0 также добиться минимального сигнала в диагонали. На этом балансировку можно считать законченной.

Выводы. Предложены два варианта метода импульсной балансировки мостов для выделения сигнала ЭМОС, метод балансировки с использованием гармонического сигнала в далекой дорезонансной и послерезонансной областях, описана модель громкоговорителя как механического осциллятора, поясняющая возникновения «реактивностей» L- и C-типа. Приведены осциллограммы для характерных состояний несбалансированного и сбалансированного мостов при использовании различных методов балансировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Митрофанов, А.Пикерсгиль. Электромеханическая обратная связь в акустических системах. – Радио, 1970. – №5. – С.25-26.
2. Рязанцев О.В., Андреев О.В. Про ефективність використання електромеханічного зворотнього зв'язку в підсилювачах звукових частот / Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні праці) / – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2005. – С.259-264.

УДК 666.3:541.67

АНДРЕЕВ А.А., ассистент
ОМЕЛЬЯНЕНКО И.В., студент
РОДИН А.В., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВАРИСТОРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА

В даній роботі представлені результати дослідження польової залежності електропровідності, коефіцієнта нелінійності ВАХ і комплексної діелектричної проникності (КДП) $(\epsilon' - j\epsilon'')$ і ємності варисторів на основі WO_3 з добавками MnO_2 , Al_2O_3 і NiO .

В настоящей работе представлены результаты исследования полевой зависимости электропроводности, коэффициента нелинейности ВАХ и комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $(\epsilon' - j\epsilon'')$ и емкости варисторов на основе WO_3 с добавками MnO_2 , Al_2O_3 и NiO .

In this work represented the results of research of the field dependence of conductivity, coefficient of the nonlinear VID and complex dielectric permeability (CDP) $(\epsilon' - j\epsilon'')$ and capacities of varistors on the basis of WO_3 with the additions MnO_2 , Al_2O_3 and NiO .

Введение. В настоящее время перспективными являются варисторы на основе материалов, которые проявляют нелинейные электрические свойства при более низких напряжениях. Керамика на основе оксида вольфрама обладает нелинейной вольт-

амперной характеристикой (ВАХ) в области низких напряжений и является перспективным материалом для низковольтных варисторов.

Постановка задачи. Образцы керамики были изготовлены по стандартной керамической технологии путем обжига при температурах от ~ 1100 до ~ 1250°C в течение 2 часов. После обжига на образцы наносились электроды из InGa эвтектики. В качестве добавок использованы оксиды MnO₂, NiO, Al₂O₃.

Измерения ВАХ проводились при напряженностях поля до 400 В/см. Для измерений импульсной ВАХ использовались импульсы напряжения с передним фронтом не более 5мкс и задним фронтом экспоненциальной формы с постоянной времени 20мкс.

Измерения комплексной диэлектрической проницаемости проводилось в два этапа. На первом этапе измерялась инфранизкочастотная составляющая по методу изотермической деполяризации. Образцы подвергались зарядке в течении 15 минут. На втором этапе измерялась низкочастотная и среднечастотная составляющая.

Температурная зависимость, проводимость определялась в диапазоне температур от 300 до 500 К.

Результаты работы. Анализ полученных экспериментальных данных в рамках представлений об электропереносе по механизму термоэлектронной эмиссии, как по одному из наиболее распространенных для неоднородных полупроводниковых структур, позволил получить следующие результаты.

ВАХ вольфрамoxidной керамики различных составов (рис.1) имеет ярко выраженный нелинейный характер в области напряженности поля 10 КВ/м. По результатам расчетов коэффициент нелинейности образцов находится в районе 6.

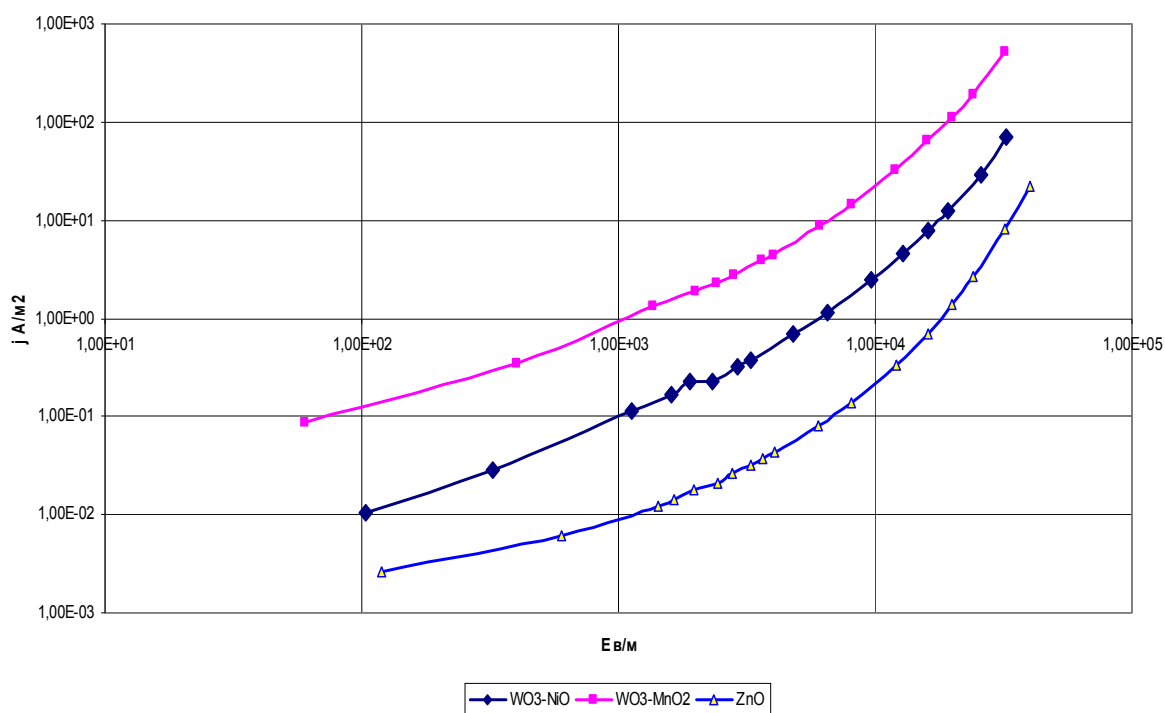


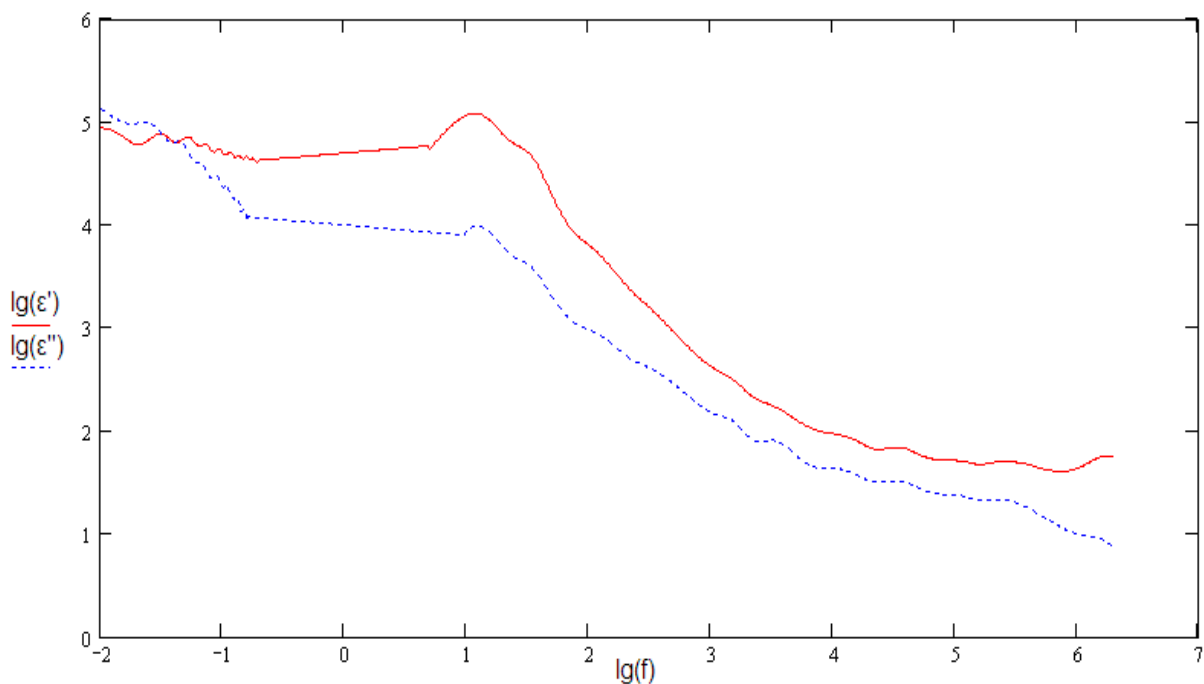
Рисунок 1 – ВАХ вольфрамoxidной керамики различных составов в сравнении с оксидноцинковой керамикой

Импульсная ВАХ вольфрамoxidной керамики различных составов позволяет по наклону линейного участка ВАХ определить удельную электропроводность зерна WO₃. Получены оценки $\sigma_g = 0,16-0,19 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

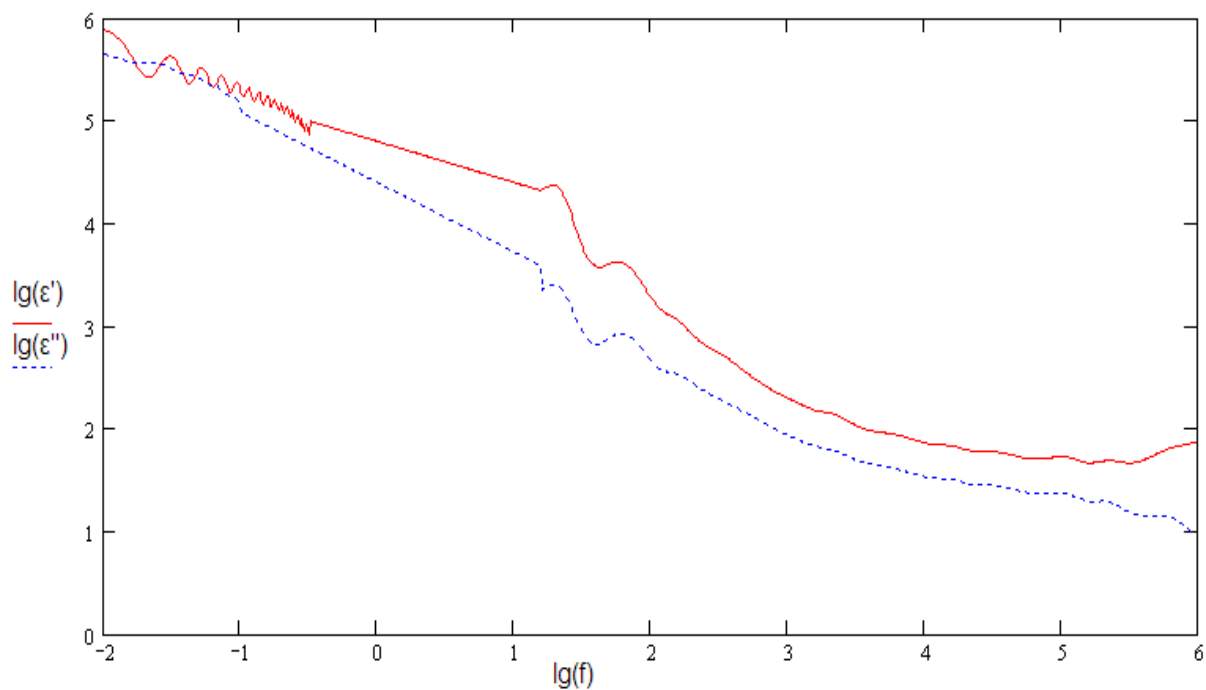
Как видно из рис.2, частота релаксации $f_p < 10^{-3}$ Гц для образцов всех составов. На рис.2 приведена также область диэлектрической дисперсии в диапазоне 10^{-4} - 10^8 Гц. При этом полученные частотные зависимости ε'' могут рассматриваться как продолжение в область ИНЧ низкочастотной диэлектрической дисперсии, наблюдаемой в диапазоне $f < 10^4$ Гц, и связываться с поляризационными процессами в приповерхностных областях кристаллитов. По аналогии с оксидно-цинковой керамикой рост коэффициента диэлектрических потерь $\varepsilon''(f)$ в диапазоне ИНЧ может быть связан с захватом электронов из проводящих кристаллитов керамики на поверхностные электронные состояния (ПЭС).

Спектр КДП имеет минимум три дисперсионные области. Высокочастотная дисперсионная область, которая обусловлена процессами максвелловского разделения свободных носителей заряда в полупроводниковых кристаллитах керамики, находится в диапазоне $f > 10^8$ Гц и выходит за пределы исследованного частотного диапазона. Наиболее вероятным механизмом, ответственным за низкочастотную область диэлектрической дисперсии в диапазоне низких $f < 10^4$ Гц и ИНЧ, являются представления о перезарядке электронных ловушек на поверхности и в приповерхностной области полупроводниковых кристаллитов [2, 3].

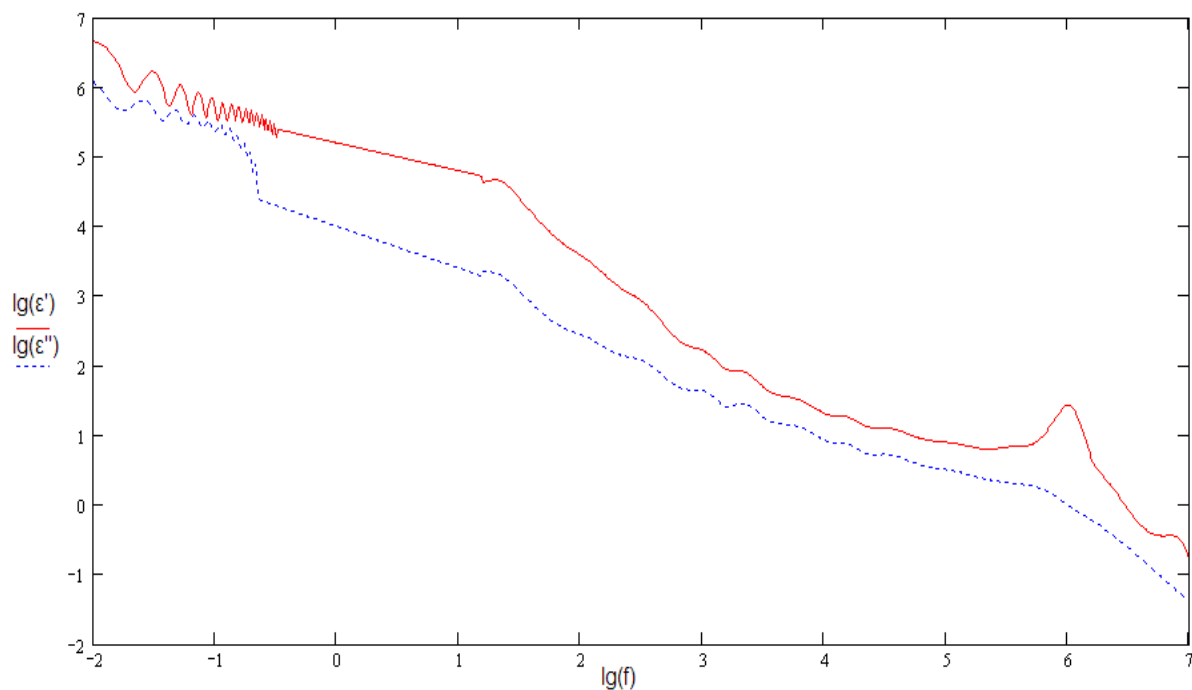
Область диэлектрической дисперсии в диапазоне 10^4 - 10^8 Гц наблюдается также и в других варисторных керамиках, например оксидно-цинковой. Как показано в [4], наиболее вероятной причиной ее может быть тепловая электронная поляризация в межкристаллитной фазе.



а) образец состава $WO_3+0.5Na_2O+0.5Al_2O_3+3.0MnO_2$



б) образец состава $\text{WO}_3+0.5\text{MnO}_2+0.5\text{Na}_2\text{O}+\text{NiO}$



в) образец состава $\text{WO}_3+0.5\text{Na}_2\text{O}+0.5\text{MnO}_2+0.5\text{Al}_2\text{O}_3$

Рисунок 2 – Зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от частоты для различных составов вольфрамoxidной керамики

По измеренным данным был выполнен расчет зависимости емкости образцов вольфрамoxidной керамики от частоты (рис.3). Как видно, емкость образцов имеет возрастающий характер с понижением частоты и максимум в диапазоне инфранизких частот, а также резкое снижение емкости за диапазоном 1 МГц.

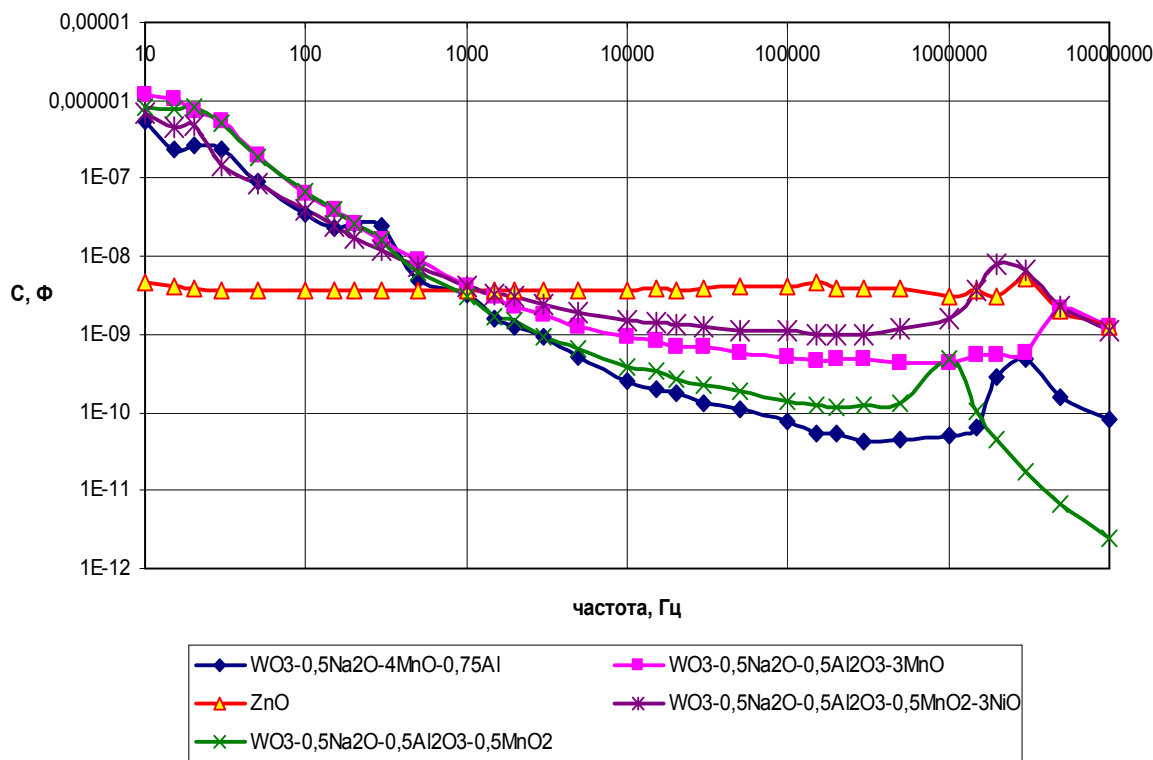


Рисунок 3 – Зависимости емкости образцов вольфрамоксидной керамики от частоты

Температурная зависимость проводимости образцов керамики (рис.4) позволила вычислить высоту межкристаллитного потенциального барьера, который составил 0.15 эВ.

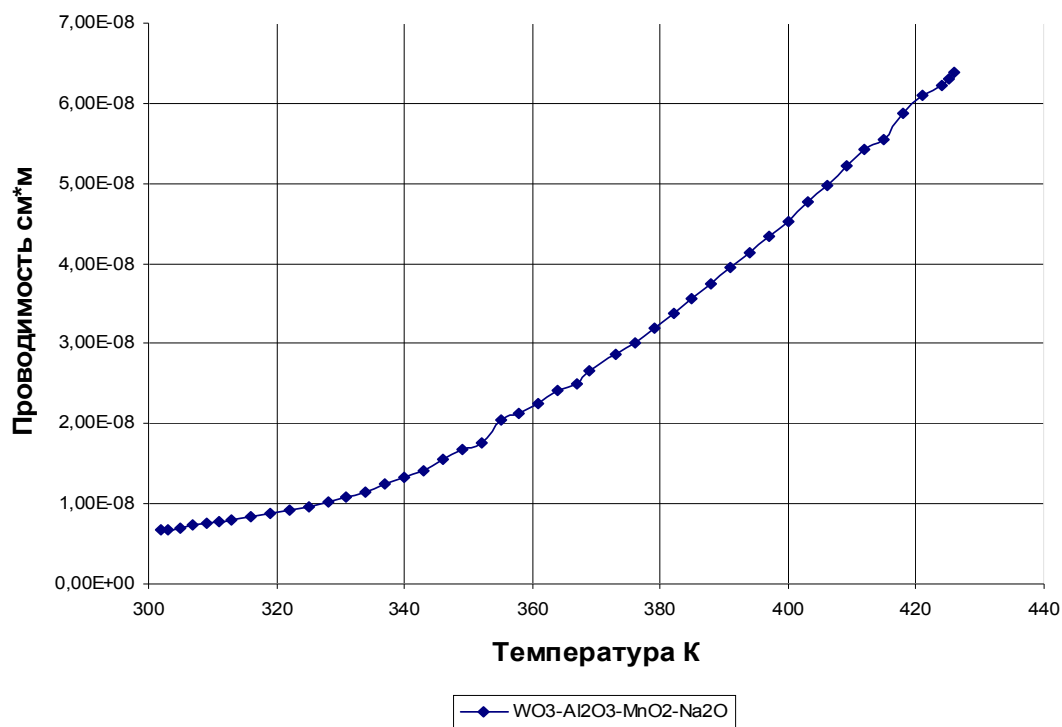


Рисунок 4 – Температурная зависимость проводимости керамики состава WO₃-Al₂O₃-MnO₂-Na₂O

Выводы. Получены графики зависимости электропроводности, комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)($\epsilon' - j\epsilon''$) и температурной зависимости проводимости керамики. Определена удельная электропроводность зерна WO_3 , которая составила $\sigma_g = 0,16-0,19 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Определена зависимость емкости варисторов от частоты на основе WO_3 . Вычислены коэффициенты нелинейности ВАХ для различных составов варисторной керамики $\beta = 5.3 \sim 7.3$ и высоты межкристаллитного потенциального барьера. На спектре КДП обнаружены минимум три дисперсионные области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В.О. Нелинейность электрических свойств керамик на основе оксида вольфрама // Неорганические материалы. – 1997. – Т.33. – №10. – С.1273-1275.
2. Тонкошкур А.С., Прошкин Ю.А., Черненко И.М. Автоматизация измерений физических параметров оксидно-цинковых варисторов // Электронная техника. Сер.5: Радиодетали и радиокомпоненты. – 1992. – №1(86). – С.28-31.
3. Makarov V.O., Tonkoshkur A.S., Gomilko I.V. Investigation of Electronic Processes at the Grain Boundaries of a Multilayer Varistor // Proc. 5th Conference and Exhibition of the European Ceramic Society. – Part 2. – Versailles (France). – 1997. – P.1309-1312.
4. Авдеенко Б.К., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. О природе диэлектрических потерь в нелинейной оксидно-цинковой керамике на радиочастота. // Диэлектрики и полупроводники: Респ. межвед. н.-т. сб. – К.:В.шк., 1981. – № 20. – С.3-6.
5. Тонкошкур О.С., Тристан О.М. Компонентна база РЕА. – Дніпродзержинськ.: ДДТУ. – 2004. – 242с.

УДК 621.316.826

ТРИСТАН О.Н., ст. преподаватель
КАЧУРА А.В., ст. преподаватель

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ VO_2

Створена математична модель напівпровідникових керамічних елементів на основі VO_2 для дослідження розподілу електричного зміщення і електричного потенціалу на основі методу кінцевих елементів у напівпровідниковій і металевій фазах. Використовуючи електротеплову аналогію, можна визначати температурне поле у об'ємі елемента.

Создана математическая модель полупроводниковых керамических элементов на основе VO_2 для исследования распределения электрического смещения и электрического потенциала на основе метода конечных элементов в полупроводниковой и металлической фазах. Используя электротепловую аналогию, можно определять температурное поле в объеме элемента.

In article was founded mathematics model semiconductors ceramics element on a basis VO_2 for investigate distributives fields and electric potential on a basis of method final elements in semiconductors and metallic phases. Usage of electrowarm analogist can defined temperature fields in volume of an elements.

Введение. Диоксид ванадия (VO_2) имеет фазовый переход металл-полупроводник при температуре $T=340 \text{ К}$, при котором скачком изменяются параметры материала, в

первую очередь сопротивление. Это свойство используется для синтеза материала, который используют для изготовления элементов в различных устройствах [1-3].

Керамические материалы на основе VO_2 способны выдерживать токи до 10 А/см^2 . При переходе из полупроводниковой фазы в металлическую возникает канал тока. Неравномерное распределение тока по сечению элемента и соответственно температуры, может привести к его разрушению. Для предотвращения этого необходимо знать распределение температуры по объему элемента и правильно выбрать конструкцию. Т.е. актуальной является задача определения распределения температуры в объеме образца. Ранее были созданы двухмерные и трехмерные математические модели на основе метода конечных элементов (МКЭ) [4] в полупроводниковой фазе [5,6].

Постановка задачи. Целью работы является определение электрофизических свойств элемента на основе VO_2 в полупроводниковой и металлической фазах с использованием метода конечных элементов для расчета температурного поля.

Элементы на основе VO_2 изготавливались по керамической технологии [5]. Исследуемые образцы имели цилиндрическую форму диаметром 12 мм и высотой от 1 до 10 мм. Для определения характеристик элемента было использовано компьютерное моделирование распределения напряженности электрического поля в статических режимах. Внешний вид элемента, а также его дискретная модель показаны на рис.1, 2 соответственно.

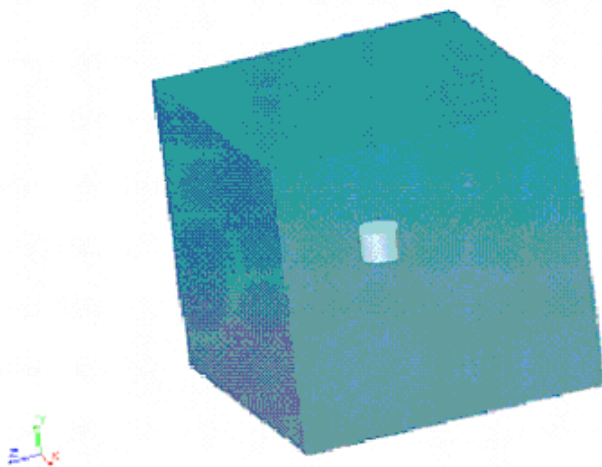


Рисунок 1 – Исследуемый элемент, окруженный воздушной средой

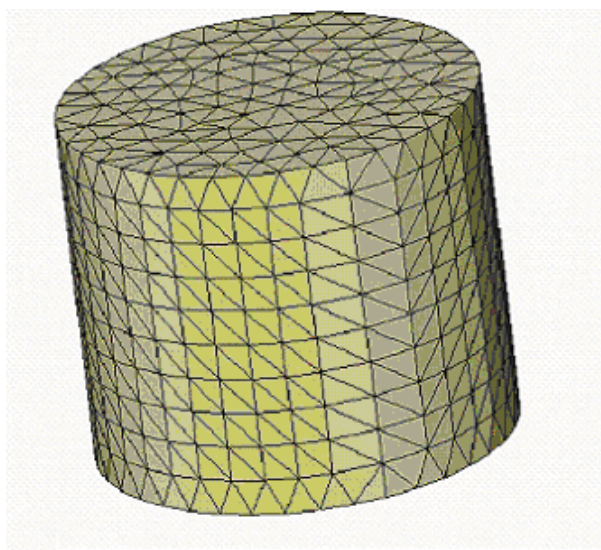


Рисунок 2 – Дискретная модель элемента на основе VO_2

Пользуясь теоремой Гаусса, зависимость между вектором электрического смещения и объемной плотностью заряда в дифференциальной форме имеет вид:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad (1)$$

где \vec{D} – вектор электрического смещения;
 ρ – объемная плотность заряда.

В том случае, когда среда однородная и изотропная ($\epsilon_a = \text{const}$), уравнение (1) можно записать как:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_a}, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля;
 ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая тот факт, что напряженность электрического поля может быть представлена как

$$\vec{E} = -\operatorname{grad}(\varphi),$$

где φ – электрический потенциал, уравнение (2) примет вид:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad}(\varphi) = -\frac{\rho}{\epsilon_a}. \quad (3)$$

В общепринятой форме записи уравнение (3) можно представить как:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_a}. \quad (4)$$

В расчетах предполагалось, что среда однородная и изотропная, т.е. $\epsilon_a = \text{const}$. В этом случае в декартовой системе координат уравнение Пуассона имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_a \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_a \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_a \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -\rho, \quad (5)$$

где x, y, z – координаты исследуемого объекта.

Уравнение (5) связано с исследованием трехмерной полевой задачи. Алгоритм решения данной задачи с использованием МКЭ имеет вид, представленный в [6].

В расчетах предполагалось, что к поверхности исследуемого образца приложено постоянное напряжение 200 В.

Результаты работы. В результате моделирования получены графики объемного распределения электрического потенциала в полупроводниковой фазе и объемного распределения вектора электрического смещения в металлической фазе (рис.3).

Физическая общность математического описания процессов переноса тепла и заряда базируется на тепловой аналогии теплота – электричество [7]: тепловой поток – ток; плотность потока – плотность тока; температура – потенциал; градиент температуры – градиент потенциала; тепловое сопротивление – сопротивление; теплоемкость – емкость; интегральным параметрам теплообмена $Q(T)$ соответствуют электрические параметры $I(U)$, где Q – заряд; T – температура; I – ток; U – напряжение.

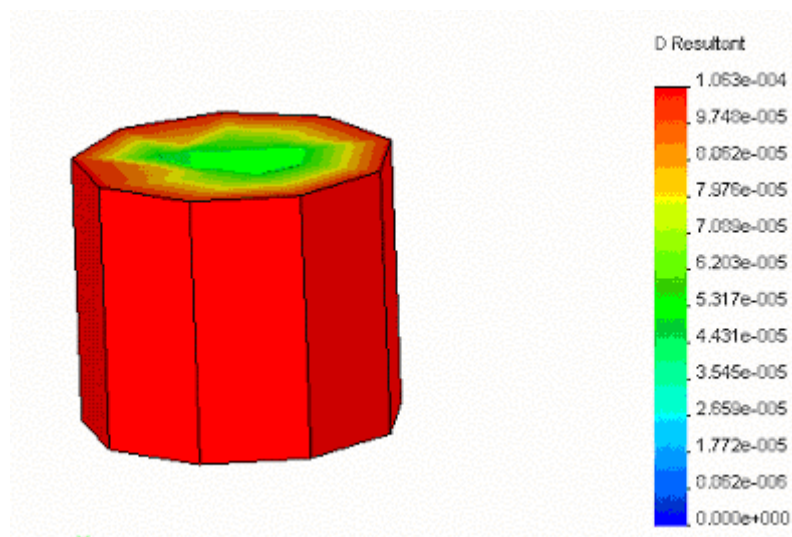


Рисунок 3 – График объемного распределения вектора электрического смещения в металлической фазе

Выводы. 1. В результате моделирования создана программа, которая позволяет исследовать полупроводниковые структуры на основе VO_2 методом конечных элементов с учетом электрофизических процессов.

2. Модель позволяет исследовать электрофизические процессы в элементах на основе VO_2 по распределению вектора электрического смещения, вектора напряженности электрического поля, электрического потенциала в полупроводниковой и металлической фазах.

3. Так как процессы переноса тепла (тепловой энергии) и переноса электрического заряда подобны, то, пользуясь электротепловой аналогией, можно определить значения объемного распределения температурного поля в элементах на основе VO_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 116с.
2. Тристан О.Н. Защита ламп накаливания от тока включения керамическими элементами на основе диоксида ванадия. // Тезисы докладов 1-й Украинской научной конференции по физике полупроводников (с международным участием). – Одесса. – 2002. Том 2. – С.174-175.
3. Тристан О.Н. Устройство задержки импульсных сигналов элементами на основе VO_2 // Материалы 9-й Международной конференции «Физика и технология тонких пленок». – Ивано-Франковск. 2003. Том 2. – С.128-129.
4. Цыбенко А.С., Ващенко Н.Г., Кришук Н.Г., Лавендел Ю.О. Автоматизированная система обслуживания конечно-элементных расчетов. – К.: Вища школа, 1986. – 251с.
5. Тристан О.Н., Качура А.В., Сянов А.М. Моделирование термочувствительных элементов на основе диоксида ванадия // Материалы 10-й Международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2004)». – Санкт-Петербург. 2004. – С.380-382.
6. Тристан О.М., Качура О.В., Сянов О.М. Моделювання фізичних властивостей напівпровідникових матеріалів на основі VO_2 методом скінчених елементів. – Нові технології: Науковий вісник інституту економіки та нових технологій. – 2004. – №3(6). – С.56-60.
7. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.:Энергоатомиздат, 1990. – 576с.

Дніпродзержинський державний технічний університет

УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

Алгоритм керування тепловим режимом доменної плавки, що включає автоматизований контроль достовірності інформації, компенсацію коливання параметрів шихти, адаптивний прогноз і стабілізацію хімічного складу та температури чавуну при неповній інформації про параметри процесу.

Алгоритм управления тепловым режимом доменной плавки, включающий автоматизированный контроль достоверности информации, компенсацию колебаний параметров шихты, адаптивный прогноз и стабилизацию химического состава и температуры чугуна при неполной информации о параметрах процесса.

Algorithm of management a heat of a blast furnace melt, including automated control of reliability of the information, indemnification of fluctuations of parameters of charge, the adaptive forecast and stabilization of a chemical compound and temperatures of pig-iron at the incomplete information on parameters of process.

Вступ. Стан теплового режиму доменної плавки визначається температурою чавуну, вмістом у ньому кремнію, вуглецю і сірки (відповідно t_c , Si , c_c , S). Коливання цих параметрів впливає на техніко-економічні показники плавки (якість чавуну, питому витрату енергоносіїв, продуктивність плавки). Тому основна задача керування полягає в прогнозуванні та стабілізації цих параметрів. На теперішній час ця задача остаточно не розв'язана. Це пояснюється тим, що тепловий режим доменної плавки є складною функцією множини аргументів – параметрів технологічного процесу та комплексних його показників, які визначаються з недостатньою точністю [1].

Постановка задачі. Розробити алгоритм керування тепловим режимом доменної плавки в умовах не завжди достовірної або відсутності інформації про деякі основні технологічні параметри (склад колошникового газу, температуру фурменних вогнищ, температуру в печі та периферійну температуру шахти, хімічний склад та кількість шихтових матеріалів і палива тощо).

Результати роботи. Розроблено удосконалений алгоритм контролю та керування тепловим режимом доменної плавки, який може забезпечити функціонування системи в умовах не завжди достовірної або відсутності інформації про деякі параметри. Датчики інформації обпитуються з частотою 1 раз за 30 с. Інформація усереднюється за час між випусками чавуну через кожні 10 хв. після випуску чавуну. Допустимі похибки інформації про основні технологічні параметри повинні вміщатися в наступних границях: витрата дуття ± 10 м³/хв.; витрата технологічного кисню ± 50 м³/год.; витрата природного газу ± 50 м³/год.; концентрація кисню в технологічному кисні $\pm 0,90\%$; вологість дуття $\pm 1,5$ г/ м³; маса рудної частини шихти в подачі ± 50 кг; маса вапняку в подачі ± 18 кг; винос колошникового пилу з подачі ± 50 кг; вміст заліза в рудній частині шихти $\pm 0,10$ %; вміст золи в коксі $\pm 1,0$ %; час сходу n подач шихти за годину ± 10 с; кількість подач за годину $\pm 0,02$; вміст CO, CO₂, H₂ в колошниковому газі $\pm 0,017$ %.

Достовірність інформації перевіряють в темпі реального часу, використовуючи математичну модель колошникового газу [2]. Якщо інформація достовірна, то формують базу даних. Якщо інформація не достовірна, то формують базу даних тільки за

достовірною інформацією, визначають похибки інформації і приймають заходи щодо їх усунення.

За достовірною інформацією алгоритм керування полягає в наступному. Математична модель залежності якості чавуну Y_j (S_i , S , c_w , t_i) представлена рівняннями множинної регресії, аргументами x_i в яких являються: відношення залізо/вуглець в шихтових матеріалах; прогнозний склад шлаку, що утворюється з шихтових матеріалів, які завантажуються у піч; комплексні показники, які відображають прихід тепла у нижню частину печі, кількість газифікованого вуглецю тощо [1]. За допомогою алгоритму ідентифікації корегуються коефіцієнти цих моделей і забезпечується висока точність прогнозу якості чавуну.

Алгоритм прогнозу та стабілізації якості чавуну при ідентифікації математичної моделі кореляційно-регресійним методом полягає у наступному. За ковзний період часу 10 ... 50 випусків чавуну визначають рівняння множинної регресії залежності складу та температури чавуну Y_j від перелічених аргументів x_i :

$$Y_j(t) = b_{0j} + \sum_{i=1}^n b_{ij} \cdot x_i(t - \tau_i), \quad (1)$$

де τ_i – час зсуву значень відповідних аргументів від поточного часу;

b_{0j} – значення вільного члена відповідного рівняння.

У ці рівняння підставляють поточні значення аргументів x_i з відповідним зсувом у часі τ_i і визначають прогнозні значення $Y_{jпр}$. При відхиленні прогнозних значень якості чавуну Y_j від заданих визначають регулюючі дії. За значенням коефіцієнта множинної кореляції контролюють адекватність моделі реальному процесу.

Алгоритм реалізують у такий спосіб. З усередненої інформації про масу компонентів шихти та коксу у подачі, винос колошникового пилу, їхній хімічний склад, кількість подач шихти, що завантажуються в піч за календарну годину, час сходу шихти одної подачі обчислюють прогнозний склад шлаку: $(MgO)_{ш}$; $(SiO_2)_{ш}$; $(CaO)_{ш}$; $(Al_2O_3)_{ш}$; його основність $B_m = (CaO)_{ш} / (SiO_2)_{ш}$; кількість заліза ΣFe , вуглецю ΣC та їх відношення $\Sigma Fe / \Sigma C$. З усередненої інформації про витрату дугтя, природного газу, пилувугільного палива, пари на зволоження дугтя, технологічного кисню, температуру дугтя, його вологість та вміст у ньому кисню, вихід колошникового газу та вміст у ньому CO , CO_2 і H_2 , винос колошникового пилу визначають значення комплексних показників T_n , M_n , $C_{чф}$, P_m , θ_n , W , ΔM_0 тощо [1].

Формують ковзний масив інформації за 10 ... 50 випусків чавуну про такі параметри: температура чавуну (Y_1), вміст у чавуні кремнію (Y_2), вуглецю (Y_3) та сірки (Y_4); усереднені за 3 години та зсунуті назад на 1 годину від кінця випуску комплексні показники; усереднені за 3 години і зсунуті на 10 годин значення B_m , $(MgO)_{ш}$, $(Al_2O_3)_{ш}$, $(SiO_2)_{ш}$, $(CaO)_{ш}$.

За інформацією із ковзного масиву вираховують значення коефіцієнта парної кореляції залежності Y_j від перелічених комплексних показників. Вибирають комплексний показник, що має максимальний за модулем коефіцієнт парної кореляції зі складом чи температурою чавуну. Цей показник використовують для визначення рівнянь множинної регресії (1).

Визначають значення коефіцієнтів рівнянь множинної регресії залежності Y_j від комплексного показника (x_1) із максимальним модулем коефіцієнта кореляції, основності шлаку (x_2), вмісту у шлакові $(MgO)_{ш}$ (x_3) та $(Al_2O_3)_{ш}$ (x_4), відношення $\Sigma Fe / \Sigma C$ (x_5) та значення коефіцієнта множинної кореляції R_j цих залежностей. Якщо значення R_j перевищують величину 0,7, то їх порівнюють між собою і вибирають максимальне його значення R_{jmax} . Рівняння регресії з максимальним коефіцієнтом множинної кореляції

R_{jmax} використовують для прогнозування якості чавуну та визначення регулюючих дій. У це рівняння підставляють поточні (усереднені за кожні 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, ... хв. та за час між випусками чавуну) значення аргументів і визначають прогнозні значення параметру якості чавуну в наступному випуску:

$$Y_{jnp}(t + \tau) = b_{0j} + \sum_{i=1}^n b_{ij} \cdot x_i(t - \tau_i), \quad (2)$$

де τ – час прогнозування (1-3 год.); τ_i – час зсуву значень відповідних аргументів по відношенню до поточного часу. Отже для прогнозування спочатку використовуються аргументи усереднені за 10 хв., потім за 20, 30, 40 хв. і з нарощуванням часу усереднення через кожні 10 хв. до кінця періоду між випусками.

Після випуску чавуну формується новий масив за 10 ... 50 випусків усередненої інформації, за якою визначається скорегована математична модель залежності Y_j , за якою прогнозують якість чавуну в наступному випуску.

Визначають різниці між прогнозними та заданими значеннями параметрів якості чавуну $Y_{jз}$

$$\Delta Y_j = Y_{jnp} - Y_{jз}$$

та рекомендації на зміну вологості дуття чи витрати пиловугільного палива.

Після кожного випуску порівнюється значення Y_{jnp} з реальним значенням $Y_{jр}$ і визначається різниця

$$\Delta Y_j = Y_{jnp} - Y_{jр},$$

за якою оцінюють якість прогнозування – керування.

Прогнозування якості чавуну наперед на 5-7 годин здійснюють таким чином. За інформацією із ковзного масиву визначають рівняння множинної регресії залежності $Y(\tau_i)_j$ від аргументів x_i : ΔM_o – зміна приходу тепла в зону непрямого відновлення [1] ($\tau_i = 0$ год.); складу шлаку і основності шлаку ($\tau_i = 4$ год.); температури в шахті печі ($\tau_i = 0$ год.)

$$Y_j(t + \tau_1) = b_{0j} + \sum_{i=1}^n b_{ij} \cdot x_i(t - \tau_i), \quad (3)$$

де τ_1 – час прогнозування (5-7 год.);

x_i – аргументи: ΔM_o , $V_{т}$, $(MgO)_{ш}$, $(CaO)_{ш}$, $(\Sigma Fe/\Sigma C)$, $(Al_2O_3)_{ш}$, $(SiO_2)_{ш}$, $T_{ш}$.

За рівнянням множинної регресії з максимальним значенням коефіцієнта кореляції $R(\tau_i)_{jmax}$ визначають прогнозні значення складу та температури чавуну через 5-7 годин.

Регулюючі дії по стабілізації якості чавуну на основі прогнозу на 5-7 годин визначають у такий спосіб. Вираховують відхилення прогнозних значень параметрів якості чавуну від заданих.

Якщо $|\Delta Si| \geq 0,15 \%$; $|\Delta S| \geq 0,015 \%$; $|\Delta t| \geq 20^\circ C$, то визначають керуючі дії на зміну маси коксу у подачі або витрату пиловугільного палива.

Надійність прогнозу параметрів якості чавуну контролюють за значенням коефіцієнта множинної кореляції R_j . Якщо значення коефіцієнта кореляції для усіх рівнянь регресії знаходяться у границях 0,7...0,8, то надійність прогнозу є задовільною. У такому випадку система видає рекомендації на зміну витрати пиловугільного палива, вологості дуття або маси коксу у подачі. Ці рекомендації виконують з урахуванням стану технологічного процесу. Якщо модулі коефіцієнта кореляції перевищують величину 0,8, то видають керуючі дії на виконавчі механізми регуляторів вологості дуття, витра-

ти пиловугільного палива та маси коксу у подачі. Якщо модулі коефіцієнта кореляції для усіх рівнянь регресії менші величини 0,6, видається команда на перевірку стану АСУ ТП. У таких випадках перевіряють справність комплексу технічних засобів системи, вірогідність інформації про параметри процесу.

Ідентифікацію математичної моделі алгоритмом Качмажа реалізують таким чином [3]. За вихідну математичну модель приймають рівняння множинної регресії (1) з високим значенням коефіцієнта множинної кореляції. Після отримання інформації про склад та температуру чавуну чергового випуску за цією моделлю вираховують значення параметрів якості чавуну Y_{jk} , порівнюють їх із фактичними Y_{jp} і вираховують різницю $\Delta Y_{jk} = Y_{jkпр} - Y_{jp}$.

Якщо $|\Delta Si| \geq 0,05 \%$; $|\Delta S| \geq 0,005 \%$; $|\Delta t| \geq 5^\circ\text{C}$, то кутові коефіцієнти моделі (1) корегують алгоритмом Качмажа:

$$b_{ij,(m+1)} = b_{ij,m} + \Delta Y_j \cdot x_{i,m} / \sum_{i=1}^n x_{i,m}^2, \quad (4)$$

де $b_{ij,(m+1)}$ – значення i -го коефіцієнта j -го рівняння регресії на $(m+1)$ ступені ідентифікації; $b_{ij,m}$ – значення того ж коефіцієнта на m - ступені ідентифікації.

Результати перевірки адаптивних алгоритмів. З інформації про роботу доменної печі ДМК за декілька періодів по 10-15 діб визначили прогностні значення температури чавуну та вмісту у ньому кремнію і сірки за ковзними рівняннями регресії за 20 випусків чавуну та з використанням алгоритму Качмажа. Точність прогнозу більш висока при ідентифікації математичної моделі алгоритмом Качмажа. Середньоквадратичні відхилення прогностних значень параметрів якості чавуну від фактичних знаходяться у границях: за вмістом кремнію у чавуні 0,071...0,085%; за вмістом сірки – 0,005...0,009%; за температурою чавуну 16...27⁰С.

Точність прогнозу не покращувалася, а іноді погіршувалася при включенні у рівняння залежності параметрів якості чавуну таких аргументів, як Fe/C , B_m , $(Al_2O_3)_{ш}$, $(MgO)_{ш}$. Це свідчить про невисоку достовірність інформації про параметри шихти. Спостерігалася висока точність прогнозу температури чавуну та вмісту у ньому кремнію і сірки за допомогою тільки комплексних показників.

За недостовірною інформацією про склад колошникового газу необхідно додатково контролювати: температуру в шахті за допомогою спеціальних зондів $T_{пг}$; периферійну температуру шахти печі $T_{ш}$ за допомогою термопар, які установлюють у вогнетривкій кладці на декількох горизонтах; температуру фурменних вогнищ $T_{\phi i}$ [4]. В цьому випадку ковзні рівняння множинної регресії залежності параметрів якості чавуну $Y_{2,j}$ визначають від B_m , $(MgO)_{ш}$, $(CaO)_{ш}$, $(\Sigma Fe/\Sigma C)$, $(Al_2O_3)_{ш}$, $(SiO_2)_{ш}$, $T_{ш}$, T_{ϕ} , $T_{пг}$, θ_n , W , а рівняння прогнозу мають вигляд:

$$Y_j(t+2) = a_j + b_{j1}T_n(t) + b_{j2}T_n(t-8) + b_{j3}T_{\phi}(t) + b_{j4} T_{ш}(t) + b_{j5} T_{ш}(t-8) + b_{j6} (Al_2O_3)_{ш}(t-10) + b_{j7} (MgO)_{ш}(t-10) + b_{j8} B_m(t-10) + b_{j9} (\Sigma Fe/\Sigma C)_{ш}(t-10);$$

$$Y_j(t+7) = a_j + b_{j1}T_n(t) + b_{j2}T_{\phi}(t) + b_{j3} T_{ш}(t) + b_{j4} (Al_2O_3)_{ш}(t-2) + b_{j5} (MgO)_{ш}(t-2) + b_{j6} B_m(t-2) + b_{j7} (\Sigma Fe/\Sigma C)_{ш}(t-2).$$

У випадку відсутності інформації про температуру в шахті, периферійну температуру шахти печі та температуру фурменних вогнищ ковзні рівняння множинної регресії визначають від аргументів B_m , $(MgO)_{ш}$, $(CaO)_{ш}$, $(\Sigma Fe/\Sigma C)$, $(Al_2O_3)_{ш}$, $(SiO_2)_{ш}$, θ_n , W , а рівняння прогнозу мають вигляд:

$$\begin{aligned}
Y_j(t+2) &= a_j + b_{j1} (Al_2O_3)_{ш} (t-10) + b_{j2} (MgO)_{ш} (t-10) + b_{j3} B_m (t-10) + \\
&+ b_{j4} (\Sigma Fe/\Sigma C)_{ш} (t-10) + b_{j5} \theta_n (t) + b_{j6} W (t) ; \\
Y_j(t+7) &= a_j + b_{j1} (Al_2O_3)_{ш} (t-2) + b_{j3} (MgO)_{ш} (t-2) + b_{j4} B_m (t-2) + b_{j5} (\Sigma Fe/\Sigma C)_{ш} (t-2).
\end{aligned}$$

У всіх випадках керування стабілізують питому витрату вуглецю, основність шлаку, компенсують витрату тепла на розкладання вапняку в печі, коливання рівня засипання матеріалів у печі та коливання приходу тепла в зону непрямого відновлення.

Для стабілізації питомої витрати вуглецю визначають продуктивність доменної печі $P_{м,ш}$, (кг чавуну/хв.), витрату вуглецю $C_{ш}$ (кг/хв.) та питому витрату вуглецю $C_{шш} = C_{ш}/P_{м,ш}$ (кг/кг чавуну) [5]. Із бази даних визначають ковзне рівняння регресії та коефіцієнт кореляції залежності Y_j від $C_{шш}$. За рівнянням регресії з максимальним значенням коефіцієнта кореляції та заданими значеннями складу чавуну і його температури визначають оптимальне значення $C_{шш,оп}$.

Визначають різницю $\Delta C_{шш} = C_{шш} - C_{шш,оп}$. Якщо $\Delta C_{шш} \neq 0$, то розраховують рекомендацію на зміну маси коксу у подачі

$$\Delta K = \Delta C_{шш} P_{м,ш} t_n / c_k, \text{ кг/под.}$$

Стабілізацію основності шлаку здійснюють зміною маси вапняку у подачі. Якщо значення $B_r \neq B_{зад}$ (заданій основності), то визначають потрібну кількість вапняку у подачі:

$$I_n = \frac{\Sigma CaO - 0,51I - B_{зад} \Sigma SiO_2}{0,51}, \text{ кг,}$$

де I – маса вапняку у подачі, кг.

Для стабілізації основності шлаку визначають рекомендацію на зміну маси вапняку в подачі:

$$\Delta I = I_n - I, \text{ кг/под.}$$

Визначають також зміну маси коксу в подачі для компенсації витрати тепла на розкладання вапняку в печі:

$$\Delta K_u = 0,35 \Delta I, \text{ кг/под.}$$

Якщо рівень засипання матеріалів у печі знижується від заданого на величину, що перевищує 1 м (Δh), то визначають компенсуючу зміну маси коксу у подачі:

$$\Delta K_h = 0,0069 \Delta h \cdot C, \text{ кг/под,}$$

де C – кількість чавуну, що виплавляється із шихти одної подачі, кг.

Контролюють коливання приходу тепла в зону непрямого відновлення за допомогою комплексного показника (ΔM_o , кДж/м³O_ш) [1]. Для його компенсації визначають зміну маси коксу у подачі (кг/под):

$$\Delta K_1 = \frac{-\Delta M_o \cdot O_{шш}}{2,67 \cdot c_k (5250 + 12648 \eta_{co})},$$

де $O_{шш}$ – кількість газифікованого кисню шихти одної подачі [1], кг;

η_{co} – міра використання оксиду вуглецю, частка одиниці.

Визначають загальну зміну кількості коксу у подачі:

$$\Delta K_{\Sigma} = \Delta K_c + \Delta K_u + \Delta K_h + \Delta K_1.$$

Висновки. Розроблено алгоритм контролю та керування тепловим режимом доменної плавки, що включає автоматизований контроль достовірності інформації про технологічні параметри, компенсацію коливання параметрів шихти, витрати тепла на розкладання води в печі, яка поступає від прогару холодильників та фурм, стабілізацію теоретичної температури горіння, адаптивний прогноз і стабілізацію хімічного складу та температури чавуну при неповній інформації про параметри процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Довгалюк Б.П. АСУ ТП доменної печі. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1998. – 170с.
2. Довгалюк Б.П. Інформаційне забезпечення АСУ ТП доменної печі // Вісник Технологічного університету Поділля. Наук. журнал. – Хмельницький, 2002. – Том 1. – С.91-95.
3. Основы управления технологическими процессами. Под редакцией Н.С. Райбмана /С.А.Анисимов, В.Н.Дынькин, А.Д.Касавин и др. – М.: Наука, 1978. – 440с.
4. Довгалюк Б.П. Використання інформації про температуру в доменній печі в АСУ ТП. // Труды Международной конференции по управлению “Автоматика 2002”. – Донецк, 2002. – С.78-83.
5. Довгалюк Б.П., Чумаченко С.С. Автоматизований контроль та керування витратою вуглецю на доменну плавку // Матеріали сьомої міжнар.наук.-техн.конф. (КУСС-2003), м. Вінниця, 8-11 жовтня 2003 р. – Вінниця: “Універсум-Вінниця”, 2003. – С.97-99.

УДК 004.031.43:681.5:658.5(078)

ПАВЛЮЧЕНКОВ І.А., д.т.н., професор
ЛИТВИН А.І., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Розглянуто загальні питання побудови складних модельних інформаційних систем керування (динамічних тренажерів) різними технологічними процесами виробництва на базі об'єктно-орієнтованих інструментальних систем класу SCADA.

Рассмотрены общие вопросы построения сложных модельных информационных систем управления (динамических тренажеров) различными технологическими процессами производства на базе объектно-ориентированных инструментальных систем класса SCADA.

The general questions of construction of complex modelling information control systems (dynamic simulators) by various technological processes of manufacture on the basis of object-oriented tool systems of class SCADA are considered.

Введение. В современных экономических условиях, когда даже мелкий ремонт грозит превратиться в неразрешимую проблему, цена ошибок оперативного персонала производств со сложным технологическим оборудованием многократно возрастает.

Особую важность приобретает качественное обучение и постоянное поддержание квалификации и готовности персонала, его противоаварийные тренировки. Компьютерный эксперимент на базе тренажеров систем позволяет не только сформировать моторно-рефлекторные навыки действий в сложных ситуациях, но и наглядно показать физическую сущность протекающих в оборудовании процессов, их взаимную зависи-

мость, а также ряд существенных тонкостей, которым, к сожалению, не всегда придается значение на практике.

Тренажеры могут также оказать неоценимую помощь при анализе аварий, как с точки зрения накопления статистики, так и путем проведения машинного эксперимента по воспроизведению аварийной ситуации.

Ситуация на рынке компьютерных тренажеров сохраняется: он перенасыщен различными экзаменаторами, а вот тренажеров по сложному технологическому оборудованию по-прежнему мало.

Постановка задачи. Выработать единые принципы построения динамических тренажеров сложных технологических систем с позиций обеспечения полного пакета функций управления, свойственных реально действующим (планируемым к использованию) автоматизированным системам управления (АСУ).

Обосновать выбор эффективного инструментария для решения задач по созданию тренажеров динамического типа, реализующих принципы, идеологию и методологию создания АСУ.

Результаты работы. Чаще всего рассматривают следующие типы компьютерных тренажеров:

1. *Электронный экзаменатор.* Основная функция – замена живого экзаменатора в строго регламентированных областях.

2. *Статические (или логико-динамические) тренажеры.* Характеризуются показами и проверками определенных, обычно жестко регламентированных действий, отсутствием физико-математических моделей процессов. Отсюда невозможность анализа при любом отклонении от сколь угодно сложной, но все равно жестко заданной цепочки действий, трудность программирования динамических эффектов (даже простого изменения показаний приборов). Эти недостатки несущественны в жестко регламентированных оперативных переключениях, например, в электрических сетях, но определяют невозможность моделирования сложных физических процессов в энергетических, металлургических и других сложных процессах и агрегатах.

3. *Динамические тренажеры.* Сохраняют целостность всей организационно-информационной структуры производства, имеют в своей основе математические модели реальных физических процессов и потому наиболее полезны для качественного анализа управленческих решений, принимаемых персоналом. Максимальное приближение к протекающим процессам, анализу событий, эффективности принимаемых управленческих решений достигается в системах реального времени.

4. *Пульты тренажеры.* В них, кроме компьютера, присутствует аппаратная часть (например, копия реального пульта управления объектом). На пульте могут быть представлены только основные приборы и органы управления (упрощенный тренажер), управление какой-либо частью, отдельной установкой (локальный тренажер); наконец, пульт может быть копией реального пульта управления (полномасштабный тренажер). Пульты тренажеры в основном нацелены на ознакомление персонала с конкретным оборудованием и на выработку соответствующих моторно-рефлекторных реакций и навыков. Отсюда недостаток: при изменениях (модернизации) оборудования или при переводе персонала на другой вид оборудования тренажер становится бесполезным.

В то же время, компьютерный динамический тренажер при правильном подходе учит думать, анализировать протекающие процессы и принимать оптимальные решения, вытекающие из требований повышения надежности систем диспетчерского управления. Одна из предпосылок появления нового подхода при разработке таких систем – ориентация на оператора/диспетчера и его задачи.

Именно динамические тренажеры как наиболее гибкие и адекватные программные системы и призваны решать такого рода задачи.

Существуют два различных подхода к изготовлению таких тренажеров:

1. Заключается в написании отдельной программы для каждого отдельного тренажера. Характеризуется возможностью получения красивых специальных эффектов, но модификация тренажера практически невозможна. При этом и программы и математические модели в них очень просты.

2. Использование специального инструментария разработчика (инструментальной системы разработки (ИСП)), который позволяет многократно ускорить разработку.

При использовании ИСП разработчиком тренажера должен быть не только и не столько программист, сколько технолог, владеющий аппаратом прикладной математики. Общее свойство большинства ИСП – составление динамической модели из «кубиков» – стандартных элементов, описывающих определенные объекты управления (ОУ) и стандартные математические операции, передаточные функции, логику.

ИСП, выполняющаяся по объектно-ориентированной технологии, обеспечивает удобный графический интерфейс как для персонала, так и для разработчика.

Модели состояются из стандартных объектов, каждый из которых имеет свое изображение, механизм управления и способ моделирования. Законченная модель представляет собой набор из нескольких окон, объединенных друг с другом по иерархическому принципу (главная мнемосхема – мнемосхемы отдельных узлов, панели защит, сигнализации и пр.), или по принципу циклического списка. В каждый отдельный момент на экране может быть видно одно или несколько окон.

Часть окон с управляемыми объектами составляют интерфейс динамического тренажера.

В настоящее время основным и наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами (процессами) являются SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных). SCADA-технологии позволяют достичь высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации.

Причем, полнота и наглядность представляемой на экране информации, доступность "рычагов" управления, удобство пользования подсказками и справочной системой и т. д. повышает эффективность взаимодействия диспетчера с системой и сводит к минимуму его критические ошибки при управлении.

В области применения автоматизированных систем контроля и управления (СКУ) можно выделить обобщенную схему их реализации в терминологии SCADA систем, представленную на рис.1.

Чаще всего это двухуровневые системы, на которых и осуществляется собственно управление технологическими процессами, включающие:

1. *Нижний уровень* – уровень объекта (контроллерный) – включает различные датчики для сбора информации о ходе технологического процесса, приводы и исполнительные механизмы для реализации регулирующих и управляющих воздействий. Датчики поставляют информацию локальным программируемым логическим контроллерам PLC (Programming Logical Controller). Причем информация в контроллерах предварительно обрабатывается и частично используется на месте, что существенно снижает требования к пропускной способности каналов связи.

Для сложных технологических систем контроллеры работают под управлением операционных систем реального времени (ОСРВ).

Информация с локальных контроллеров может направляться в сеть диспетчерского пункта непосредственно, а также через контроллеры верхнего уровня (рис.1). В зависимости от поставленной задачи контроллеры верхнего уровня (концентраторы, интеллектуальные или коммуникационные контроллеры) реализуют такие функции,

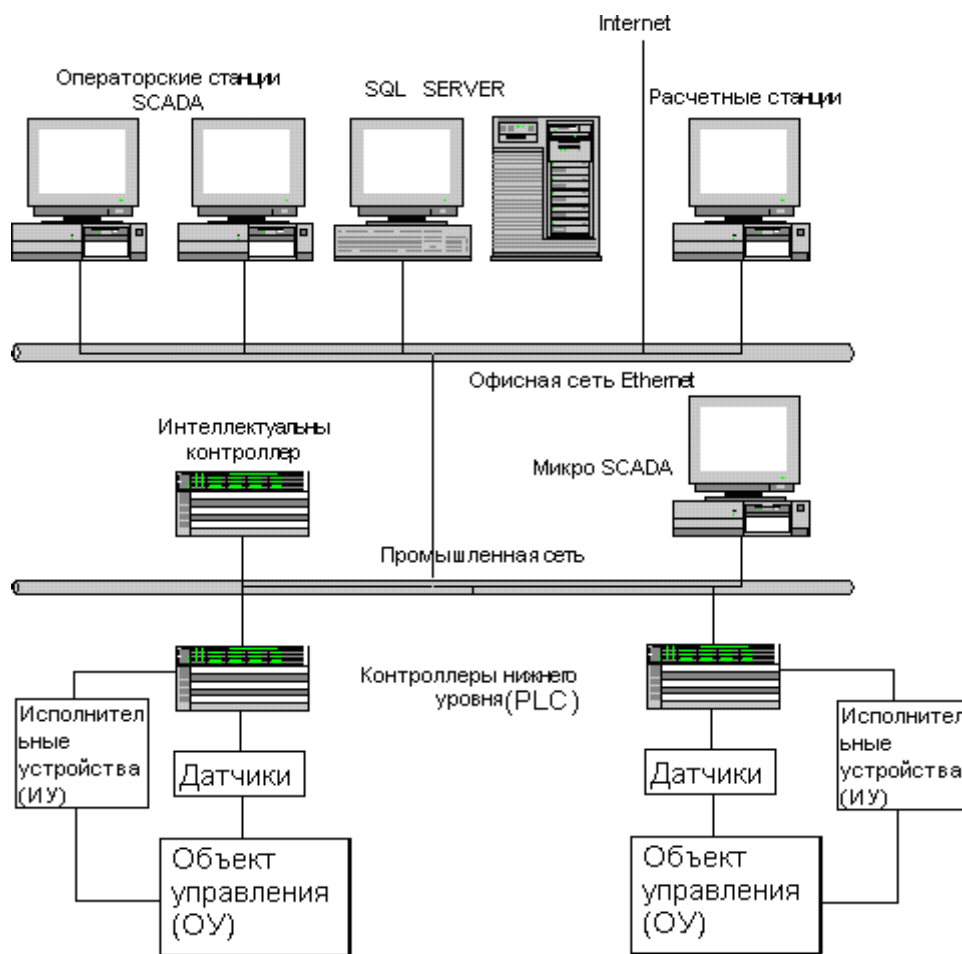


Рисунок 1 – Обобщенная схема системы контроля и управления

как сбор данных с локальных контроллеров; обработку данных, включая масштабирование; поддержание единого времени в системе; синхронизацию работы подсистем; организацию архивов по выбранным параметрам; обмен информацией между локальными контроллерами и верхним уровнем; работу в автономном режиме при нарушениях связи с верхним уровнем; резервирование каналов передачи данных и др.

2. *Верхний уровень* – диспетчерский пункт (ДП) – включает, прежде всего, одну или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера-оператора. Здесь же может быть размещен сервер базы данных, рабочие места (компьютеры) для специалистов и т.д.

Станции управления отражают ход технологического процесса и оперативного управления. Решение этих задач посредством систем SCADA как специализированного программного обеспечения, ориентированного на обеспечение интерфейса между диспетчером и системой управления, а также коммуникацию с внешним миром, позволяет обеспечивать: автоматизированную разработку, дающую возможность создания ПО системы автоматизации без реального программирования; средства исполнения прикладных программ; сбор первичной информации от устройств нижнего уровня; обработку первичной информации; регистрацию алармов и исторических данных; хранение информации с возможностью ее пост-обработки (через интерфейсы к базам данных); визуализацию информации в виде мнемосхем, графиков и т.п.; возможность работы прикладной системы с наборами параметров, рассматриваемых как "единое целое".

Micro-SCADA – это системы, реализующие стандартные (базовые) функции, присущие SCADA-системам верхнего уровня, но ориентированные на решение задач автоматизации в определенной отрасли.

Большой объем информации, непрерывно поступающий от устройств ввода/вывода систем управления, предопределяет наличие в таких системах баз данных (БД). Основная задача БД – своевременно обеспечить пользователей всех уровней управления требуемой информацией. Но если на верхних уровнях АСУ эта задача решена с помощью традиционных БД, то на уровне АСУ ТП архивирование технологических параметров реализуется посредством систем управления БД реального времени (СУБД РВ).

В системах АСУ ТП, выполняемых в рамках SCADA систем, обеспечивается выполнение необходимого условия эффективной реализации диспетчерского управления, имеющего ярко выраженный динамический характер, а именно, осуществление процессов сбора, передачи, обработки, отображения, представления информации.

От диспетчера уже требуется не только профессиональное знание технологического процесса, основ управления ним, но и опыт работы в информационных системах, умение принимать решение в нестандартных и аварийных ситуациях и многое другое. Диспетчер зачастую становится главным действующим лицом в управлении технологическим процессом.

Динамические тренажеры и призваны решать задачи подготовки персонала по принятию решений в динамически меняющихся условиях работы, повышению надежности систем диспетчерского управления в целом.

ИСР класса SCADA позволяют подойти к созданию эффективных динамических тренажеров с позиций единого подхода реализации АСУ ТП с той лишь разницей, что при создании обобщенной системы управления и контроля технологическим процессом реальный производственный уровень PLC/SoftPLC (с вполне конкретными аппаратными средствами измерения, контроля, управления), а также реальный объект управления заменяются совокупностью математических моделей как технологических объектов, так и входных сигналов.

В этом случае обобщенная система управления и контроля технологическим процессом в рамках динамического тренажера может быть представлена в виде (рис.2):

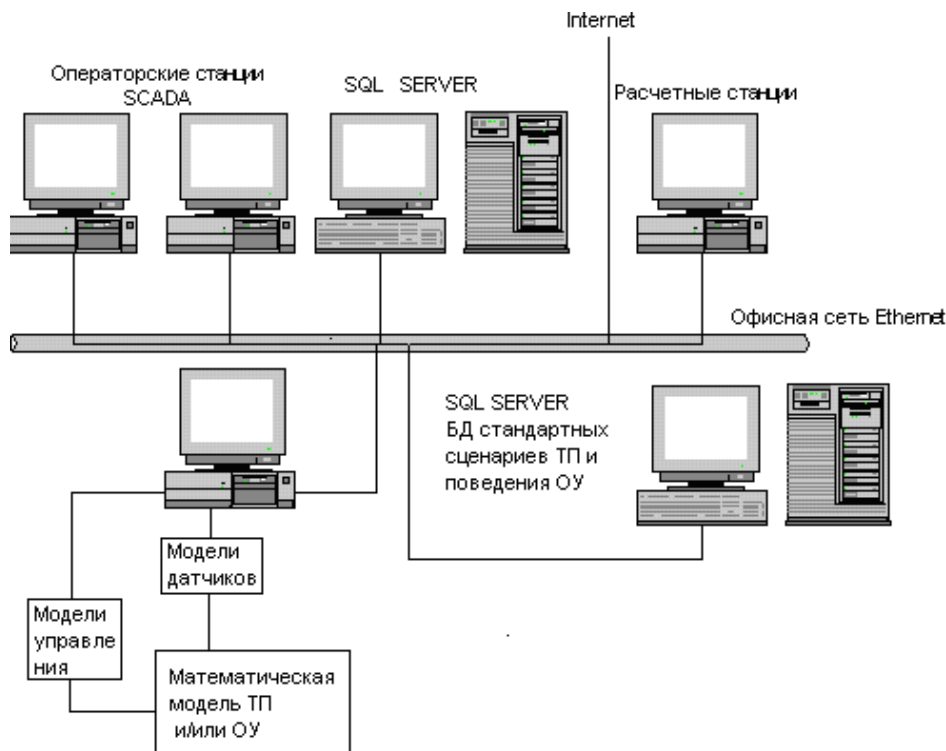


Рисунок 2 – Обобщенная схема реализации динамического тренажера ТП и ОУ

Принципиальным вопросом для реализации такого подхода является наличие полной информации о характере, параметрах и характеристиках технологического процесса, а также наличие стандартных и нестандартных сценариев развития ситуации при осуществлении диспетчерского управления.

В частности, сценарии могут составляться из списков вида: регламентное ведение технологического процесса, аварийные события и комментарии к ним; указания оператору по проверке обязательных действий; проверки запрещенных действий и т.д.

Техническая документация, необходимая для разработки тренажеров, должна включать схемы с указанием точек измерений, характеристики трубопроводов, с наименованием арматуры; инструкции по эксплуатации; перечни измерительных приборов, диапазоны измерений, карты установок защитных средств, блокировок; инструкции по ликвидации аварийных ситуаций; протоколы работы защит, блокировок; режимные карты (или результаты испытаний); основные технические характеристики основного и вспомогательного оборудования; перечни арматуры с различными типами приводов (для ручного привода – кроме времени хода еще и время доступа); технические и технологические расчеты процессов; диаграммы основных параметров, снятых во время пуска (останова) и другие данные.

Особый вопрос – это вопрос, касающийся выбора базиса для разработки динамических тренажеров.

В ряду признанных производителей ИСП таких, как InTouch; Citect; FIX; Genesis; Sitex; Factory Link; RealFlex и других необходимо отдельно выделить ИСП TraceMode (AdAstrA).

Его отличительная особенность – различные масштабы создаваемых АСУ: от контроллера и АРМ оператора до сложных распределенных систем. Кроме того, в нем реализованы возможности интегрирования данных уровня технологических процессов в бизнес-процессы управления производством, начиная от систем класса SOFTLOGIC (средств программирования промышленных контроллеров) и SCADA/HMI (операторского интерфейса) до систем класса MES (управления производством), EAM (управления основными фондами) и HRM (управления персоналом).

Такие возможности создают предпосылки создания и различных по уровню сложности и интеграции динамических тренажеров различных процессов и производств.

Выводы. Техническое задание на создание эффективного динамического тренажера сродни техническому заданию на создание полноценной АСУ ТП и АСУП. Одним словом, эффективный динамический тренажер можно трактовать как подсистему уровня АСУ.

Для эффективной реализации динамических тренажеров различных процессов и производств по обобщенной схеме проектирования и разработки оптимально подходят интегрированные ИСП класса SOFTLOGIC/SCADA/MES/EAM/HRM, например TRACE MODE.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деменков Н.П. SCADA – системы как инструмент проектирования АСУ ТП// Приложение к журналу «информационные технологии». – 2002. – №11. – 24с.
2. Ляпунов С.И., Корнеева А.И. Некоторые особенности развития SCADA – систем// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2002. – №11. – С.37-39.
3. Антимиров Л.В. 2005 – 2006: Развитие технологий TRACE MODE// Управление производством в системе TRACE MODE: Двенадцатая международная конференция и выставка/ тезисы докладов. – Москва. – 2006. – С.4-13.